

**CAPÍTULO I**

**DISEÑO TEÓRICO DE LA**

**INVESTIGACIÓN**

# **CAPÍTULO I**

## **DISEÑO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Introducción**

La estabilización de suelos es una práctica fundamental en la ingeniería civil para mejorar las propiedades mecánicas de materiales con baja capacidad portante. En este contexto, el objeto de investigación de este estudio es analizar el efecto de dos aditivos, uno convencional como la cal y otro menos difundido como el Terrasil, aplicados sobre arcillas de baja a media compresibilidad, con el fin de observar su influencia en el incremento del CBR, parámetro clave en el diseño de pavimentos y obras de infraestructura.

En años recientes, el uso de estabilizantes químicos ha cobrado relevancia ante la necesidad de optimizar el comportamiento de suelos problemáticos. Experiencias previas, tanto en estudios académicos como en intervenciones puntuales de instituciones públicas, han demostrado que aditivos como la cal mejoran la resistencia y estabilidad de los suelos arcillosos. Sin embargo, en la zona del proyecto aún predomina el uso de técnicas convencionales, sin incorporar nuevas tecnologías como el Terrasil. Además, la comunidad local y las entidades encargadas del mantenimiento vial han reportado fallas recurrentes en caminos no pavimentados y estructuras con subrasantes deficientes, lo que genera costos elevados y escasa durabilidad.

El propósito de esta investigación es evaluar, mediante ensayos de laboratorio, la influencia que tiene la aplicación conjunta de cal y Terrasil en las propiedades de suelos arcillosos locales, utilizando como parámetro principal el valor del CBR. Se busca generar información técnica que permita comparar el comportamiento del suelo natural frente a su estabilización con diferentes dosificaciones de cal, manteniendo constante el Terrasil, con el objetivo de identificar una alternativa eficiente, técnica y económicamente viable para mejorar subrasantes en proyectos de infraestructura.

Desde la perspectiva de la ingeniería civil, esta investigación se fundamenta en principios de mecánica de suelos, estabilización química y diseño estructural de pavimentos. Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de soluciones más duraderas para la

construcción y mantenimiento de caminos y cimentaciones, impactando positivamente en la planificación técnica y en la economía de las entidades responsables, así como en la calidad de vida de los usuarios.

## **1.2 Antecedentes**

La estabilización de suelos arcillosos ha sido un desafío constante en la ingeniería civil especialmente cuando se trata de su uso como subrasante en obras viales, debido a su alta plasticidad y baja capacidad de soporte. Estos suelos presentan dificultades considerables en el diseño y construcción de estructuras duraderas. En este contexto, la combinación de cal y Terrasil surge como una estrategia prometedora para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos y cumplir con los requisitos de calidad en proyectos de construcción.

La cal, un agente estabilizador ampliamente reconocido, ha demostrado su eficacia en la modificación de suelos arcillosos. La interacción química de la cal con los componentes arcillosos conduce a la formación de enlaces entre partículas, reduciendo la plasticidad y aumentando la resistencia. Esta reacción también promueve la formación de estructuras más estables y duraderas en el suelo, lo que mejora su capacidad de carga y comportamiento ante cargas repetidas.

**Angulo, 2019, en su trabajo “ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FISICO – MECÁNICAS COMO CAPA DE RODADURA EN LA PROLONGACIÓN NAVARRO CAUPER, DISTRITO SAN JUAN – MAYNAS – IQUITOS, 2019”,** Se utilizó los porcentajes de 3, 6, 9, y 12%, determinando una mejora significativa en la plasticidad, densidad de compactación, aumento de la humedad requerida en este proceso debido a la reacción exotérmica producida entre la cal y la arcilla y aumento significativo en la capacidad de soporte del suelo.

**Gutiérrez, 2020, en su trabajo ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL SUELO DE LA BASE CON ADITIVO QUÍMICO TERRASIL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES DEL ALMACÉN DE CONCENTRADOS MINEROS – ALMACENES LOGISMINSA, VENTANILLA – CALLAO** ,El suelo es un compuesto iónico, es decir contiene cargas positivas y negativas, con lo que

dependiendo del tipo de suelo este contendrá mayor cantidad de cationes o iones; por ejemplo, la arcilla tiene una carga negativa, por lo que se obtendrá mejores resultados con el uso del aditivo químico Terrasil comparado contra un suelo granular.

En este escenario, el Terrasil, un aditivo mineral con propiedades excepcionales presenta la oportunidad de mejorar aún más la estabilización de suelos arcillosos. La capacidad única del Terrasil para absorber agua y mejorar la cohesión podría contrarrestar la alta plasticidad y reducir la expansión y contracción asociada con variaciones en la humedad en los suelos arcillosos. La combinación de la acción química de la cal y las características físicas del Terrasil podría conducir a un suelo más homogéneo, menos susceptible a la erosión y a los cambios volumétricos, y capaz de resistir las tensiones inducidas por la carga.

En resumen, la combinación de cal y Terrasil parece prometedora para estabilizar suelos arcillosos en proyectos contribuyendo a mejorar la calidad y durabilidad de las infraestructuras construidas sobre suelos arcillosos.

### **1.3 Justificación**

#### **Justificación académica**

El presente estudio se fundamenta en teorías y principios de la ingeniería civil, específicamente en el área de la mecánica de suelos. Se aplican conocimientos sobre capacidad portante, comportamiento de suelos arcillosos y su modificación mediante aditivos. Las principales teorías que sustentan el trabajo son:

- La teoría de la capacidad portante de Terzaghi.
- El diseño estructural basado en el ensayo CBR (California Bearing Ratio).

Estas bases académicas permiten analizar cómo la aplicación de cal y aditivo Terrasil incide en la mejora de la resistencia del suelo, constituyéndose en un aporte significativo al conocimiento técnico dentro del campo de la ingeniería civil. Además, estudios como los de Jayakody et al. (2018) y Kumar et al. (2019) respaldan la eficacia del uso de estabilizantes como la cal y aditivos poliméricos en la mejora de las propiedades

mecánicas de suelos arcillosos, incrementando su capacidad portante y comportamiento estructural.

#### Justificación técnico-práctica

El estudio propone una solución práctica al problema de suelos arcillosos con baja capacidad portante, mediante la estabilización con cal y Terrasil. Esta técnica es de fácil aplicación en campo, permite el aprovechamiento de suelos locales y reduce la necesidad de importar materiales costosos (Kumar et al., 2019). Además, los resultados obtenidos pueden ser interpretados y replicados por ingenieros civiles en proyectos similares, lo que aporta versatilidad y eficiencia técnica en la toma de decisiones para el diseño y mantenimiento de infraestructuras viales (Zha et al., 2018). La mejora en el valor del CBR permite diseñar capas estructurales más delgadas y resistentes, optimizando así el uso de materiales y recursos.

#### Justificación e importancia social

La aplicación de esta investigación tiene un impacto directo en la mejora de la calidad de las infraestructuras, especialmente en caminos no pavimentados o zonas con suelos problemáticos. Al aumentar el valor del CBR, se logra una mayor estabilidad del terreno, reduciendo fallas estructurales, accidentes y costos de mantenimiento (Cai et al., 2020). Esto se traduce en beneficios para la población usuaria y para las instituciones responsables del mantenimiento vial. Asimismo, se promueve una construcción más sostenible, al reducir el consumo de recursos y la huella ambiental, alineándose con lo planteado por Smith et al. (2017), quienes destacan que el uso de estabilizantes naturales puede contribuir significativamente a la sostenibilidad en proyectos viales.

### **1.4 Situación problemática**

Se busca analizar la capacidad de soporte de carga en suelos arcillosos implementando dos aditivos químicos siendo uno convencional como la cal y el otro aditivo Terrasil poco convencional en nuestro medio, en función al ensayo del CBR.

Se ha conocido que al aplicar los aditivos cal y Terrasil pueden incrementar los valores del CBR en suelos arcillosos; sin embargo, se carece de estudios locales que evalúen su eficacia conjunta.

Se pronostica que un análisis profundo y sistemático de la aplicación de cal y Terrasil logrará una mejora significativa en la resistencia del suelo. Se espera que los ensayos muestren un aumento en los valores de resistencia después de la aplicación de estos estabilizantes, indicando su viabilidad.

El presente análisis definirá la mejor manera de estabilizar suelos realizando estudios y pruebas de laboratorio. El efecto combinado de cal y Terrasil permitirá sustentar técnicamente su aplicación y optimizar diseños viales.

#### **1.4.1 Problema**

¿De qué manera el análisis de la aplicación de cal y aditivo Terrasil en las arcillas de baja a media compresibilidad, mejora el valor de CBR?

#### **1.4.2 Relevancia y factibilidad del problema**

El problema de investigación, que se centra en cómo los estabilizantes químicos cal y el aditivo Terrasil pueden aumentar el CBR en arcilla, es de suma importancia para las construcciones viales y en construcción de infraestructuras. El CBR es esencial para medir la capacidad del suelo de soportar cargas, lo que influye directamente en la seguridad, la durabilidad y mayor calidad.

#### **1.4.3 Delimitación temporal y espacial de la investigación**

Delimitación Espacial:

La presente investigación se enmarca en el área de mecánica de suelos, rama fundamental de la ingeniería civil, relacionada con la caracterización, análisis y mejora de suelos arcillosos mediante técnicas de estabilización química.

El trabajo experimental se desarrolla en suelos extraídos de barrios ubicados en la provincia Cercado del departamento de Tarija, los cuales presentan predominancia de

arcillas de baja a media compresibilidad (CL, según SUCS). Las actividades de muestreo, ensayos de laboratorio y análisis se realizan en los laboratorios, garantizando condiciones controladas y representativas.

Los resultados de la investigación están orientados principalmente a su aplicación en la construcción y mejora de caminos no pavimentados, subrasantes y bases de estructuras viales, optimizando la capacidad portante del suelo mediante el uso combinado de cal y Terrasil. Este conocimiento puede ser replicable en otras zonas con suelos de características similares.

#### Delimitación Temporal:

La investigación se llevará a cabo durante este periodo de trabajo. Esta ventana de tiempo permitirá realizar un análisis exhaustivo de los efectos de la aplicación de los estabilizantes en arcillas (CL).

**Tabla 1.1** Delimitación temporal

<b>Fecha aproximada</b>	<b>Evento</b>	<b>¿Cómo tributa este dato?</b>
Abril del 2023	Se investiga aditivo comercializados en el país.	Se verifica que sea factible el conseguir los aditivos empleados.
Mayo del 2023	Se inicia la planificación.	Se plantea como se realizará la estabilización y los ensayos necesarios.
Junio del 2023	Se da procedente al título.	Aprobada en una junta de departamento.
Julio del 2023	Se aprueba la asignatura CIV 501	Perfil aprobado en sus diseños; teórico y metodológico.
Agosto de 2023	Inicia la ubicación de las zonas de muestreo.	Se define y delimita espacialmente el área de estudio, asegurando la representatividad del suelo adecuado a analizar.

Septiembre de 2023	Se da inicio a los ensayos de laboratorio correspondientes.	Se obtienen resultados experimentales.
Noviembre de 2023	Entrega de borrador.	Borrador completo para ser revisado y aprobado por el docente.
A partir de diciembre	Pre defensa.	Pre defensa con tribunales.

**Fuente:** Elaboración propia

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Analizar los efectos de la aplicación de cal y aditivo Terrasil adicionado a las arcillas de baja a media compresibilidad, verificando su incremento mediante el ensayo de Razón de Soporte California (CBR), de tal manera, contribuir con una alternativa más de solución a problemas presentados en la ingeniería civil.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Identificar la zona de extracción de las muestras.
- Caracterizar el suelo que será empleado en la realización de los ensayos.
- Evaluar las propiedades mecánicas (densidad seca máxima y capacidad de soporte C.B.R de arcillas (CL).
- Comparar el costo en el empleo para mejoramiento de subrasante con los materiales analizados en el presente trabajo.

## **1.6 Hipótesis**

El uso de los agentes estabilizantes cal y Terrasil tienen un efecto de mejora en el CBR cuando se los adiciona de forma conjunta a arcillas de media a baja compresibilidad.



### 1.7 Operacionalización de las variables

Se presentan dos variables en el presente proyecto, que son; la cantidad de aditivo Terrasil y de la cal, no se toma al suelo como variable ya que se indica que el suelo a usar será una arcilla de media a baja compresibilidad (CL, clasificación SUSCS), a continuación, se identificarán las variables independientes y dependientes.

**Variable independiente:** Cantidad de aditivo Terrasil y cantidad de cal, que será agregada a la arcilla con la finalidad de observar el incremento de la resistencia CBR en el suelo.

**Variable dependiente:** Valor del CBR, determinado mediante ensayos de laboratorio, en función de las distintas proporciones de estabilización aplicadas.

**Tabla 1.2** Operacionalización de la variable independiente

<b>Variables independientes</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor/acción</b>
Cantidad aditivo Terrasil	Tamaño de muestra	Kilogramo por metro cubico (kg/m <sup>3</sup> )	0.5kg/m <sup>3</sup> , constante en todas las mezclas.
Cantidad de cal	Tamaño de muestra	Porcentaje (%)	2%, 4% y 6%, respecto al suelo seco.

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 1.3** Operacionalización de la variable dependiente

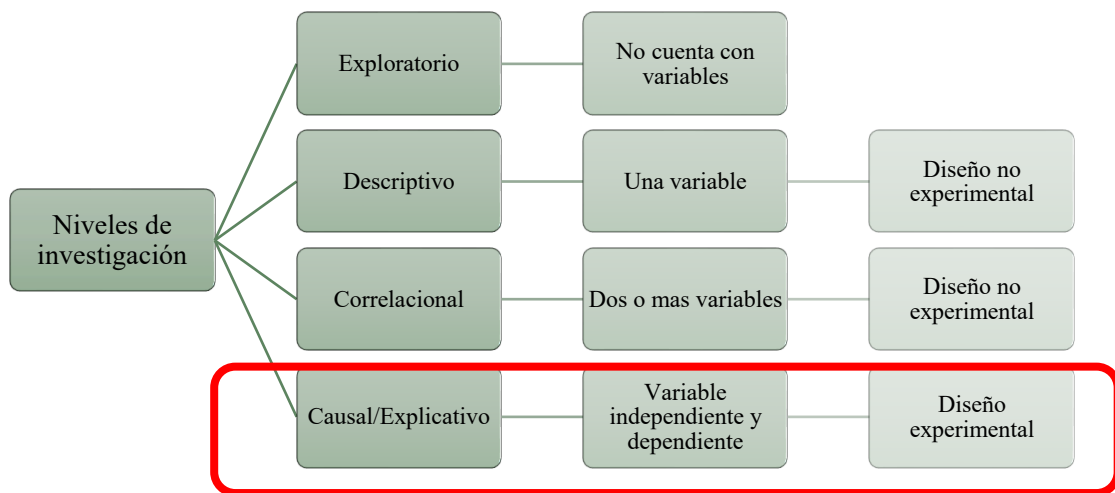
Variable dependiente		Dimensión	Indicador	Valor/acción
Valor CBR	Suelo	Densidad máxima del Suelo	Gramos sobre centímetro cubico (g/cm <sup>2</sup> )	Uso del equipo de compactación T-180.
		Humedad optima del Suelo	Porcentaje (%)	Valor extraído de la curva de compactación de la muestra de suelo.
		CBR del Suelo	Gramos sobre centímetro cubico (g/cm <sup>2</sup> )	Prensa hidráulica con anillo dinamómetro calibrado con velocidad constante.
	Suelo + Terrasil + Cal	Densidad máxima del Suelo + Terrasil + Cal	Gramos sobre centímetro cubico (g/cm <sup>2</sup> )	Uso del equipo de compactación T-180.
		Humedad optima del Suelo + Terrasil + Cal	Porcentaje (%)	Valor extraído de la curva de compactación de la muestra de suelo.
		CBR del Suelo + Terrasil + Cal	Gramos sobre centímetro cubico (g/cm <sup>2</sup> )	Prensa hidráulica con anillo dinamómetro calibrado con velocidad constante.

**Fuente:** Elaboración propia

## 1.8 Identificación del alcance de la investigación

La presente investigación utiliza un diseño experimental de tipo causal explicativo. En este diseño, se manipulan las cantidades de aditivos añadidos a un suelo arcilloso de baja a media compresibilidad (clasificación SUCS: CL) como variables independientes. La variable dependiente de estudio es la obtención de los valores de CBR, utilizando el suelo natural como valor de referencia pertenecientes a barrios de la ciudad de Tarija. La cal será una cal apagada también llamada cal hidratada.

**Figura 1.1** Niveles de investigación



**Fuente:** Elaboración propia

Para garantizar la integridad de los resultados, se aplica un nivel de control simple a todos los ensayos realizados en la estabilización del suelo, empleando tres proporciones de cal: 2 %, 4 % y 6 %, mientras que la dosificación del aditivo Terrasil se mantuvo constante en 0.5 kg/m<sup>3</sup> para todos los casos. Esta combinación permitió analizar el efecto de diferentes contenidos de cal junto a una dosis fija de Terrasil.

# **CAPÍTULO II**

## **ESTADO DE CONOCIMIENTO**

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DE CONOCIMIENTO**

#### **2.1 Marco teórico**

##### **2.1.1 Suelo**

El suelo está compuesto por partículas orgánicas e inorgánicas organizadas con propiedades variables, especialmente en dirección vertical. Se clasifica en residuales, formados en su lugar de origen, y transportados, desplazados por aire o agua. Los suelos residuales mantienen una estructura relacionada con la roca madre, mientras que los transportados reflejan mecanismos de deposición. La Mecánica de Suelos ha enfocado principalmente el estudio en suelos transportados debido a su relevancia en zonas urbanas, aunque sus propiedades difieren de las de los suelos residuales. (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005)

##### **2.1.2 Estabilización de suelos**

La estabilización de suelos es un conjunto de procedimientos que busca mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo natural, optimizando su resistencia, durabilidad y comportamiento ante las cargas previstas, principalmente en subrasantes, bases y subbases de pavimentos.

Este proceso es indispensable cuando se trabaja con suelos que presentan alta plasticidad, baja capacidad de soporte o elevada sensibilidad a la humedad, como ocurre con las arcillas de baja a media compresibilidad.

Se entiende que un suelo inadecuado puede deformarse excesivamente bajo las cargas directas del tránsito o de estructuras edificadas. Por tanto, la estabilización tiene como propósito fundamental controlar la variación de humedad, reducir la plasticidad, aumentar la capacidad portante y garantizar un comportamiento estable a lo largo de la vida útil del proyecto. (Braja, 2015)

Los criterios básicos para una estabilización adecuada incluyen:

El suelo tratado debe alcanzar una resistencia mínima suficiente para soportar las cargas de diseño, considerando condiciones extremas de humedad y temperatura.

Debe conservar su integridad estructural durante la vida útil de la obra, con mantenimiento mínimo.

Se debe escoger la técnica y el agente estabilizante de forma económica y ambientalmente responsable, priorizando la disponibilidad local de materiales y su compatibilidad con las propiedades del suelo.

Entre los métodos más utilizados destacan la estabilización mecánica (mezcla con materiales granulométricamente adecuados), la estabilización física (compactación adecuada) y la estabilización química, que implica la adición de agentes como la cal, el cemento, la ceniza volante o productos novedosos como polímeros y biopolímeros, incluyendo el aditivo Terrasil. (Bowles, 1996)

Finalmente, la estabilización está estrechamente ligada a la mejora de indicadores como el (CBR), que permite cuantificar la capacidad de soporte de la subrasante y verificar la eficacia del tratamiento aplicado.

### **2.1.3 Tipos de estabilización**

La estabilización de suelos abarca una variedad de métodos destinados a mejorar sus propiedades físicas y mecánicas para hacerlos más aptos para proyectos de ingeniería civil. Es fundamental comprender los principios teóricos, prácticos y experimentales que regulan el comportamiento de los suelos finos, como las arcillas, debido a su elevada plasticidad, alta compresibilidad y sensibilidad a los cambios de humedad. (Braja, 2015)

El tipo de estabilización adecuado como mecánica, física o química debe seleccionarse considerando la granulometría, plasticidad, permeabilidad, así como factores climáticos, condiciones locales, requisitos estructurales y viabilidad económica

#### **2.1.3.1 Estabilización mecánica y física**

La estabilización mecánica y física se basa en modificar las características físicas del suelo para optimizar su comportamiento. Entre los métodos más comunes se incluyen:

- Método granulométrico o de mezclas: Consiste en mezclar materiales de diferentes tamaños de partícula para lograr una distribución óptima que permita una mayor compactación y estabilidad.
- Compactación: Es uno de los procedimientos más usados, ya que al aumentar la densidad del suelo se reduce su porosidad, mejorando la capacidad de carga y disminuyendo su compresibilidad. Para ello se emplean equipos como rodillos lisos, neumáticos o pata de cabra, dependiendo del tipo de suelo y del grado de compactación requerido. (Sherwood, 1993)
- Uso de geotextiles y geosintéticos: Estos materiales actúan como refuerzos, capas de separación o elementos de drenaje, incrementando la resistencia y reduciendo la deformación del suelo.

La eficacia de estos métodos depende de la correcta selección de equipos de compactación y de un control riguroso de la humedad óptima de compactación.

#### **2.1.3.2 Estabilización química**

La estabilización química consiste en incorporar aditivos que reaccionan con los minerales del suelo, modificando su estructura y mejorando sus propiedades geotécnicas. Su aplicación es especialmente recomendable para suelos finos de alta plasticidad y baja capacidad portante, como las arcillas de baja a media compresibilidad. Los agentes químicos más comunes incluyen cal, cemento Portland, productos asfálticos, sales y polímeros modernos como el Terrasil.

- Cal: Es uno de los estabilizantes más empleados debido a su bajo costo y efectividad. Reduce la plasticidad, incrementa la resistencia al corte y disminuye la expansividad de suelos arcillosos. Su aplicación se realiza como cal viva o cal hidratada, dependiendo de la reactividad deseada.
- Cemento Portland: Es adecuado para suelos granulares o arenas finas. Aporta resistencia a la compresión y durabilidad frente a cargas repetitivas.

- Productos asfálticos: Se usan principalmente en suelos no cohesivos para impermeabilizarlos y mejorar su resistencia al agua.
- Sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio): Se emplean para reducir el polvo, controlar la humedad y mejorar la impermeabilidad en suelos finos.
- Polímeros y enzimas orgánicas: Tecnologías recientes como Terrasil permiten mejorar significativamente la impermeabilidad y resistencia a la humedad, al actuar como agentes hidrofóbicos que sellan los microporos del suelo (Zha et al., 2018).

De acuerdo con Torrente y Sagues, son potencialmente estabilizables con cal los suelos A-5, A-6, A-7 y algunos A-2-6, A-2-7 (clasificación AASHTO), así como los CH, CL, MH, ML, SC y SM (clasificación SUCS). Es esencial considerar la estabilidad volumétrica, la resistencia mecánica, la permeabilidad y la durabilidad esperadas, así como el método de diseño, que dependerá del uso final del suelo tratado. (Torrente y Sagues, 1974)

#### **2.1.3.2.1 Proceso de estabilización con cal**

La estabilización de suelos con cal es uno de los métodos más usados a nivel mundial para mejorar suelos arcillosos y limosos. Países como EE.UU., Reino Unido, India y gran parte de América Latina lo aplican en carreteras, plataformas industriales y cimentaciones. Su éxito se debe a su eficacia comprobada y disponibilidad local de cal hidratada.

La estabilización del suelo cambia considerablemente las características de este, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua. La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán.

El proceso inicia con una investigación de suelos detallada. Se toman muestras representativas, se analizan propiedades físicas y mecánicas (granulometría, límites de



Atterberg, compactación Proctor, CBR), y se determina la plasticidad y expansividad. Esto establece la dosificación de cal (normalmente entre 2% y 8% del peso seco).

El siguiente paso es la preparación del área, que implica limpiar el terreno, retirar vegetación y materia orgánica. Luego se escarifica la capa de suelo a estabilizar, con motoniveladoras o roto cultivadores, alcanzando profundidades de 15 a 30 cm según diseño. (Association, 2004)

Posteriormente, la cal se esparce en seco usando esparcidores mecánicos tipo spreader trucks para grandes extensiones o manualmente en trabajos menores. En zonas húmedas, se puede aplicar cal en forma de lechada. Es vital controlar la dosis para evitar mezclas desbalanceadas.

Después, se realiza la mezcla y homogenización del suelo con la cal mediante estabilizadoras rotativas, motoniveladoras o pulverizadoras en sitio. Aquí empieza la reacción de floculación, que reduce la plasticidad y mejora la trabajabilidad.

Se ajusta la humedad con camiones cisterna para alcanzar la humedad óptima de compactación. Es común dejar un período de precurado (24–72 horas) para permitir que las reacciones puzolánicas se desarrollen. Este paso es crítico para lograr una ganancia de resistencia a largo plazo.

Finalmente, se compacta el material tratado en capas de 15–20 cm con rodillos de pata de cabra y vibratorios hasta lograr densidades  $\geq 95\%$  Proctor modificado. El control de calidad incluye pruebas de densidad in situ, humedad y CBR. Una vez estabilizada, la superficie se perfila y se sella para prevenir infiltración de agua.

Subrasante (o subbase): La cal puede estabilizar permanentemente el suelo fino empleado como una subrasante o subbase, para crear una capa con un valor estructural significativo en el sistema del pavimento. Los suelos tratados pueden ser del lugar (subrasante) o bien, de materiales de préstamo. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.

Bases: La estabilización de bases es utilizada para la construcción de caminos nuevos y para la reconstrucción de caminos deteriorados, y generalmente requiere la adición de 2 a 4 por ciento de cal respecto al peso del suelo seco.

De igual manera en otras bibliografías recomiendan una adición de 2 a 7 por ciento del peso del suelo seco. (Olivera Bustamante, 2009)

#### **2.1.4 Definiciones de cal**

La cal es uno de los materiales de construcción más antiguos utilizados por la humanidad. Su uso se remonta a miles de años atrás, con evidencias arqueológicas que muestran su aplicación en morteros y obras hidráulicas desde las civilizaciones griega y romana. Según (Bell, 1996), los romanos empleaban cal viva mezclada con puzolana para construir acueductos, cisternas y estructuras que debían resistir la humedad y durar cientos de años.

En el ámbito geotécnico, el uso de cal como estabilizante de suelos comenzó a sistematizarse en el siglo XX, especialmente a partir de los años 1950 en Estados Unidos y Europa. Las investigaciones de (Sherwood, 1993) demostraron científicamente que la cal hidratada genera reacciones químicas con las arcillas, mejorando significativamente sus propiedades mecánicas.

Se obtiene al descomponerse rocas calizas mediante la acción del calor. Al calentar estas rocas a más de 900 grados Celsius, se genera óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), conocido como cal viva, un sólido blanco con un peso específico de  $3.4 \text{ g/cm}^3$ . Cuando la cal viva entra en contacto con el agua, se hidrata (proceso conocido como apagado de la cal) liberando calor. La adición de cal en materiales arcillosos para usos en terracerías, revestimientos, sub-bases y bases provoca, debido a sus diversas reacciones, un aumento en el límite líquido y un mayor incremento en el límite plástico, lo que reduce el índice plástico. Esto resulta en una mayor estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos.

- Color: Las cales comerciales tienen color blanco o débilmente gris, a veces un color rojizo debido al óxido de hierro que se encuentra en los yacimientos.
- Densidad: Esta propiedad depende de la temperatura de calcinación, cuando más alta es la temperatura de calcinación, mayor será la densidad de la cal viva.

- Dureza: La dureza de las cales varía entre muy blanda y una dureza que se aproxima a la de la piedra caliza original de donde se obtuvo, la dureza de la cal viva dependerá de la temperatura de calcinación.
- Porosidad: Depende del origen de las rocas calizas y de las condiciones en que se lleve a cabo la calcinación. La porosidad de la cal viva es importante porque influye en la actividad química de la sustancia.
- Plasticidad: Es una propiedad importante, que se define como la capacidad que posee una masa de cal para cambiar su forma cuando esta es sometida a presión, sin que se produzca ruptura en su forma generada.

#### **2.1.4.1 Cales vivas**

La cal viva, también conocida como óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), es un compuesto químico sólido que se obtiene mediante la calcinación de rocas calizas a temperaturas superiores a 900 grados Celsius. Es altamente reactivo con el agua, produciendo calor en el proceso de hidratación. Se utiliza en diversas aplicaciones industriales, agrícolas y de construcción debido a su capacidad para desempeñar funciones como agente desecante, estabilizador de suelos y neutralizador de ácidos.

##### **Cal viva en seco**

- Ventajas. - La cal viva es una opción económica porque es una forma más concentrada de cal en comparación con la cal hidratada, conteniendo entre 20 y 24 por ciento más de óxido de calcio "disponible". Por lo tanto, aproximadamente un 3 por ciento de cal viva equivale a un 4 por ciento de cal hidratada, siempre que las condiciones permitan una hidratación completa de la cal viva con suficiente humedad. Además, debido a su mayor densidad, requiere menos espacio de almacenamiento.
- Desventajas. - La cal viva necesita un 32 por ciento de su peso en agua para convertirse en cal hidratada, y puede haber pérdidas adicionales debido a la evaporación significativa causada por el calor de hidratación. Es esencial tener

cuidado al usar cal viva para asegurar una adecuada adición de agua, fraguado y mezcla. Estos mayores requerimientos de agua pueden presentar problemas logísticos o de costos en áreas remotas sin una fuente cercana de agua. La cal viva también puede requerir más mezcla que la cal hidratada seca o las lechadas de cal, ya que sus partículas, que son más grandes, primero deben reaccionar con el agua para formar cal hidratada y luego mezclarse con el suelo.

#### **2.1.4.2 Cales hidratados**

La cal hidratada, también conocida como hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), se obtiene al añadir agua a la cal viva, provocando una reacción exotérmica que da como resultado la formación de una suspensión o lechada. Es un polvo blanco que se utiliza en una variedad de aplicaciones, como tratamiento de aguas, construcción, agricultura, fabricación de productos químicos y alimentación animal. La cal hidratada es menos reactiva que la cal viva, pero sigue siendo un producto químico versátil y útil.

Cal hidratada en polvo

- Ventaja: La cal hidratada en polvo puede aplicarse más rápidamente que la lechada. Aunque puede usarse para secar arcillas, no es tan eficaz como la cal viva en este aspecto.
- Desventaja: Las partículas hidratadas de cal son finas, lo que puede generar problemas de polvo. Por esta razón, este tipo de aplicación suele ser inadecuado en áreas pobladas.

#### **2.1.4.3 Caracterización de la cal**

Basándome en una investigación previa sobre la caracterización de la cal, obtenida de un proyecto de grado anterior, se detallan los ensayos necesarios para su estudio. Según este trabajo, estos ensayos ofrecen una visión más clara del tipo y calidad de la cal, aspectos cruciales para su uso en la estabilización de suelos.

**Tabla 2.1** Característica física y química de la cal

Descripción	Contenido en porcentaje
	Cal hidratada de El Puente
CaO	41,94
MgO	24,31
SiO <sub>3</sub>	1,12
Otros	32,63
Total	100
Clasificación	Cal árida o magra
Índice de pH	12,69

**Fuente:** “ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE EN ARCILLAS EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE CAL AÑADIDO PARA SU ESTABILIZACIÓN”, JHONATAN DAVID SORZANO NAVAS, página 101.

**Tabla 2.2** Análisis granulométrico de la cal

Análisis granulométrico de la cal hidratada					
Porcentaje de material retenido		Especificaciones según norma AST		Especificaciones según norma peruana y UNE	
Tamiz N°	El Puente	% Max. Retenido	Obs.	% Max. retenido	Obs.
N° 30 (0,59mm)	2,37	3	Cumple	0,5	No cumple
N° 200 (0,074mm)	26,29	25	No cumple	15	No cumple

**Fuente:** “ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE EN ARCILLAS EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE CAL AÑADIDO PARA SU ESTABILIZACIÓN”, JHONATAN DAVID SORZANO NAVAS, página 102.

Además, se llevaron a cabo pruebas en el laboratorio de química de la UAJMS para determinar las propiedades químicas específicas de la cal hidratada, como el contenido de óxidos presentes. Los resultados revelaron que la cal de El Puente contiene un porcentaje considerable de óxido de magnesio, lo que la clasifica como cal dolomita o cal árida. Esta característica podría afectar su idoneidad para la estabilización de suelos, ya que el contenido total de óxidos en la cal no cumple con las normas internacionales.

En resumen, la cal disponible de la fábrica El Puente no cumple con todas las especificaciones técnicas requeridas para la estabilización de suelos, posiblemente debido a problemas en su fabricación y conservación. Por lo tanto, será necesario considerar estas limitaciones al utilizar esta cal en el proceso de estabilización del suelo. (Sorzano Navas, 2022)

### **2.1.5 Proceso de estabilización con Terrasil**

Terrasil es un aditivo mineral compuesto al 100% por organosilanos, diseñado específicamente para modificar y mejorar las propiedades de los suelos, especialmente los arcillosos. Esta formulación innovadora se destaca por su capacidad para reducir la plasticidad, mejorar la cohesión entre partículas y sellar microfisuras internas, lo que disminuye la permeabilidad y mitiga la expansión y contracción derivadas de los cambios de humedad.

Entre sus principales ventajas se encuentra la formación de superficies cohesionadas y compactas, lo que mejora la tracción y la comodidad de circulación vehicular, además de eliminar nubes de polvo, reduciendo la dispersión de partículas nocivas para las comunidades cercanas. Gracias a su acción hidrofóbica, Terrasil actúa como un sellador de la matriz del suelo, aumentando la capacidad de soporte y minimizando la acumulación de agua en la superficie, lo cual se traduce en menores costos de mantenimiento de caminos y vehículos.

El uso de Terrasil se recomienda principalmente en caminos no pavimentados con suelos finos a granulares, para mejorar caminos secundarios o mitigar polvo en zonas con alta exposición al tránsito. Su implementación técnica exige una caracterización inicial del suelo para determinar granulometría, límites de Atterberg, densidad seca máxima,

humedad óptima y relación de soporte CBR, con el fin de establecer la dosificación adecuada, que oscila generalmente entre 0.05% y 0.1% del peso seco del suelo, diluido en agua. (Industries, 2020)

El proceso constructivo inicia con la limpieza superficial para retirar vegetación y materia orgánica. Posteriormente, se realiza la escarificación de la capa superior del suelo entre 15 y 30 cm de espesor, empleando motoniveladoras y roto cultivadores. La solución de Terrasil se mezcla en tanques con agitadores mecánicos para garantizar homogeneidad y se aplica mediante camiones cisterna con sistema de riego por aspersión, asegurando una distribución uniforme.

La mezcla suelo-aditivo se homogeniza con estabilizadoras o motoniveladoras, ajustando la humedad al nivel óptimo de compactación, seguido de un curado inicial de 24 a 48 horas para permitir que el Terrasil genere su efecto hidrofóbico sellante. La compactación se realiza por capas no mayores a 20 cm, utilizando rodillos pata de cabra, vibratorios o neumáticos, garantizando densidades iguales o superiores al 95% del Proctor Modificado. Se recomienda complementar el proceso con ensayos de control de densidad y CBR para verificar la calidad obtenida.

Herramientas y equipos clave incluyen motoniveladoras, escarificadores, tanques de mezclado con agitadores, camiones cisterna con aspersores, roto cultivadores o estabilizadoras, rodillos de compactación y laboratorio de ensayo para verificar la relación de soporte y permeabilidad final del suelo tratado.

En algunos casos, se combina Terrasil con polímeros selladores para reforzar la impermeabilización de caminos rurales o zonas expuestas a lluvias intensas, ampliando así la vida útil del tratamiento. (Industries, 2020)

#### Ventajas

- Su aplicación como estabilizador químico, permite una superficie cohesionada y compacta.
- Mejora la tracción y confort de los vehículos que transitan.

- Aglomera las partículas de suelo, eliminando las nubes de polvo.
- Mejora las condiciones de seguridad, por mayor visibilidad.
- Importante disminución del material particulado, nocivo para las personas y la comunidad.
- Menores gastos de mantención, equipos, combustible y personal.
- Disminuye el costo de mantención en equipos y vehículos, por la menor incidencia del polvo en filtros, piezas móviles y rodamientos.
- Incrementa la capacidad de soporte.
- Disminuye los riesgos de proyección de áridos sueltos en la ruta, que pueden afectar a vehículos y personas.
- Impermeabiliza el suelo tratado, reduciendo las deformaciones y apozamiento de agua.

#### Usos básicos

- Caminos no pavimentados, con suelos finos a granulares
- Mejoramiento de caminos secundarios.
- Adecuada solución en áreas en que se requiere la Mitigación del polvo.

#### **2.1.6 Propiedades del suelo y de los aditivos para la estabilización**

Las propiedades del suelo son determinantes para definir la factibilidad de aplicar una técnica de estabilización y seleccionar el aditivo más adecuado. Entre las propiedades más relevantes para la estabilización de arcillas se destacan la granulometría, el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), el índice de plasticidad (IP), la capacidad de compactación y la relación de soporte California (CBR). Estas propiedades controlan la cohesión, la plasticidad y la permeabilidad del material. Los suelos arcillosos con alta plasticidad



tienden a presentar elevados índices de contracción y expansión volumétrica, lo que afecta la durabilidad de estructuras viales.

En el caso de la cal hidratada, su efectividad se relaciona directamente con la presencia de minerales reactivos como la caolinita y la montmorillonita. La cal reacciona con estos minerales, produciendo reacciones puzolánicas que generan cementación entre partículas, reduciendo la plasticidad y aumentando la resistencia a la compresión y la capacidad portante (Bell, 1996). Por su parte, Terrasil actúa modificando la superficie de las partículas del suelo mediante enlaces organosilano, creando una matriz hidrofóbica que disminuye la absorción de humedad y mejora la estabilidad volumétrica del suelo tratado. Así, la selección del aditivo se basa en la mineralogía del suelo, el contenido de arcillas expansivas, la plasticidad y la permeabilidad requerida para la obra.

#### **2.1.7 Resultados esperados de la estabilización con cal y Terrasil**

La estabilización con cal y Terrasil tiene como objetivo principal aumentar la resistencia del suelo, su capacidad de soporte y mejorar su durabilidad frente a condiciones climáticas adversas. La aplicación de cal permite la reducción del índice de plasticidad, un aumento significativo de la relación de soporte CBR y una disminución de la expansividad del suelo, los incrementos del CBR en suelos arcillosos tratados con cal pueden variar entre 100% y 300% respecto al suelo natural, dependiendo de la dosificación y las condiciones de curado.

Por su parte, el Terrasil, al generar un efecto impermeabilizante y cohesivo entre las partículas del suelo, logra reducir la permeabilidad y la absorción de agua, disminuyendo la susceptibilidad a la deformación por ciclos de humedad-sequía. Esto se traduce en un aumento de la capacidad de soporte y en la prolongación de la vida útil de las capas de subrasante o base tratadas.

#### **2.1.8 Análisis estadístico**

##### **2.1.8.1 Estadística descriptiva**

La estadística descriptiva tiene como función principal resumir y representar de manera clara los datos obtenidos en la investigación. Este tipo de estadística facilita la

comprensión inicial y la organización de la información antes de realizar análisis más profundos. Entre las medidas más comunes se encuentran las de tendencia central, como la media y la mediana. La media representa el promedio aritmético de los datos, calculado al sumar todos los valores y dividir entre la cantidad total de observaciones. Por otro lado, la mediana corresponde al valor que divide al conjunto de datos ordenados en dos partes iguales. (Sampieri, 2014)

Además, las medidas de dispersión, como la desviación estándar, indican el grado de variabilidad o dispersión que presentan los datos respecto a la media. La desviación estándar refleja, en promedio, cuánto se alejan los valores individuales del promedio general.

#### **2.1.8.2 Estadística inferencial**

La estadística inferencial permite extraer conclusiones sobre una población más amplia a partir de una muestra representativa. Este enfoque posibilita determinar si existen diferencias significativas entre grupos o tratamientos mediante pruebas de hipótesis, evaluar la fuerza y dirección de las relaciones entre variables por medio de análisis de correlación y regresión, así como estimar parámetros poblacionales basándose en datos muestrales. También es fundamental para evaluar la confiabilidad y validez de los resultados, considerando el margen de error y la significancia estadística. (Sampieri, 2014)

La validez se refiere al grado en que un instrumento mide efectivamente lo que se pretende medir, mientras que la confiabilidad indica la consistencia de los resultados obtenidos cuando un instrumento se aplica repetidamente bajo las mismas condiciones.

#### **2.1.8.3 Prueba de hipótesis**

Las pruebas de hipótesis consisten en plantear una hipótesis nula ( $H_0$ ), que generalmente postula la ausencia de diferencias o relaciones, y una hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que propone lo contrario. El nivel de significancia ( $\alpha$ ) representa la probabilidad máxima aceptable de cometer un error tipo I, es decir, rechazar  $H_0$  siendo verdadera. El valor p indica la probabilidad de obtener resultados iguales o más extremos que los observados, asumiendo que  $H_0$  es correcta.

Existen pruebas paramétricas, que requieren supuestos específicos sobre la distribución de los datos, como normalidad y homogeneidad (por ejemplo, la prueba t de Student y ANOVA), y pruebas no paramétricas, que no requieren tales supuestos (como las pruebas de Wilcoxon y Kruskal-Wallis).

### **2.1.9 Clasificación de suelos**

Cualquier proyecto de construcción, ya sea una carretera, un puente o un edificio, debe ser estudiado con todos sus datos completos, lo que implica tener un buen conocimiento del terreno de cimentación. El reconocimiento in situ es uno de los trabajos preliminares esenciales; para esto, uno de los métodos más confiables es la toma de muestras, lo más intactas posible.

Contamos con dos sistemas de clasificación bien elaborados para clasificar el suelo comúnmente en grupos y subgrupos, para propósitos de ingeniería; el Sistema Unificado de Clasificación del suelo (SUCS); el sistema de clasificación AASHTO usado para la construcción de carreteras y terraplenes o taludes.

#### **2.1.9.1 Clasificación de suelos AASHTO**

En el sistema AASHTO, los suelos pueden clasificarse según ocho (8) grupos principales A-1 a A-8, en base a su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos de los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso, mientras que los incluidos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son de grano fino. El grupo A-8, por su parte, incluye suelos como la turba, compostas orgánicas y otros suelos con alto contenido de materia orgánica, los cuales se identifican mediante inspección visual. La Tabla 2.1 muestra el cuadro que se emplea para aplicar el sistema AASTHO.

**Tabla 2.3** Clasificación de suelos AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares							Materiales limo - arcillosos													
	30% o menos pasa el tamiz N.º 200							Más del 30% pasa el tamiz N.º 200													
Grupos y subgrupos	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7											
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7										
Análisis																					
N.º 10 (2.00 mm)	50 máx.																				
N.º 40 (0.42 mm)	30 máx.										50 máx.		51 min.								
N.º 200 (0.074 mm)	15 máx.										25 máx.		10 máx.		35 máx.		35 máx.		35 máx.		36 min.
Caract. Del material																					
Límite líquido (LL)	-				-		40 máx.		41 min.		40 máx.		41 min.		40 máx.		41 min.				
Índice plasticidad (IP)	6 máx.				NP		10 máx.		10 máx.		11 min.		10 máx.		11 min.		11 min.				
Índice de grupo (IG)	0		0		0		0		0		4 máx.		8 máx.		12 máx.		16 máx.		20 máx.		
Tipo de material			Arena fina		Arena fina		Gravas y arenas					Suelos limosos		Suelos arcillosos							
Terreno de fundación			Excelente a bueno								Regular a malo										
Tasa general de los			De mediano a pobre																		
Para A-7, PL < LL-30																					

De acuerdo con el tamaño de las partículas que forman los suelos, la norma AASHTO M-145, los clasifica de la siguiente manera:

- Grava. - De un tamaño menor a 76.2mm (3") hasta el tamiz N° 10 (2mm).
- Arena Gruesa. - De un tamaño menor a 2mm hasta el tamiz N° 40 (0.425mm).
- Arena Fina. - De un tamaño menor a 0.425mm hasta el tamiz N° 200 (0.075mm).
- Limos y Arcillas. - Tamaños menores de 0.075mm. Este sistema es básicamente un sistema de clasificación de los diferentes tipos de suelos en 7 grupos, cada uno de estos grupos está determinado por ensayos de laboratorio, granulometría, límite líquido e índice de plasticidad.

$$IG = (F - 35)(0,2 + 0,005(LL - 40)) + 0,01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

IG = Índice de Grupo (Números enteros y si es negativo se informa igual a cero).

F = Porcentaje que pasa por 0.075 mm, expresado en números enteros.

LL = Límite Líquido.

IP = Índice de Plasticidad.

Los grupos están designados desde el A-1 hasta A-7, como se presenta en la Tabla 2.1; El suelo A-1, es un suelo de propiedades óptimas para ser usado en las capas que conforman la estructura de un pavimento y en su orden ascendente de numeración, su comportamiento va decreciendo hasta llegar al suelo A-7, cuya aplicación en carreteras no es recomendable.

#### **2.1.9.2 Clasificación de suelos SUCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System (USCS), fue presentado por Arthur Casagrande, usado 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 puede clasificar suelos con tamaños menores de tres (3) pulgadas; se representa mediante un símbolo con dos letras. (Braja, 2015)

Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso.
- Suelos de grano fino.
- Suelos orgánicos.

Los suelos de granos grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz N° 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los finos a los que lo pasan, de esta forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas de este son retenidas en el tamiz N° 200 y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.

- Suelos gruesos. - Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz N° 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.
- Suelos finos. - El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas y limos y arcillas orgánicas (O).

Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es  $Ll = 50\%$ .

Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (low compresibility).

Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compresibility).

Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML = Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL = Limos y arcillas orgánicas.

CL = Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH = Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH = Limos inorgánicos de alta compresibilidad.

OH = Arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.

**Tabla.2.4** Clasificación de suelos SUCS

Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos el 50% o más se retuvo en el tamiz N°200 (0.075 mm)	Grava < 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz N° 4 (4.75 mm)	Grava limpia menos del 5% pasa el tamiz N°200	GW	Grava bien graduada, grava fina a gruesa
			GP	Grava pobremente graduada
		Grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz N°200	GM	Grava limosa
			GC	Grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz N° 4	Arena limpia menos del 5% pasa el tamiz N°200	SW	Arena fina a gruesa
			SP	Arena pobremente graduada

		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz N°200	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino más del 50% de la muestra pasa el tamiz N° 200 (0.075 mm)	Limos y arcillas límite líquido < 50	inorgánico	ML	limo
			CL	arcilla
		Orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
	Limos y arcillas límite líquido ≥ 50	Inorgánico	Mh	Limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	Oh	Arcilla orgánica, limo orgánico
Suelos altamente orgánicos			P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos

**Fuente:** Fundamentos de ingeniería geotécnica (Braja, 2015)

Las equivalencias entre el sistema de clasificación AASHTO y el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), se pueden ver en la Tabla 2.5.



**Tabla 2.5** Relación de clasificación AASTHO-SUCS

Grupo del suelo en el sistema AASHTO	Comparación de los grupos de suelo en el sistema Unificado		
	Mas Probable	Posible	Posible pero improbable
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1-b	SW, SP, GM, SM	GP	—
A-3	SP	—	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	—	GW, GP, SW, SP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	—	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	—	SM, GM
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

**Fuente:** Norma AASHTO

### **2.1.10 Arcillas**

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste en un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados.

Desde el punto de vista geológico, se pueden distinguir entre primarias las cuales son de tipo hipogénico y que permanecieron en el mismo lugar de su formación, y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen.

- Fluviales. - Depositadas por ríos y siendo depósitos de baja calidad.
- Lacustres. - Asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad
- En deltas. - Son arenosas y de composición irregular.
- Glaciales. - Formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas.

#### **2.1.10.1 Características de las arcillas**

Material de estructura laminar.

Sumamente higroscópico.

Su masa se expande con el agua.

Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica.

Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600 °C.

### **2.1.11 Permeabilidad**

El grado de permeabilidad del suelo se relaciona con la velocidad a que penetra el agua en éste. Si, después de la compactación, un suelo de grano grueso presenta poros grandes continuos, el agua penetra con rapidez y se dice que su permeabilidad es alta. Los suelos de grano fino contienen poros muy pequeños continuos y en un suelo fino compactado de grava el agua penetrará muy lentamente y la permeabilidad será baja.

### 2.1.12 Compresibilidad

La compresibilidad es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Es mínima en los suelos de textura gruesa, que tienen las partículas en contacto. Aumenta a medida que crece la proporción de partículas pequeñas y llega al máximo en los suelos de grano fino que contienen materia orgánica.

Las arcillas son compresibles. Si se comprime una masa húmeda de arcilla, la humedad y el aire pueden ser expelidos, lo que trae como resultado una reducción de volumen que no se recupera inmediatamente cuando se elimina la carga. (FAO)

- Compresibilidad baja: LL inferior a 30.
- Compresibilidad media: LL de 30 a 50.
- Compresibilidad alta: LL superior a 50.

Según Bowles, la compresibilidad de suelos finos puede clasificarse como baja, media o alta en función del índice de compresibilidad  $C_c$ , siendo baja para valores menores a 0.20, media entre 0.20 y 0.40 y alta cuando supera 0.40.

**Tabla 2.6** Clasificación de la compresibilidad de suelos finos

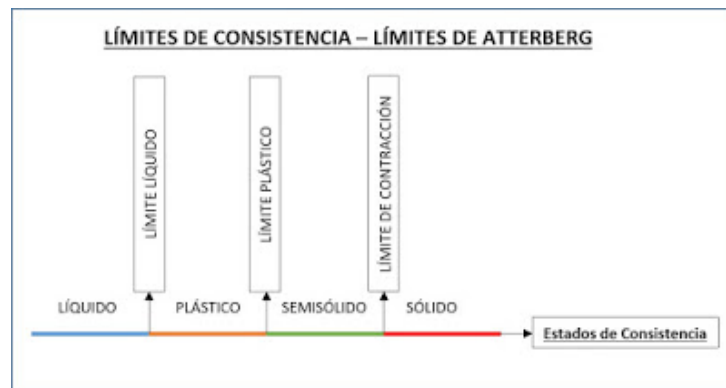
Índice de Compresibilidad ( $C_c$ )	Grado de Compresibilidad
$C_c < 0.20$	Baja
$0.20 \leq C_c \leq 0.40$	Media
$C_c > 0.40$	Alta

**Fuente:** Foundation Analysis and Design (Bowles, 1996)

### 2.1.13 Plasticidad

La plasticidad es una propiedad característica de los suelos finos, donde el contenido de humedad del suelo está comprendido entre el límite líquido y plástico. En este estado el suelo permite ser moldeado de manera similar a la masa o la plastilina, debido a que el contenido de humedad del suelo contiene la cantidad ideal de moléculas de agua para que la fuerza de atracción entre las partículas compuestas de minerales de arcilla sea la mayor.

**Figura 2.1** Límites de consistencia-límites de Atterberg



**Fuente:** Geotechnical Consulting (ABC, 2020)

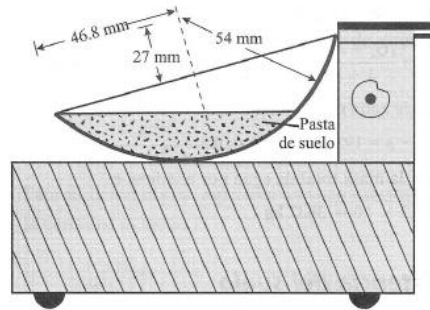
El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen también como límites de Atterberg. (Braja, 2015)

#### 2.1.13.1 Límite líquido (LL)

Se define como el contenido mínimo de agua en porcentaje en bases secas en las que el suelo cambia su estado de líquido a estado plástico.

Un diagrama esquemático (vista lateral) de un dispositivo para determinar el límite líquido se muestra en la figura 2.2, que consiste en una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba del límite líquido se coloca una pasta en la copa.

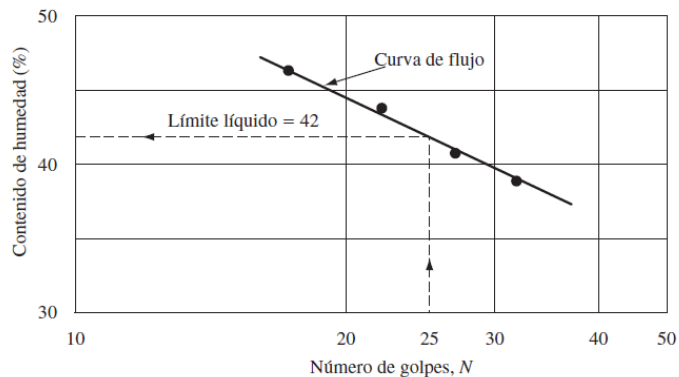
**Figura 2.2** Dispositivo Casagrande (vista lateral)



**Fuente:** Fundamentos de ingeniería geotécnica (Braja, 2015)

El procedimiento para la prueba de límite líquido dada en ASTM es la Designación ASTMD 4318. Es difícil ajustar el contenido de humedad en el suelo para satisfacer el cierre requerido de 12.7 mm de la ranura en la pasta de suelo con 25 golpes. Por lo tanto, al menos se realizan cuatro pruebas para el mismo suelo con un contenido variable de humedad para determinar el número de golpes  $N$ , que varía entre 15 y 35, necesario para lograr el cierre. El contenido de humedad del suelo en porcentaje y el correspondiente número de golpes se representan gráficamente en papel cuadrículado semilogarítmico. La relación entre el contenido de humedad y  $\log N$  es casi como una línea recta. Esto se conoce como curva de flujo. El contenido de humedad correspondiente a  $N = 25$ , determinado a partir de la curva de flujo, da el límite líquido del suelo. (Braja, 2015)

**Figura 2.3** Curva de flujo para la determinación del límite líquido de una arcilla limos



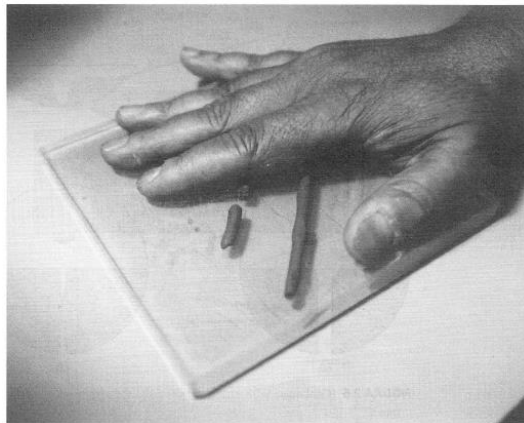
**Fuente:** Fundamentos de ingeniería geotécnica (Braja, 2015)

#### 2.1.13.2 Límite plástico (LP)

El límite plástico se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo al enrollarse en hilos de 3.2 mm de diámetro se desmorona. El límite plástico es el límite inferior del escenario plástico del suelo. La prueba es simple y se realiza mediante rodados repetidos por parte de una masa de tierra de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado.

El procedimiento para la prueba de límite plástico se da en la norma ASTM, Designación ASTM D-4318.

**Figura 2.4** Prueba de limite plástico



**Fuente:** Fundamentos de ingeniería geotécnica (Braja, 2015)

#### 2.1.14 Compactación

En la construcción de terraplenes, carreteras y otras obras de ingeniería, la compactación de suelos sueltos es esencial para aumentar su peso específico y mejorar su resistencia, lo que eleva la capacidad de carga de las cimentaciones y reduce asentamientos indeseables. Además, incrementa la estabilidad de taludes. El control de calidad posterior a la compactación es fundamental para garantizar que se cumplan los objetivos proyectados, especialmente en proyectos ejecutados por contratistas, donde este control puede tener implicaciones técnicas, legales y contractuales. Evaluar propiedades como resistencia, compresibilidad, permeabilidad y relaciones esfuerzo-deformación requiere ensayos específicos y de alto costo, lo que destaca la importancia de una correcta ejecución y supervisión de la compactación. (Olivera Bustamante, 2009)

**Tabla 2.7** Especificaciones para prueba de Proctor estándar

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,075 pie <sup>3</sup> (2124 cm <sup>3</sup> )
Peso del pisón	5,5 lb (2,5 kg)	5,5 lb (2,5 kg)	5,5 lb (2,5 kg)
Altura de caída del pisón	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	12400 pie.lb/pie <sup>3</sup> (600 N/m <sup>3</sup> )	12400 pie.lb/pie <sup>3</sup> (600 N/m <sup>3</sup> )	12400 pie.lb/pie <sup>3</sup> (600 N/m <sup>3</sup> )
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm),	Porción que pasa la malla 3/4 pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla 3/4 pulg (19,0 mm).

**Fuente:** “Principios de ingeniería de cimentaciones”, (Braja, 2015)

**Tabla 2.8** Especificaciones para prueba de Proctor modificada (ASTM D 1557-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,075 pie <sup>3</sup> (2124 cm <sup>3</sup> )
Peso del pisón	10 lb (4,54 kg)	10 lb (4,54 kg)	10 lb (4,54 kg)
Altura de caída del pisón	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	3
Energía de compactación	56000 pie.lb/pie <sup>3</sup> (270 N/m <sup>3</sup> )	56000 pie.lb/pie <sup>3</sup> (270 N/m <sup>3</sup> )	56000 pie.lb/pie <sup>3</sup> (270 N/m <sup>3</sup> )
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm),	Porción que pasa la malla ¾ pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla ¾ pulg (19,0 mm).

**Fuente:** “Principios de ingeniería de cimentaciones”, (Braja, 2015)



#### **2.1.14.1 Variables que afectan el proceso de compactación de los suelos**

Es natural que un suelo pueda compactarse de diversas maneras, obteniendo resultados diferentes en cada caso; además, un mismo método de compactación producirá distintos resultados según el tipo de suelo al que se aplique. Asimismo, si se aplica el mismo método de compactación a un suelo específico, se pueden obtener resultados muy distintos al variar ciertas condiciones del suelo. Estas afirmaciones conducen a la conclusión, evidente para cualquiera con experiencia en estos temas, de que los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores: algunos relacionados con el tipo de suelo, otros con el método de compactación utilizado y, finalmente, otros más con las condiciones específicas prevalecientes en el suelo en ese momento.

Estos factores se conocen como las variables que influyen en el proceso de compactación. A continuación, se describen las principales de ellas.

- La naturaleza del suelo. - Es evidente que el tipo de suelo con el que se trabaja influye de manera crucial en el proceso de compactación. A lo largo de este capítulo, se diferenciarán las técnicas utilizadas y los resultados obtenidos basándose en el tipo de suelo. Aunque sigue siendo común distinguir entre suelos finos y gruesos, o entre suelos arcillosos y fricciones, en el análisis de los procesos de compactación, esta distinción suele ser más detallada, clasificando los suelos según las normas establecidas.
- El método de compactación. - En el laboratorio, es bastante sencillo clasificar los métodos de compactación en tres tipos bien diferenciados: compactación por impactos, por amasado y por aplicación de carga estática. Aunque se detallarán más estos métodos posteriormente, es suficiente afirmar que producen resultados diferentes tanto en la estructura del suelo como en las propiedades del material compactado. Además, ya se están empezando a utilizar dispositivos de laboratorio para compactar por vibración, aunque su uso no es tan común como el de los otros tres métodos. Diferenciar los métodos de compactación en campo de manera similar es más complicado. Estos métodos suelen describirse según el equipo mecánico utilizado, como compactación con rodillo liso, rodillo neumático,

equipo vibratorio, etc. Se supone que los métodos de laboratorio replican las condiciones del campo, pero en muchos casos no es fácil establecer una correspondencia clara entre el trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, en el sentido de que estas últimas reproduzcan de manera suficientemente representativa todas las condiciones del suelo compactado en el campo.

- La energía específica. - La energía específica de compactación se refiere a la energía entregada al suelo por unidad de volumen durante el proceso mecánico correspondiente. En el laboratorio, es bastante fácil evaluar la energía específica cuando se compacta el suelo mediante impactos con un pisón; en este caso, la expresión para calcularla es clara. En pruebas de laboratorio donde se utiliza presión estática para compactar el suelo, la energía específica puede evaluarse de manera similar considerando el tamaño del molde, el número de capas del suelo, la presión aplicada a cada capa y el tiempo de aplicación. Sin embargo, en este caso, la evaluación se complica debido a la deformabilidad del suelo y al tiempo de aplicación de la presión. Evaluar la energía específica en pruebas de compactación por amasado es aún más complejo, ya que cada capa de suelo en el molde se compacta mediante un cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que genera presiones gradualmente desde cero hasta un valor máximo, seguido por una descarga. La energía de compactación no se puede cuantificar de manera sencilla, pero puede variarse a voluntad modificando la presión de apisonado, el número de capas, el número de aplicaciones del pisón por capa, el área del pisón o el tamaño del molde.
- El contenido de agua del suelo. - Los primeros estudios de Proctor revelaron que el contenido de agua del suelo es una variable fundamental en el proceso de compactación. Proctor observó que, al aumentar el contenido de agua desde valores bajos, se obtenían mayores pesos específicos secos para el material compactado, usando la misma energía de compactación. Sin embargo, esta tendencia no se mantiene indefinidamente, ya que, al sobrepasar un cierto nivel de humedad, los pesos específicos secos disminuyen. Proctor demostró que para un suelo dado y un procedimiento de compactación específico, existe un contenido

de agua óptimo que produce el máximo peso volumétrico seco posible con ese método. En un proceso de compactación en campo, este contenido de agua es óptimo para el equipo y la energía utilizados. Esto se puede explicar en términos generales considerando que, en suelos arcillosos finos, con bajos contenidos de agua, ésta se encuentra en forma capilar, generando compresiones entre las partículas del suelo que forman grumos difíciles de desintegrar, lo que dificulta la compactación. Al aumentar el contenido de agua, se reduce la tensión capilar y el aglutinamiento de grumos, incrementando así la eficiencia de la energía de compactación.

- El sentido en que se recorre la escala de humedades durante la compactación. - Este aspecto es especialmente relevante en las pruebas de compactación realizadas en el laboratorio, donde los resultados suelen presentarse en gráficas de peso volumétrico seco ( $Y_d$ ) versus humedad ( $W$ ). Estas curvas difieren si las pruebas se inician con un suelo relativamente seco al que se le va añadiendo agua, o con un suelo húmedo que se va secando a medida que avanza la prueba. Las investigaciones experimentales demuestran que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para el mismo suelo y con los mismos contenidos de agua; este efecto es particularmente notable en suelos finos y plásticos con contenidos de agua inferiores al óptimo. La posible explicación es que, cuando se agrega agua a un suelo seco, esta tiende a permanecer en la periferia de los grumos, penetrando en ellos solo con el tiempo. En contraste, cuando el agua se evapora de un suelo húmedo, la humedad superficial de los grumos disminuye más rápido que la interna. Así, en ambos casos, aunque el contenido de humedad sea el mismo, las condiciones dentro de los grumos son diferentes; en el primer caso, la presión capilar entre los grumos es menor debido al exceso de agua, mientras que en el segundo caso, la evaporación aumenta los meniscos y, por tanto, la presión capilar. Como resultado, en el primer caso, la cohesión entre los grumos es menor, lo que hace que la misma energía de compactación sea más efectiva en comparación con el segundo caso. Estos razonamientos también dependen del tiempo transcurrido entre la adición de agua y la aplicación de la energía de compactación; un intervalo más largo permite una distribución uniforme del agua

en los grumos del suelo, reduciendo la humedad superficial y aumentando las presiones capilares. Además, el contenido de sales y la naturaleza de la arcilla también influyen. En los laboratorios, es común iniciar con un suelo relativamente seco, agregar agua durante la prueba y permitir un tiempo suficiente para la distribución uniforme del agua (aproximadamente 24 horas) antes de aplicar la compactación.

- La recompactación. - En numerosos laboratorios, es una práctica común reutilizar la misma muestra de suelo. (Olivera Bustamante, 2009)

### **2.1.15 Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR)**

El ensayo de Relación de Soporte de California (CBR, por sus siglas en inglés California Bearing Ratio) es un método ampliamente aceptado para evaluar la resistencia y capacidad portante de suelos utilizados como subrasante, subbase o base en estructuras de pavimento y plataformas. Fue desarrollado inicialmente por el Departamento de Transporte de California en 1929 como un procedimiento comparativo que permite estimar la capacidad del suelo para soportar cargas, correlacionándolo con materiales de referencia estandarizados. (Braja, 2015)

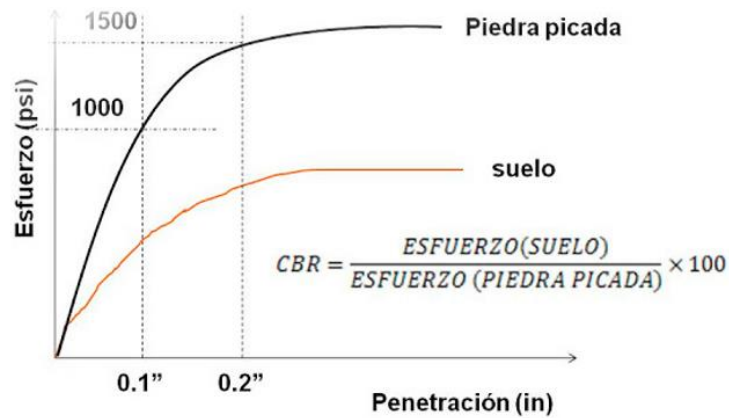
De acuerdo con la norma ASTM D1883-14 (Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils), el ensayo se basa en medir la presión necesaria para introducir un pistón cilíndrico estándar de 19.35 mm de diámetro en la muestra de suelo compactada a una velocidad constante de penetración de 1.27 mm/min, hasta profundidades de 2.5 mm (0.1”) y 5 mm (0.2”). La relación se obtiene comparando la carga unitaria desarrollada por el suelo de prueba con la carga unitaria requerida para una grava triturada de alta calidad en condiciones estándares.

Este índice se expresa como un porcentaje y es utilizado para:

- Clasificar la calidad de subrasantes y capas granulares.
- Seleccionar espesores de diseño de pavimentos flexibles mediante métodos empíricos o semiempíricos.

- Determinar la capacidad de soporte para plataformas o terraplenes de estructuras civiles. (Bowles, 1996)

**Figura 2.5** Grafica esfuerzo vs penetración



**Fuente:** <https://www.geotechtips.com/post/que-es-el-cbr> (Sánchez-Leal, 2018)

En campo, el ensayo puede realizarse directamente sobre la subrasante preparada usando la variante CBR de campo (ASTM D4429), mientras que en laboratorio se trabaja con muestras compactadas a densidad y contenido de humedad óptimos determinados mediante ensayos Proctor (ASTM D1557).

El CBR está estrechamente ligado a parámetros como la plasticidad, granulometría y grado de saturación del suelo, factores que determinan su comportamiento mecánico. Por ello, la mejora del CBR mediante estabilización con aditivos como cal y Terrasil cobra especial relevancia en suelos arcillosos, dado que su estructura y plasticidad afectan notablemente su capacidad portante.

Pese a sus limitaciones, el CBR sigue siendo un método práctico y económico para estudios preliminares de diseño de pavimentos, y por ello se considera adecuado para validar la efectividad de técnicas de estabilización química.

**Tabla 2.9** Valores referenciales de CBR, usos y suelos.

			Sistema de clasificación	
No. CBR	Clasificación general	Usos	Unificado	AASHTO
0 – 3	Muy pobre	Sub rasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3 – 7	Muy pobre a regular	Sub rasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7 – 20	Regular	Sub base	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A6,A7
20 – 50	Bueno	Sub base y base	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A-1b,A2-5,A-3,A2-6
> 50	Excelente	Base	GW,GM	A1a,A2-4,A-3

**Fuente:** (Chang Chang, 2019)

## 2.2 Marco referencial

Diego Israel Rodríguez Vinces ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA COMPACTACIÓN Y HUMEDAD DE LA SUBRASANTE NATURAL Y LA SUBRASANTE UTILIZANDO PRODUCTOS QUÍMICOS BIODEGRADABLES (TERRASIL), DE LA VÍA ECOLÓGICA DEL CANTÓN QUEVEDO, PROVINCIA DE LOS RÍOS – 2016, con el objetivo de analizar la subrasante por medio de la inclusión del material TERRASIL, como material alternativo para el mejoramiento de la misma.

Uno de los complementos que es objeto de estudio en los últimos años, es la aplicación del material bioquímico llamado Terrasil. El aditivo Terrasil es un material biodegradable

amigable con el medio ambiente que después de una mezcla con el suelo a tratar proporcionará un 60% y 90% de compactación. La aplicación de este Bioquímico tendrá la capacidad de brindar un suelo capaz de repeler el agua evacuando ésta en forma de evaporización.

Según investigaciones, para que el Terrasil tenga una buena compactación con el suelo a tratar se deberá realizar una escarificación, hidratación y finalmente compactación, también es aconsejable realizar un breve regado al final de que se haya compactado para así tener un suelo óptimo para el tránsito vehicular.

Se determina que, con el producto utilizado para el mejoramiento, la capacidad portante del suelo aumenta el 14% después de 7 días realizado el ensayo, la humedad disminuye en un 27.86% luego de 7 días realizado el ensayo, se concluye que trabajar con material pétreo para mejorar la vía es más costoso que con el producto ya que se elimina el rubro transporte del material.

Aleluya Paye Magaly ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LATERICOS DE SUBRRASANTE UTILIZANDO EL PRODUCTO QUIMICO BIODEGRADABLE "TERRASIL" EN EL TRAMO CARRETERO RURRENABAQUE – RIBERALTA, Considerando que alrededor de la carretera Rurrenabaque – Riberalta existe material de suelo laterítico, que mayormente es desechado por no cumplir los requerimientos técnicos solicitados por la ABC (Especificaciones Técnicas) para su empleo, se plantea el empleo del aditivo Terrasil para mejorar sus propiedades.

Se realizó el análisis técnico para la estabilización del suelo laterítico en estudio, de esa manera se verifico que puede utilizarse en la conformación de subrasante, esto tomando como parámetro principal los valores del ensayo de CBR; los cuales para un suelo natural presentaron un valor de 5.4 %, posteriormente se utilizó el aditivo Terrasil en dosificaciones de 0,5%, 0,7 y 1,00 obteniendo valores de 24%, 54% y 60% respectivamente, lo que indica un incremento de 444,44%, 1000,00% y 1111,11 % respectivamente por lo que se concluye que el suelo laterítico combinado con el aditivo Terrasil llega a cumplir de sobre manera con las especificaciones técnicas requeridas.

### 2.3 Marco normativo

En la elaboración del proyecto tenemos diferentes ensayos con su correcta elaboración según normas.

**Tabla 2.10** (Parte 1). Marco normativo

Ensayo	Objeto	Norma
Contenido de humedad	El que el contenido de humedad se determina a partir del cambio de peso de la muestra después de la evaporación del agua absorbida	ASTM D2216
Análisis granulométrico por tamizado	El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo	ASTM D6913 AASHTO T88
Determinación del límite líquido	El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el plástico	ASTM D4318 AASHTO T89
Determinación del límite plástico en índice de plasticidad	En este ensayo se determina el límite plástico de un suelo, y el cálculo del índice de plasticidad si se conoce el límite líquido del mismo suelo.	ASTM D4318 AASHTO T90

**Fuente:** Elaboración propia



**Tabla 2.11** (Parte 2). Marco normativo

Ensayo	Objeto	Norma
Ensayo de compactación método (Proctor modificado)	Estos métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado con un martillo	ASTM D 1557-91 AASHTO T180
Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y las capas de base, subbase y de afirmado, él ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad; pero también puede operarse	ASTM D1883 AASHTO T193

**Fuente:** Elaboración propia

## 2.4 Marco referencial

Diego Israel Rodríguez Vínecs ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA COMPACTACIÓN Y HUMEDAD DE LA SUBRASANTE NATURAL Y LA SUBRASANTE UTILIZANDO PRODUCTOS QUÍMICOS BIODEGRADABLES (TERRASIL), DE LA VÍA ECOLÓGICA DEL CANTÓN QUEVEDO, PROVINCIA DE LOS RÍOS – 2016, con el objetivo de analizar la subrasante por medio de la inclusión del material TERRASIL, como material alternativo para el mejoramiento de la misma.

Uno de los complementos que es objeto de estudio en los últimos años, es la aplicación del material bioquímico llamado TerraSil. El aditivo TerraSil es un material biodegradable amigable con el medio ambiente que después de una mezcla con el suelo a tratar proporcionará un 60% y 90% de compactación. La aplicación de este Bioquímico tendrá

la capacidad de brindar un suelo capaz de repeler el agua evacuando ésta en forma de evaporización .

Según investigaciones, para que el TerraSil tenga una buena compactación con el suelo a tratar se deberá realizar una escarificación, hidratación y finalmente compactación, también es aconsejable realizar un breve regado al final de que se haya compactado para así tener un suelo óptimo para el tránsito vehicular.

Se determina que, con el producto utilizado para el mejoramiento, la capacidad portante del suelo aumenta el 14% después de 7 días realizado el ensayo, la humedad disminuye en un 27.86% luego de 7 días realizado el ensayo, se concluye que trabajar con material pétreo para mejorar la vía es más costoso que con el producto ya que se elimina el rubro transporte del material.

Aleluya Paye Magaly ESTABILIZACION DE SUELOS LATERICOS DE SUBRRASANTE UTILIZANDO EL PRODUCTO QUÍMICO BIODEGRADABLE "TERRASIL" EN EL TRAMO CARRETERO RURRENABAQUE – RIBERALTA, Considerando que alrededor de la carretera Rurrenabaque – Riberalta existe material de suelo laterítico, que mayormente es desechado por no cumplir los requerimientos técnicos solicitados por la ABC (Especificaciones Técnicas) para su empleo, se plantea el empleo del aditivo Terrasil para mejorar sus propiedades.

Se realizó el análisis técnico para la estabilización del suelo laterítico en estudio, de esa manera se verifico que puede utilizarse en la conformación de subrasante, esto tomando como parámetro principal los valores del ensayo de CBR; los cuales para un suelo natural presentaron un valor de 5.4 %, posteriormente se utilizó el aditivo TERRASIL en dosificaciones de 0,5%, 0,7 y 1,00 obteniendo valores de 24%, 54% y 60% respectivamente, lo que indica un incremento de 444,44%, 1000,00% y 1111,11 % respectivamente por lo que se concluye que el suelo laterítico combinado con el aditivo Terrasil llega a cumplir de sobre manera con las especificaciones técnicas requeridas.

## 2.5 Análisis del aporte técnico

El presente trabajo de investigación surge del interés personal y técnico por comprender y aplicar tecnologías emergentes en el mejoramiento de suelos, con especial atención a la realidad geotécnica de la ciudad de Tarija, donde predominan los suelos arcillosos de baja a media compresibilidad. La elección del tema se originó a partir de una exploración del área temática de interés, centrada en la interacción de suelos con comportamiento problemático y aditivos químicos estabilizantes, motivada por la necesidad de proponer soluciones más eficientes, sostenibles y económicamente viables para obras de infraestructura local.

La curiosidad inicial nació con el conocimiento del aditivo Terrasil, un producto innovador y poco convencional en Bolivia, cuyo potencial para modificar la plasticidad, reducir la permeabilidad y mejorar la capacidad de soporte de suelos arcillosos resulta prometedor. La idea de complementarlo con cal hidratada un estabilizante ampliamente validado por décadas de uso y evidencia científica se fortaleció tras revisar investigaciones previas y resultados de laboratorio que respaldan su efectividad individual.

La selección y estructura del marco teórico respondieron a criterios de aplicabilidad práctica y relevancia técnica. Se priorizaron conceptos esenciales como la clasificación de suelos (SUCS y AASHTO), la determinación de propiedades como plasticidad, compresibilidad y permeabilidad, el proceso de compactación y, especialmente, la Relación de Soporte de California (CBR) como parámetro clave.

El marco referencial se complementó con estudios recientes y contextos comparables, como los trabajos de Rodríguez Vincés (2016) y Paye Magaly (2019), quienes documentaron incrementos significativos del CBR, mejoras en la compactación y reducción de la humedad en suelos naturales y lateríticos mediante la aplicación de Terrasil. Estos antecedentes internacionales permiten validar la pertinencia de replicar ensayos con condiciones similares en Tarija.

En cuanto al marco normativo, se seleccionaron normas técnicas ampliamente aceptadas, principalmente de la ASTM y AASHTO, como la ASTM D1883 para CBR, ASTM D4318 para límites de Atterberg y ASTM D1557 para ensayos de compactación (Proctor

modificado). Estas normas aseguran la reproducibilidad de los ensayos, la calidad de los resultados y su comparabilidad con estudios similares a nivel regional y global.

En conjunto, este análisis evidencia que el aporte técnico de la investigación no solo reside en la aplicación práctica de conceptos geotécnicos consolidados, sino también en la apertura a tecnologías innovadoras como Terrasil, integradas de manera coherente con la cal para optimizar su desempeño. De esta forma, el trabajo aspira a generar resultados que respondan de manera efectiva a la problemática local de suelos arcillosos en Tarija, y contribuyan como referencia para futuras investigaciones o aplicaciones de campo.

**CAPÍTULO III**

**RELEVAMIENTO DE**

**INFORMACIÓN**

## CAPÍTULO III

### RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

#### 3.1 Recopilación de información

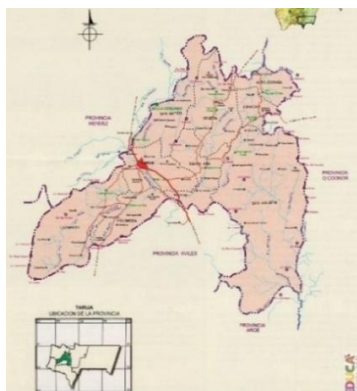
##### 3.1.1 Introducción

Se presenta el relevamiento de información necesario para la investigación sobre la aplicación de cal y el aditivo Terrasil en suelos arcillosos de baja a media compresibilidad. El muestreo se realizó siguiendo rigurosamente las normativas vigentes para asegurar la integridad de las muestras. Se recolectaron muestras de diferentes barrios de la ciudad de Tarija, abarcando un total de 32 ubicaciones. Estas muestras fueron agrupadas en cinco grupos significativos, permitiendo una representación adecuada de las diversas características de los suelos de la región. Los ensayos correspondientes, incluyendo el ensayo CBR, se llevaron a cabo para evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados y proporcionar datos cruciales para analizar la mejora en la estabilización del suelo.

##### 3.2 Delimitación de la zona de muestreo

El presente proyecto se realizará con muestras extraídas del Departamento de Tarija, más específicamente de la provincia Cercado, de sus diferentes barrios.

**Figura 3.1** Mapa de la provincia Cercado Tarija



**Fuente:** <https://www.educa.com.bo/geografia/provincia-cercado-tarija-mapa>  
(educa, s.f.)

Debido a la predominancia de suelos arcillosos en los diversos barrios que conforman la provincia Cercado, se hace imprescindible la recolección de muestras de suelo de diferentes áreas.

### 3.2.1 Coordenadas geográficas de las zonas de extracción de muestras

A continuación, se presentará los barrios de extracción de muestra.

**Tabla 3.1** (Parte 1). Barrios de muestreo.

Muestra	Barrio	Distrito	Coordenadas	
S-1	Barrio Jesús de Nazaret	Distrito -	21°30'37.95"	S
			64°41'39.87"	W
S-2	Barrio Miraflores	Distrito 12	21°33'09.16"	S
			64°43'47.72"	W
S-3	Barrio Pampa La Castilla	Distrito 13	21°33'15.33"	S
			64°44'56.02"	W
S-4	Barrio Carlos Wagner	Distrito 6	21°30'10.64"	S
			64°45'12.23"	W
S-5	Barrio San Mateo Centro	Distrito -	21°29'28.40"	S
			64°44'41.90"	W
S-6	Barrio Urbanización Los Ceibos	Distrito -	21°33'59.78"	S
			64°44'33.33"	W
S-7	Barrio Oscar Zamora	Distrito 7	21°29'58,00"	S
			64°44'14.60"	W
S-8	Barrio Catedral	Distrito -	21°33'00.00"	S
			64°45'49.96"	W
S-9	Barrio San Jorge I	Distrito 10	21°33'09.95"	S
			64°42'05.58"	W
S-10	Barrio María de los Ángeles	Distrito 7	21°30'46,90"	S
			64°44'15.06"	W
S-11	Barrio San Bernardo	Distrito 9	21°31'27.17"	S
			64°43'25.78"	W

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.1** (Parte 2). Barrios de muestreo.

Muestra	Barrio	Distrito	Coordenadas	
S-12	Barrio Lourdes	Distrito 8	21°30'34.77"	S
			64°43'28.69"	W
S-13	Barrio Eduardo Avaroa	Distrito 8	21°31'12.47"	S
			64°43'53.93"	W
S-14	Barrio Nueva Esperanza	Distrito -	21°29'40.60"	S
			64°44'39.50"	W
S-15	Barrio Los Chapacos	Distrito 7	21°30'41.10"	S
			64°42'56.60"	W
S-16	Barrio Unión	Distrito 6	21°30'27.70"	S
			64°45'10.71"	W
S-17	Barrio La Cañada	Distrito -	21°29'31.60"	S
			64°44'33.90"	W
S-18	Barrio German Bush	Distrito 12	21°32'36.14"	S
			64°44'11.33"	W
S-19	Barrio Natividad	Distrito -	21°33'12.08"	S
			64°40'12.04"	W
S-20	Barrio Reyes	Distrito -	21°32'50.26"	S
			64°40'00.09"	W
S-21	Barrio 1 de Mayo	Distrito 9	21°30'48.39"	S
			64°42'46.98"	W
S-22	Barrio Los Laureles	Distrito -	21°30'09.59"	S
			64°42'38.90"	W
S-23	Barrio Verde Olivo	Distrito -	21°33'14.80"	S
			64°40'18.60"	W
S-24	Barrio 24 de Junio	Distrito -	21°30'19.76"	S
			64°43'34.27"	W
S-25	Barrio El Portillo	Distrito 10	21°35'47.62"	S
			64°38'39.55"	W

**Fuente:** Elaboración propia



**Tabla 3.1** (Parte 3). Barrios de muestreo.

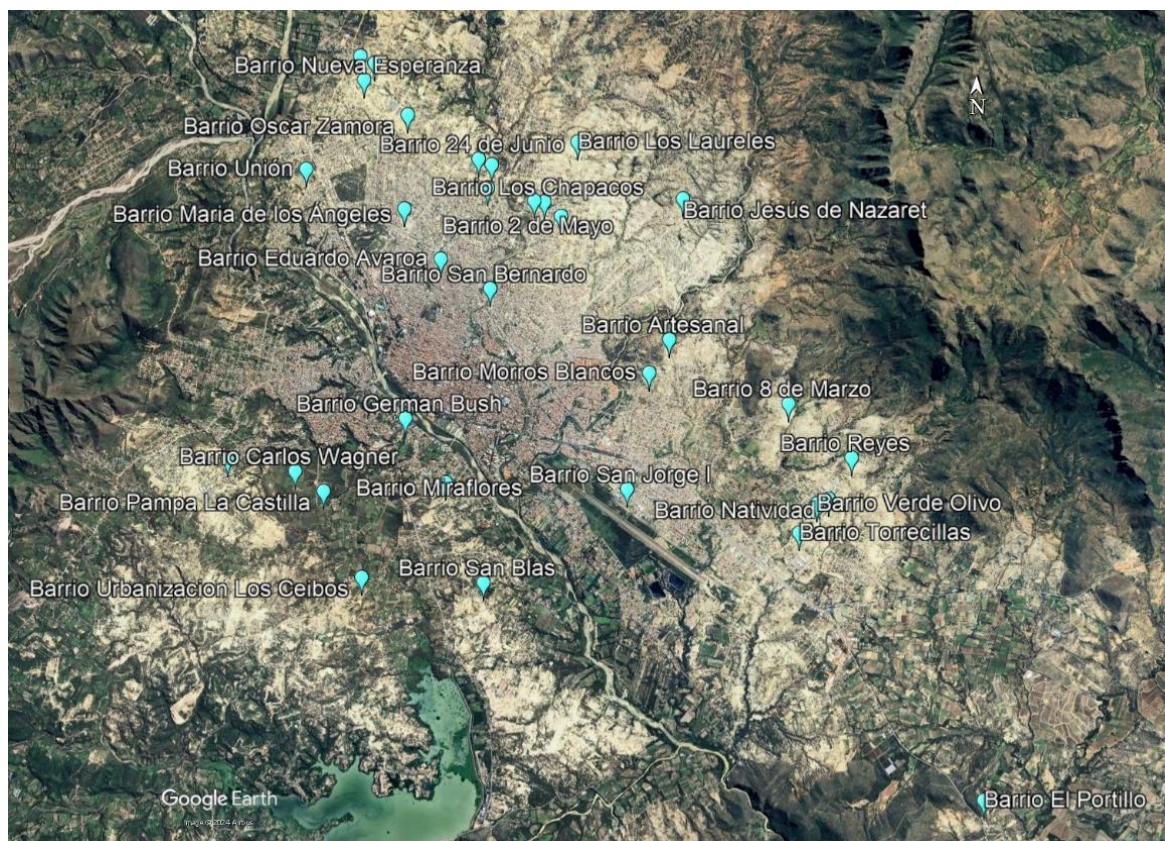
Muestra	Barrio	Distrito	Coordenadas	
S-26	Barrio 8 de Marzo	Distrito -	21°32'22.90"	S
			64°40'36.40"	W
S-27	Barrio Jerusalén	Distrito -	21°30'22,50"	S
			64°43'26,80"	W
S-28	Barrio 2 de Mayo	Distrito 9	21°30'40,60"	S
			64°43'02,30"	W
S-29	Barrio Artesanal	Distrito 10	21°31'51.20"	S
			64°41'44.40"	W
S-30	Barrio Torrecillas	Distrito 10	21°33'30,35"	S
			64°40'28,08"	W
S-31	Barrio San Blas	Distrito 12	21°34'00.91"	S
			64°43'24.93"	W
S-32	Barrio Morros Blancos	Distrito 10	21°32'08.83"	S
			64°41'55.11"	W

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2 Mapa satelital de la zona de extracción de muestras del suelo

A continuación, se muestran imágenes satelitales de las zonas de extracción de muestras.

**Figura 3.2** Mapa de la provincia Cercado Tarija



**Fuente:** Google Earth Pro

## 3.3 Criterios de diseño metodológico

### 3.3.1 Unidades de estudio y decisión muestral

#### 3.3.1.1 Unidad de estudio

El ensayo de laboratorio de suelos.

#### 3.3.1.2 Población

Son N = todos los ensayos de laboratorio de suelos para la investigación.

### **3.3.1.3 Muestra**

La muestra corresponde a un grupo seleccionado de ensayos de laboratorio, tomados de la población total, organizados en grupos estratificados.

### **3.3.2 Selección de las técnicas de muestro**

Para la preparación de las muestras se aplicó la técnica S0204, basada en la preparación en seco según ASTM D421, ASTM D2217 y AASHTO T87. Este método consiste en secar completamente las muestras de suelo al aire o en horno a una temperatura máxima de 38 °C, desmenuzar los terrones con mortero y pisón forrado en caucho, y finalmente obtener una muestra representativa mediante el método de cuarteo S0202.

### **3.3.3 Tamaño de muestra**

Para el cálculo del tamaño de la muestra será tomado el siguiente cálculo y análisis previos:

- Los ensayos tienen diferentes características entre sí, pero se los puede clasificar en grupos homogéneos o estratos y aplicar el muestreo estratificado.
- La población es finita  $N = 151$  ensayos y por la cantidad tiene un comportamiento de la distribución normal.
- Una investigación es exigente y por lo menos se tiene que establecer como nivel de confianza  $NC = 95\%$ , de acuerdo a ello la variable estandarizada es  $Z = 1,96$
- El margen de error es:  $e = 5 \%$ , deducido por el nivel de confianza que propone el investigador.
- Por el corto tiempo establecido para la tarea corresponde a un tiempo de 4 meses, se puede asumir una varianza de  $\sigma^2 = 0.10$ .

**Tabla 3.2** Ecuaciones para el cálculo del tamaño de la muestra

Tipo de población	Para medias poblacionales	Para proporciones poblacionales
Población infinita (muestreo aleatorio)	$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{e^2}$	$n = \frac{Z^2 pq}{e^2}$
Población finita (muestreo aleatorio)	$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{(N - 1)e^2 + Z^2 \sigma^2}$	$n = \frac{Z^2 Npq}{(N - 1)e^2 + Z^2 pq}$
Población finita (muestreo estatificación)	$n = \frac{\sum_{i=0}^n Ni \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=0}^n Ni \sigma^2}{N}}$	$n = \frac{\sum_{i=0}^n Ni pq}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=0}^n Ni pq}{N}}$

**Fuente:** Elaboración propia

Realizando la planilla de ajuste del número de ensayos se tiene:

**Tabla 3.3** (Parte 1). Planilla de ajuste de números de ensayos

Tipos	Etapas	Ensayo	Ni	$\sigma^2$	Ni $\sigma^2$	fi	ni
Suelo natural	Caracterización	Contenido de humedad	32	0,10	3,2	0,212	17,0
		Granulometría	32	0,10	3,2	0,212	17,0
		Límites de atterberg Suelo	32	0,10	3,2	0,212	17,0
		Compactación T-180	5	0,10	0,5	0,033	3,0
Suelo natural tratado	Caracterización	Contenido de humedad	15	0,10	1,5	0,099	8,0
		Compactación T-180	15	0,10	1,5	0,099	8,0

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.3** (Parte 2). Planilla de ajuste de números de ensayos

<b>Tipos</b>	<b>Etapas</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Ni</b>	$\sigma^2$	Ni $\sigma^2$	fi	ni
Suelo natural	Pruebas preliminares	Ensayo CBR Suelo	5	0,10	0,5	0,033	3,0
Suelo natural tratado	Pruebas preliminares	Ensayo CBR Suelo + Terrasil + Cal	15	0,10	1,5	0,099	8,0
Sumatoria			151		15,1		81,0

**Fuente:** Elaboración propia

Remplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$n = \frac{\sum_{i=0}^n Ni \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=0}^n Ni \sigma^2}{N}}$$

$$n = \frac{8}{151 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{15,1}{151}}$$

$$n = 76,160 \text{ ensayos}$$

$$n = 77 \text{ ensayos}$$

Considerando un total inicial de 151 ensayos planificados, se determinó que se requiere una base mínima de 77 ensayos para alcanzar un nivel de confianza del 95%. No obstante, tras realizar el análisis estadístico, se estableció que es necesario ejecutar aproximadamente 81 ensayos distribuidos en un periodo de cuatro meses.

### 3.4 Caracterización del suelo

Se seleccionaron suelos tipo CL (arcillas de baja a media compresibilidad según SUCS), provenientes de distintos barrios de la provincia Cercado, Tarija. La caracterización se realizó conforme a normas técnicas, garantizando la integridad de las muestras. Se aplicaron procedimientos de preservación, transporte y reducción de muestras conforme

a ASTM D4220 y AASHTO T248, asegurando su representatividad. La metodología incluyó recolección en campo con protección de la humedad natural y estructura del suelo, así como reducción controlada mediante cuarteadores.

**Figura 3.3** Extracción de muestra barrio 24 de Junio



**Fuente:** Elaboración propia

Para conocer las condiciones del subsuelo, se realizaron pozos a cielo abierto que permitieron observar los estratos y tomar muestras representativas. El suelo extraído se almacenó en bolsas herméticas para conservar su humedad natural. En el caso de muestras inalteradas, se tallaron bloques de suelo, se protegieron con manta impermeable y parafina para evitar la pérdida de humedad. Se recolectaron alrededor de 50 kg de material por punto para realizar todos los ensayos de laboratorio requeridos.



**Figura 3.4** Extracción de muestra barrio Torrecillas



**Fuente:** Elaboración propia

Las muestras se almacenaron en un espacio cubierto y elevado para evitar la humedad del suelo. Se conservaron en sacos tipo “de azúcar” con una capa adicional de bolsas de parafina, lo que aseguró su adecuada protección y preservación durante el almacenamiento.

**Figura 3.5** Almacenamiento de muestras de suelo para preservación y cuidado óptimos



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5 Determinación de los límites de atterberg

Para la determinación de los límites de Atterberg se emplearon diversos equipos y materiales, entre ellos la copa de Casa Grande para establecer el límite líquido, ranurador, balanza de precisión (0,01 g), recipientes y espátula para la preparación de la muestra, tamiz N° 40 para separar partículas finas, horno de secado, placa de vidrio, vidrio reloj, taras para almacenamiento y bandejas para el manejo y secado de las muestras.

**Figura 3.6** Copa de Casa Grande



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.7** Ranurador



**Fuente:** <https://pys.pe/producto/ranurador-de-plastico/> (P y S equipos, s.f.)



**Figura 3.8** Placa de vidrio



**Fuente:** <https://www.pinzuar.com.co/> (Pinzuar, s.f.)

**Figura 3.9** Taras para almacenamiento



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.10** Recipiente de mezclado



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.11** Espátula



**Fuente:** Elaboración propia

Preparación de los materiales.

Para obtener una muestra representativa, el suelo se seca completamente, se pulveriza y se tamiza hasta conseguir un espécimen de aproximadamente 300 g. Este procedimiento es esencial para determinar el límite líquido (ASTM D4318), parámetro clave para conocer el contenido de humedad a partir del cual el suelo pasa de plástico a líquido, lo que resulta indispensable para su clasificación.

**Figura 3.12** Proceso preparación de muestra



**Fuente:** Elaboración propia

Se trituro cuidadosamente la muestra de suelo seco con mortero y pistilo para no dañar las partículas, tamizándola por la malla N° 40 (425  $\mu\text{m}$ ). El material retenido se retrituro y tamizó hasta completar 300 g, que se almacenaron en bolsas de parafina selladas.

Finalmente, la muestra se hidrató uniformemente con agua y se mezcló con espátula para su ensayo.

**Figura 3.13** Muestras tamizadas



**Fuente:** Elaboración propia

Se colocó el material preparado en un plato chequeando su consistencia, se cubre con papel fil para evitar pérdida de humedad, dejando en reposo (cure) por al menos 16 horas (de un día al otro). Después del periodo de reposo e inmediatamente antes de empezar el ensayo, mezcle completamente el suelo. Repitiendo el proceso para cada muestra.

**Figura 3.14** Reposo o curado de tres muestras



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.1 Límite líquido

Para determinar el límite líquido, se mezcló cuidadosamente el suelo hidratado y se colocó en la copa de Casagrande nivelándolo a un espesor de aproximadamente 10 mm. Con el ranurador se trazó una ranura uniforme, y la copa se hizo caer a razón de 2 golpes por segundo hasta que ambas mitades del suelo se unieran en la base cubriendo 13 mm. Finalmente, se elaboró una gráfica de contenido de humedad versus número de golpes, tomando como límite líquido el valor de humedad correspondiente a 25 golpes.

**Figura 3.15** Ranurado del suelo en la copa de Casagrande

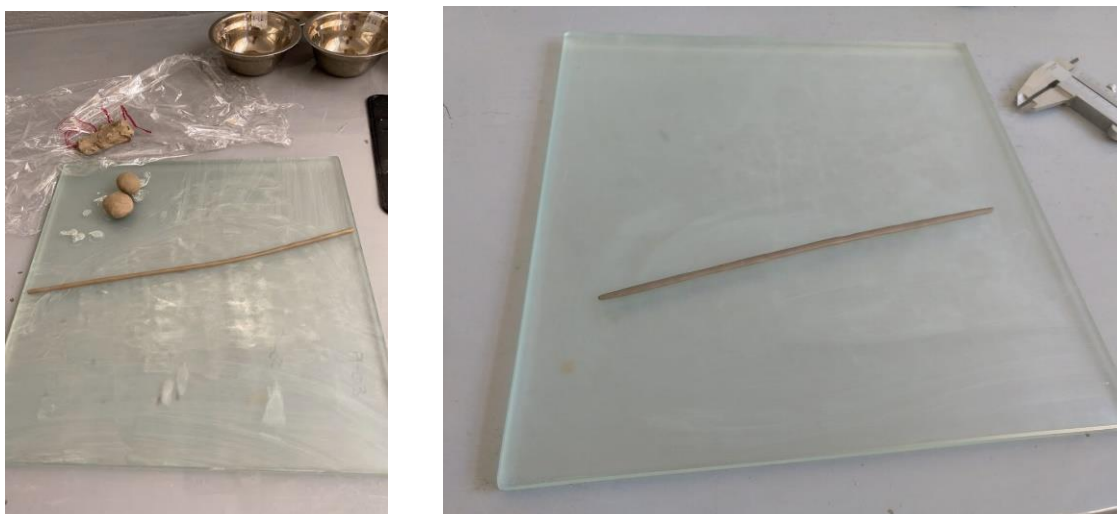


**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.2 Límite plástico

Para determinar el límite plástico (ASTM D4318, AASHTO T90), se toma una muestra de 20 g del suelo ya usado en el ensayo de límite líquido. Se ajusta su humedad para que sea moldeable sin pegarse. Luego, se amasa formando hilos uniformes de 3 mm de diámetro en menos de 2 minutos. Este proceso se repite hasta que aparezcan grietas o ya no pueda moldearse, indicando el contenido de humedad del límite plástico.

**Figura 3.16** Ensayo del Límite Plástico



**Fuente:** Elaboración propia

Se determinó el contenido de humedad del suelo mediante el método ASTM D2216, registrando la masa del suelo húmedo en recipientes hasta obtener al menos 6 g.

### 3.5.3 Índice de plasticidad

Este índice es fundamental para caracterizar la plasticidad y comportamiento del suelo.

**Tabla 3.4** (Parte 1). Tabla resumen de Límites de Atterberg.

Muestra	Ubicación	Límites de Atterberg ASTM D 4318		
		LL	LP	IP
S-1	Barrio Jesús de Nazaret	42,84	26,48	11
S-2	Barrio Miraflores	30,84	21,44	8
S-3	Barrio Pampa La Castilla	34,91	22,85	9
S-4	Barrio Carlos Wagner	41,54	25,44	11
S-5	Barrio San Mateo Centro	41,38	25,44	11
S-6	Urbanización Los Ceibos	42,44	25,85	11

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.4** (Parte 2). Tabla resumen de Límites de Atterberg.

Muestra	Ubicación	Límites de Atterberg ASTM D 4318		
		LL	LP	IP
S-7	Barrio Oscar Zamora	49,92	22,23	17
S-8	Barrio Catedral	35,20	19,44	10
S-9	Barrio San Jorge I	42,16	25,36	11
S-10	Barrio María de los Ángeles	43,85	23,40	13
S-11	Barrio San Bernardo	43,93	20,07	14
S-12	Barrio Lourdes	39,93	19,62	12
S-13	Barrio Eduardo Avaroa	38,59	21,08	11
S-14	Barrio Nueva Esperanza	41,93	23,56	12
S-15	Barrio Los Chapacos	27,74	22,14	0
S-16	Barrio Unión	25,80	17,99	8
S-17	Barrio La Cañada	39,23	24,05	10
S-18	Barrio German Bush	31,87	22,04	8
S-19	Barrio Natividad	34,49	19,54	10
S-20	Barrio Reyes	39,70	25,64	10
S-21	Barrio 1 de Mayo	36,87	17,62	12
S-22	Barrio Los Laureles	41,69	17,62	14
S-23	Barrio Verde Olivo	38,30	15,59	13
S-24	Barrio 24 de Junio	27,19	19,95	8
S-25	Barrio El Portillo	36,15	23,29	9
S-26	Barrio 8 de Marzo	27,14	18,52	6
S-27	Barrio Jerusalén	27,17	19,70	8
S-28	Barrio 2 de Mayo	29,09	21,22	8

**Fuente:** Elaboración propia



**Tabla 3.4** (Parte 3). Tabla resumen de Límites de Atterberg.

Muestra	Ubicación	Límites de Atterberg ASTM D 4318		
		LL	LP	IP
S-29	Barrio Artesanal	33,49	18,23	10
S-30	Barrio Torrecillas	25,58	18,26	8
S-31	Barrio San Blas	30,77	20,60	4
S-32	Barrio Morros Blancos	24,95	15,66	7

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6 Material más fino que pasa el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado ASTM D4222 y AASHTO T88

La fracción de material más fino que pasa el tamiz N° 200 (75  $\mu$ m) se determinó mediante el método de lavado conforme a ASTM D422 y AASHTO T88. Con tamices, balanzas de precisión y bandejas se separaron las partículas finas mediante agitación en agua, repitiendo el lavado hasta obtener agua clara. Finalmente, la muestra se secó y pesó para calcular el porcentaje de finos.

**Tabla 3.5** (Parte 1). Tabla resumen del análisis granulométrico.

Muestra	Ubicación	Porcentaje que pasa el tamiz			
		N°4	N°10	N°40	N°200
S-1	Barrio Jesús de Nazaret	100,00	100,00	98,45	97,53
S-2	Barrio Miraflores	100,00	100,00	99,97	92,29
S-3	Barrio Pampa La Castilla	100,00	100,00	99,96	99,82
S-4	Barrio Carlos Wagner	100,00	100,00	99,40	98,93
S-5	Barrio San Mateo Centro	100,00	100,00	99,80	97,86
S-6	Urbanización Los Ceibos	100,00	100,00	99,94	99,85

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.5** (Parte 2). Tabla resumen del análisis granulométrico.

Muestra	Ubicación	Porcentaje que pasa el tamiz			
		Nº4	Nº10	Nº40	Nº200
S-7	Barrio Oscar Zamora	100,00	100,00	99,89	99,37
S-8	Barrio Catedral	100,00	100,00	99,97	98,14
S-9	Barrio San Jorge I	100,00	100,00	99,87	99,40
S-10	Barrio María de los Ángeles	100,00	99,88	98,96	96,01
S-11	Barrio San Bernardo	100,00	98,68	96,13	90,28
S-12	Barrio Lourdes	100,00	99,92	99,62	98,51
S-13	Barrio Eduardo Avaroa	100,00	100,00	99,94	99,64
S-14	Barrio Nueva Esperanza	100,00	99,06	95,78	77,97
S-15	Barrio Los Chapacos	100,00	100,00	94,67	33,18
S-16	Barrio Unión	100,00	100,00	99,76	86,04
S-17	Barrio La Cañada	100,00	100,00	98,02	95,78
S-18	Barrio German Bush	100,00	100,00	99,65	95,00
S-19	Barrio Natividad	100,00	100,00	99,18	98,31
S-20	Barrio Reyes	100,00	99,06	95,78	77,97
S-21	Barrio 1 de Mayo	100,00	100,00	99,86	93,56
S-22	Barrio Los Laureles	100,00	100,00	99,92	99,29
S-23	Barrio Verde Olivo	100,00	99,95	99,70	86,97
S-24	Barrio 24 de Junio	100,00	100,00	99,44	89,54
S-25	Barrio El Portillo	100,00	100,00	99,88	93,82
S-26	Barrio 8 de Marzo	100,00	99,90	98,78	65,80
S-27	Barrio Jerusalén	100,00	100,00	99,93	92,57
S-28	Barrio 2 de Mayo	100,00	99,35	98,92	75,56

**Fuente:** Elaboración propia



**Tabla 3.5** (Parte 3). Tabla resumen del análisis granulométrico.

Muestra	Ubicación	Porcentaje que pasa el tamiz			
		Nº4	Nº10	Nº40	Nº200
S-29	Barrio Artesanal	100,00	100,00	100,00	98,64
S-30	Barrio Torrecillas	100,00	100,00	99,94	98,65
S-31	Barrio San Blas	100,00	98,88	95,55	57,11
S-32	Barrio Morros Blancos	100,00	99,38	96,80	67,56

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7 Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 y ASTM D 2487

#### 3.7.1 Clasificación de suelos por método AASHTO M 145-91

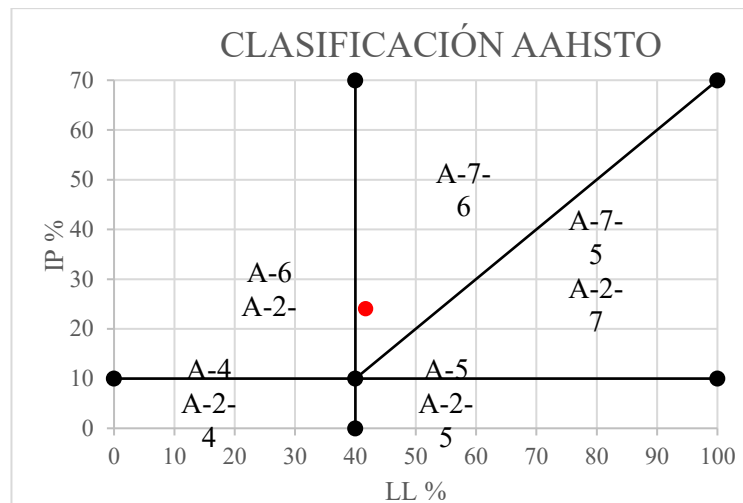
La clasificación de suelos según el método AASHTO M 145-91, el método se aplicó a muestras de diversos barrios, destacando como ejemplo el caso del barrio Los Laureles.

Datos

% Pasa tamiz Nº10 = 100 ; % Pasa tamiz Nº40 = 99,92; % Pasa tamiz Nº200 = 99,29

LL= 41,69; LP= 17,62; IG= 14

**Figura 3.17** Carta de plasticidad AASHTO barrio Los Laureles



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7.2 Clasificación de suelos por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487

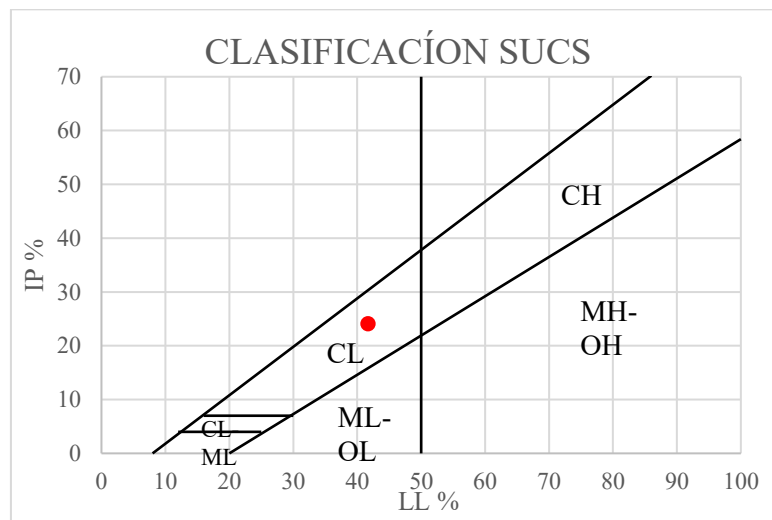
Estos parámetros, límite líquido, índice de plasticidad y distribución granulométrica, son fundamentales para clasificar el suelo según el SUCS. El sistema clasifica los suelos en categorías como grava, arena, limo y arcilla, y subcategorías basadas en su comportamiento. A continuación, señalemos datos del barrio los Laureles como ejemplo:

Datos

% Pasa tamiz N°10 = 99,29

LL= 41,69; LP= 17,62; IG= 14

**Figura 3.18** Carta de plasticidad SUCS barrio los Laureles



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.6** (Parte 1). Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487.

Muestra	Ubicación	Clasificación de suelos	
		SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145
S-1	Barrio Jesús de Nazaret	CL	A-7-6 (11)
S-2	Barrio Miraflores	CL	A-6 (8)

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.6** (Parte 2). Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487.

Muestra	Ubicación	Clasificación de suelos	
		SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145
S-3	Barrio Pampa La Castilla	CL	A-6 (9)
S-4	Barrio Carlos Wagner	CL	A-7-6 (11)
S-5	Barrio San Mateo Centro	CL	A-7-6 (11)
S-6	Urbanización Los Ceibos	CL	A-7-6 (11)
S-7	Barrio Oscar Zamora	CL	A-7-6 (17)
S-8	Barrio Catedral	CL	A-6 (10)
S-9	Barrio San Jorge I	CL	A-7-6 (11)
S-10	Barrio María de los Ángeles	CL	A-7-6 (13)
S-11	Barrio San Bernardo	CL	A-7-6 (14)
S-12	Barrio Lourdes	CL	A-6 (12)
S-13	Barrio Eduardo Avaroa	CL	A-6 (11)
S-14	Barrio Nueva Esperanza	CL	A-7-6 (12)
S-15	Barrio Los Chapacos	CL	A-6 (0)
S-16	Barrio Unión	CL	A-6 (8)
S-17	Barrio La Cañada	CL	A-6 (10)
S-18	Barrio German Bush	CL	A-6 (8)
S-19	Barrio Natividad	CL	A-6 (10)
S-20	Barrio Reyes	CL	A-6 (10)
S-21	Barrio 1 de Mayo	CL	A-6 (12)
S-22	Barrio Los Laureles	CL	A-7-6 (14)
S-23	Barrio Verde Olivo	CL	A-6 (13)
S-24	Barrio 24 de Junio	CL	A-6 (8)

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.6** (Parte 3). Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487.

Muestra	Ubicación	Clasificación de suelos	
		SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145
S-25	Barrio El Portillo	CL	A-6 (9)
S-26	Barrio 8 de Marzo	CL	A-6 (6)
S-27	Barrio Jerusalén	CL	A-6 (8)
S-28	Barrio 2 de Mayo	CL	A-6 (8)
S-29	Barrio Artesanal	CL	A-6 (10)
S-30	Barrio Torrecillas	CL	A-6 (8)
S-31	Barrio San Blas	CL	A-6 (4)
S-32	Barrio Morros Blancos	CL	A-6 (7)

**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados más a detalle en el ANEXO I.

### 3.8 Selección de la muestra para realizar la estabilización

Con la clasificación de los suelos como arcillas CL, se agruparon las muestras en cinco categorías según sus límites líquidos. De cada grupo se seleccionó una muestra representativa para los ensayos de estabilización, considerando que las arcillas de baja a media compresibilidad comprenden los rangos de suelo estudiados.

Los suelos escogidos son:

- S-30 del barrio Torrecillas.
- S-2 del barrio Miraflores.
- S-3 del barrio Pampa la Castilla.
- S-20 del barrio Reyes.

- S-7 del barrio Oscar Zamora.

**Tabla 3.7** Muestras agrupadas

Elección de las muestras									
Rango en % de Límite Líquido									
20% a 26%		26% a 32%		32% a 38%		38% a 44%		44% a 50%	
Muestra	LL	Muestra	LL	Muestra	LL	Muestra	LL	Muestra	LL
S-32	24,95	S-26	27,14	S-29	33,49	S-23	38,30	S-7	49,92
S-30	25,58	S-27	27,17	S-19	34,49	S-13	38,59		
S-16	25,80	S-24	27,19	S-3	34,91	S-17	39,23		
		S-15	27,74	S-8	35,20	S-20	39,70		
		S-28	29,09	S-25	36,15	S-12	39,93		
		S-31	30,77	S-21	36,87	S-5	41,38		
		S-2	30,84			S-4	41,54		
		S-18	31,87			S-22	41,69		
						S-14	41,93		
						S-9	42,16		
						S-6	42,44		
				S-1	42,84				
				S-10	43,85				
				S-11	43,93				

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.8** Grado de Compresibilidad

Muestra	Límite Líquido (%)	Índice de Compresibilidad (Cc)	Grado de Compresibilidad	
S-30	25,58	0,14022	Baja	$Cc < 0.20$
S-2	30,84	0,18756	Baja	$Cc < 0.20$
S-3	34,91	0,22419	Media	$0.20 \leq Cc \leq 0.40$
S-20	39,7	0,2673	Media	$0.20 \leq Cc \leq 0.40$
S-7	49,92	0,35928	Media	$0.20 \leq Cc \leq 0.40$

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de los suelos y rocas a través de su masa ASTM D 2216-03

El contenido de humedad se determinó conforme a la norma ASTM D2216-03, estableciendo la relación entre la masa de agua en los poros y la masa de las partículas sólidas. Este análisis, expresado en porcentaje.

**Tabla 3.9** (Parte 1). Tabla resumen contenido de humedad

Muestra	Ubicación	Contenido de humedad
		w%
S-1	Barrio Jesús de Nazaret	2,1
S-2	Barrio Miraflores	1,5
S-3	Barrio Pampa La Castilla	1,3
S-4	Barrio Carlos Wagner	1,4
S-5	Barrio San Mateo Centro	1,4
S-6	Urbanización Los Ceibos	1,6

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.9** (Parte 2). Tabla resumen contenido de humedad

Muestra	Ubicación	Contenido de humedad
		w%
S-7	Barrio Oscar Zamora	2,7
S-8	Barrio Catedral	1,7
S-9	Barrio San Jorge I	12,7
S-10	Barrio María de los Ángeles	25,0
S-11	Barrio San Bernardo	21,7
S-12	Barrio Lourdes	20,5
S-13	Barrio Eduardo Avaroa	32,0
S-14	Barrio Nueva Esperanza	5,6
S-15	Barrio Los Chapacos	4,5
S-16	Barrio Unión	3,5
S-17	Barrio La Cañada	4,6
S-18	Barrio German Bush	2,6
S-19	Barrio Natividad	4,2
S-20	Barrio Reyes	2,5
S-21	Barrio 1 de Mayo	2,4
S-22	Barrio Los Laureles	6,5
S-23	Barrio Verde Olivo	2,0
S-24	Barrio 24 de Junio	7,5
S-25	Barrio El Portillo	2,2
S-26	Barrio 8 de Marzo	2,6
S-27	Barrio Jerusalén	7,0

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.9** (Parte 3). Tabla resumen contenido de humedad

Muestra	Ubicación	Contenido de humedad
		w%
S-28	Barrio 2 de Mayo	4,5
S-29	Barrio Artesanal	3,0
S-30	Barrio Torrecillas	3,3
S-31	Barrio San Blas	4,5
S-32	Barrio Morros Blancos	3,7

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.2 Compactación AASHTO T-180

Se empleó el método Proctor modificado (método A) para el ensayo de compactación, utilizando un molde metálico de 4 pulgadas y un martillo de 4.5 kg para compactar el suelo en cinco capas de 25 golpes cada una, logrando así una mayor densidad seca, adecuada para suelos destinados a soportar cargas elevadas.

**Figura 3.19** Molde metálico de 4 pulgadas de diámetro



**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.20** Probeta graduada



**Fuente:** Elaboración propia

#### Preparación de la muestra

Para el ensayo de compactación, la muestra de suelo se desmenuzó, se tamizó con el tamiz N° 4 y se seleccionaron 3 kg de material. Posteriormente, se mezcló con agua para alcanzar distintos porcentajes de humedad (7%, 14%, 21% y 28%), determinados mediante una ecuación específica. La muestra se reposó durante 16 horas en bolsas selladas para estabilizar la humedad antes del ensayo.

$$V_w = \frac{\%W_{ensayado} - \%W_{actual}}{100} * W_{ss}$$

Donde:

$V_w$  = *Volumen de agua*

$\%W$  = *Porcentaje de humedad*

$W_{ss}$  = *Peso de suelo seco*

**Figura 3.21** Preparación de la muestra

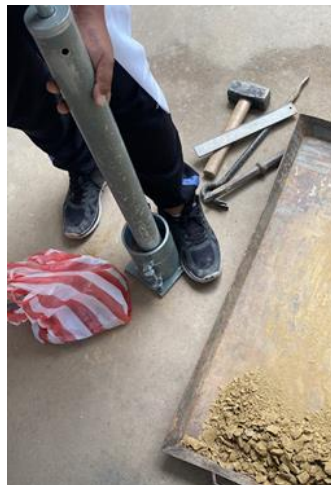


**Fuente:** Elaboración propia

#### Procedimiento

Se ensambló la placa en el molde y se aseguró el collarín, colocando el conjunto sobre una superficie plana y resistente. Posteriormente, se colocó el suelo preparado en capas uniformes, cada una ocupando aproximadamente una quinta parte de la altura del molde.

**Figura 3.22** Compactación suelo T -180



**Fuente:** Elaboración propia

Finalizada la preparación, se compactó el suelo con un martillo apisonador, aplicando 25 golpes uniformemente distribuidos. Luego, se retiró el collarín, se niveló la superficie con una regla y se pesó el molde compactado sin collarín, registrando el peso con balanza de precisión.

**Figura 3.23** Pesado del molde y la muestra enrasada



**Fuente:** Elaboración propia

Se extrajo material del núcleo del espécimen compactado y se determinó su masa húmeda. Las porciones se secaron en horno a 60 °C durante 24 horas.

**Figura 3.24** Muestras extraídas



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.10** Tabla resumen Compactación suelo sin aditivos

Muestra	Ubicación		Densidad máxima seca	Humedad optima
			g/cm <sup>3</sup>	%
S-30	Barrio Torrecillas	Natural	1,72	12,75
S-2	Barrio Miraflores	Natural	1,83	12,14
S-3	Barrio Pampa La Castilla	Natural	1,75	15,81
S-20	Barrio Reyes	Natural	1,72	16,59
S-7	Barrio Oscar Zamora	Natural	1,81	16,20

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.3 Valor de Soporte de California (CBR)

El valor CBR se determinó considerando dos profundidades de penetración del pistón normalizado (0.1 y 0.2 pulgadas). Para este ensayo se utilizó una prensa de carga.

**Figura 3.25** Prensa de carga



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.26** Moldes cilíndricos de metal



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.27** Martillo metálico de 4.5 kg y altura de caída de 46 cm



**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.28** Disco espaciador metálico



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.29** Pesado del molde y la muestra enrasada



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.30** Utensilios y herramientas de uso general



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.31** Tanques de inmersión



**Fuente:** Elaboración propia

### Preparación de la muestra

Para el ensayo se prepararon 15 kg de suelo, distribuidos en 3 moldes de 5 kg cada uno. El suelo se mezcló con agua hasta alcanzar la humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación y se dejó reposar cubierto durante 16 horas.

**Figura 3.32** Preparación de la muestra



**Fuente:** Elaboración propia

### Procedimiento

Para el procedimiento del ensayo CBR, se compactan normalmente tres especímenes para lograr una gama de densidades entre el 95% y el 100% de la densidad seca máxima. Se fija el molde a la placa base y se adjunta la extensión al cuello, luego se pesa con la precisión más cercana a 5 g (0.01 lb). Se inserta un disco espaciador en el molde y se coloca un filtro de papel grueso en la parte superior del disco. No olvidar medir diámetros y altura del molde.



**Figura 3.33** Toma de mediciones



**Fuente:** Elaboración propia

Cada porción de 5 kg de suelo se mezcló con agua para alcanzar el contenido de humedad óptimo y se compactó en el molde en cinco capas iguales. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad del material compactado, asegurando una muestra mínima de 100 g según la norma AASHTO T2216.

**Figura 3.34** Compactado por capas



**Fuente:** Elaboración propia

Se retiró el collarín de extensión y se recortó el suelo compactado al nivel del molde con una regla enrazadora. Luego, se retiró el disco espaciador, se colocó papel filtro en la placa base perforada, se invirtió el molde y se aseguró la placa, pesando el conjunto con precisión de 5 g. Las otras dos muestras se compactaron con diferentes números de golpes (10, 25 y 56).

#### Saturación de la muestra

Se colocaron contrapesos para simular la carga de la sub-base y base, se instaló un trípode con indicador dial y se registró la lectura inicial. La muestra se sumergió en agua manteniendo un nivel 25 mm sobre su superficie durante 96 horas, registrando la lectura final al término del remojo.

**Figura 3.35** Muestras en saturación



**Fuente:** Elaboración propia

Finalizada la saturación, las muestras se retiraron, se eliminó el agua superficial y se dejaron escurrir durante 15 minutos sin alterar su superficie. Tras retirar los sobrepesos, se procedió al ensayo de carga hasta la rotura del molde.

**Figura 3.36** Medición de la expansión



**Fuente:** Elaboración propia

### Prueba de penetración

Antes de la prueba de penetración, se pesó el molde sin collarín y con la muestra húmeda, colocándose sobrepesos para igualar la carga de saturación y evitar desplazamientos durante la penetración del pistón. El pistón se asienta cuidadosamente para evitar impactos con las pesas. La carga se aplica a una tasa uniforme de 1.3 mm/min, registrando las cargas en penetraciones de 0 a 5 pulgadas en intervalos específicos, según la precisión del instrumento.

**Figura 3.37** Penetración de la muestra



**Fuente:** Elaboración propia

Después de finalizar la penetración, se extraen porciones de muestras de la superficie, la base y el medio del espécimen para análisis de humedad.



**Figura 3.38** Extracción de muestras del ensayo CBR para análisis posterior



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.39** Preparación de muestras para secado en horno



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.11** Tabla resumen CBR suelo sin aditivos

Muestra	Ubicación		Clasificación de suelos		Índice de soporte CBR (%)			
			SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145	0,1"		0,2"	
					100% D.máx	95% D.máx	100% D.máx	95% D.máx
S-30	Barrio Torrecillas	Natural	CL	A-6 (8)	4,48	3,81	3,85	3,28
S-2	Barrio Miraflores	Natural	CL	A-6 (8)	3,54	2,89	3,37	2,77
S-3	Barrio Pampa La Castilla	Natural	CL	A-6 (9)	3,44	2,54	2,64	2,00
S-20	Barrio Reyes	Natural	CL	A-6 (10)	3,79	3,23	3,37	2,88
S-7	Barrio Oscar Zamora	Natural	CL	A-7-6 (17)	2,88	2,61	2,65	2,40

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.9 Elaboración con aditivos

#### 3.9.1 Criterios para dosificar

La cal utilizada en el estudio proviene de la marca Puente, común en la ciudad, y el Terrasil fue suministrado por BREM Cía. Ltda. de Santa Cruz, Bolivia. La dosificación de Terrasil siguió la recomendación del distribuidor, con 0.5 kg/m<sup>3</sup> más un 1% de cemento que cambie por cal (Anexo VI).

**Figura 3.40** Pesado de la cal



**Fuente:** Elaboración propia

Al ser líquido el Terrasil una jeringa graduada ayuda a la dosificación.

**Figura 3.41** Aditivo Terrasil



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.12** (Parte 1). Tabla de dosificaciones

Para compactación:						
Muestra	Ubicación	Cantidad de muestra (kg)	Cal hidratada (%)	Cal hidratada (g)	Terrasil (kg/m <sup>3</sup> )	Terrasil (g)
S-30	Barrio Torrecillas	3	2%	60	0,5	0,90
	Barrio Torrecillas	3	4%	120		
	Barrio Torrecillas	3	6%	180		
S-2	Barrio Miraflores	3	2%	60		
	Barrio Miraflores	3	4%	120		
	Barrio Miraflores	3	6%	180		
S-3	Barrio Pampa La Castilla	3	2%	60		
	Barrio Pampa La Castilla	3	4%	120		
	Barrio Pampa La Castilla	3	6%	180		
S-20	Barrio Reyes	3	2%	60		
	Barrio Reyes	3	4%	120		
	Barrio Reyes	3	6%	180		
S-7	Barrio Oscar Zamora	3	2%	60		
	Barrio Oscar Zamora	3	4%	120		
	Barrio Oscar Zamora	3	6%	180		

**Fuente:** Elaboración propia



**Tabla 3.12** (Parte 2). Tabla de dosificaciones

Para CBR:						
Muestra	Ubicación	Cantidad de muestra (kg)	Cal hidratada (%)	Cal hidratada (g)	Terrasil (kg/m <sup>3</sup> )	Terrasil (g)
S-30	Barrio Torrecillas	5	2%	100	0,5	1,50
	Barrio Torrecillas	5	4%	200		
	Barrio Torrecillas	5	6%	300		
S-2	Barrio Miraflores	5	2%	100		
	Barrio Miraflores	5	4%	200		
	Barrio Miraflores	5	6%	300		
S-3	Barrio Pampa La Castilla	5	2%	100		
	Barrio Pampa La Castilla	5	4%	200		
	Barrio Pampa La Castilla	5	6%	300		
S-20	Barrio Reyes	5	2%	100		
	Barrio Reyes	5	4%	200		
	Barrio Reyes	5	6%	300		
S-7	Barrio Oscar Zamora	5	2%	100		
	Barrio Oscar Zamora	5	4%	200		
	Barrio Oscar Zamora	5	6%	300		

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.9.2 Compactación suelo – aditivos

Para la compactación con aditivos, las muestras se prepararon conforme al procedimiento estándar, incorporando cal en porcentajes de 2%, 4% y 6%, y mezclando Terrasil ( $0.5 \text{ kg/m}^3$ ) con el agua para alcanzar la humedad óptima. La mezcla se dejó reposar 16 horas antes de la compactación para asegurar una correcta integración de los aditivos.

**Figura 3.42** Enrazado de la muestra durante el proceso de compactación



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.13** Tabla resumen Compactación suelo con aditivos

Muestra	Ubicación	Aditivo cal	Aditivo Terrasil	Densidad máxima seca	Humedad óptima
		%	g	g/cm <sup>3</sup>	%
S-30	Barrio Torrecillas	2,00	0,90	1,74	14,06
	Barrio Torrecillas	4,00	0,90	1,77	15,65
	Barrio Torrecillas	6,00	0,90	1,78	18,09
S-2	Barrio Miraflores	2,00	0,90	1,84	12,58
	Barrio Miraflores	4,00	0,90	1,86	14,59
	Barrio Miraflores	6,00	0,90	1,87	16,94
S-3	Barrio Pampa La Castilla	2,00	0,90	1,77	16,43
	Barrio Pampa La Castilla	4,00	0,90	1,80	17,47
	Barrio Pampa La Castilla	6,00	0,90	1,82	18,87
S-20	Barrio Reyes	2,00	0,90	1,73	16,69
	Barrio Reyes	4,00	0,90	1,75	18,32
	Barrio Reyes	6,00	0,90	1,76	18,78
S-7	Barrio Oscar Zamora	2,00	0,90	1,83	17,18
	Barrio Oscar Zamora	4,00	0,90	1,87	17,66
	Barrio Oscar Zamora	6,00	0,90	1,88	17,87

**Fuente:** Elaboración propia**3.9.3 Valor soporte de California (CBR) suelo – aditivos**

Para el ensayo CBR con aditivos, las muestras se prepararon con cal en proporciones de 2%, 4% y 6%, y Terrasil incorporado al agua para ajustar la humedad óptima.

**Figura 3.43** Mezclado de la cal con el suelo en bandeja



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.44** Medición de la expansión



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.45** Preparación de la prensa para el ensayo CBR



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.46** Suelo penetrado



**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.47** Extracción muestras del molde



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.48** Pesado de las taras con muestras después del secado en horno



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.14** Tabla resumen CBR suelo con aditivos

Muestra	Ubicación	Aditivo cal	Aditivo Terrasil	Índice de soporte CBR (%)			
		%	g	0,1"		0,2"	
				100% D.máx	95% D.máx	100% D.máx	95% D.máx
S-30	Barrio Torrecillas	2,00	1,50	8,47	7,09	8,72	7,39
	Barrio Torrecillas	4,00	1,50	22,00	16,79	21,24	16,17
	Barrio Torrecillas	6,00	1,50	28,43	22,92	28,61	22,52
S-2	Barrio Miraflores	2,00	1,50	7,72	7,01	7,64	7,13
	Barrio Miraflores	4,00	1,50	19,61	17,05	16,04	13,97
	Barrio Miraflores	6,00	1,50	29,01	22,36	27,67	21,21
S-3	Barrio Pampa La Castilla	2,00	1,50	8,75	7,86	8,36	7,55
	Barrio Pampa La Castilla	4,00	1,50	24,23	19,82	22,02	18,13
	Barrio Pampa La Castilla	6,00	1,50	35,88	29,46	30,31	25,02
S-20	Barrio Reyes	2,00	1,50	6,86	6,30	6,28	5,78
	Barrio Reyes	4,00	1,50	20,33	18,71	16,35	15,20
	Barrio Reyes	6,00	1,50	30,32	27,15	25,81	23,12
S-7	Barrio Oscar Zamora	2,00	1,50	4,46	3,92	4,02	3,55
	Barrio Oscar Zamora	4,00	1,50	15,42	13,45	13,68	11,88
	Barrio Oscar Zamora	6,00	1,50	26,53	23,34	25,20	22,17

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.10 Resumen de caracterización y ensayos

**Tabla 3.15** (Parte 1). Resumen de la clasificación de suelos ASTM D 2487 /

AASHTO M-145

Muestra	Ubicación	Porcentaje que pasa el tamiz				Contenido de humedad	Límites de Atterberg ASTM D 4318			Clasificación de suelos	
		Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	w%	LL	LP	IP	SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145
S-1	Barrio Jesús de Nazaret	100,00	100,00	98,45	97,53	2,1	42,84	26,48	11	CL	A-7-6 (11)
S-2	Barrio Miraflores	100,00	100,00	99,97	92,29	1,5	30,84	21,44	8	CL	A-6 (8)
S-3	Barrio Pampa La Castilla	100,00	100,00	99,96	99,82	1,3	34,91	22,85	9	CL	A-6 (9)
S-4	Barrio Carlos Wagner	100,00	100,00	99,40	98,93	1,4	41,54	25,44	11	CL	A-7-6 (11)
S-5	Barrio San Mateo Centro	100,00	100,00	99,80	97,86	1,4	41,38	25,44	11	CL	A-7-6 (11)
S-6	Urbanización Los Ceibos	100,00	100,00	99,94	99,85	1,6	42,44	25,85	11	CL	A-7-6 (11)
S-7	Barrio Oscar Zamora	100,00	100,00	99,89	99,37	2,7	49,92	22,23	17	CL	A-7-6 (17)
S-8	Barrio Catedral	100,00	100,00	99,97	98,14	1,7	35,20	19,44	10	CL	A-6 (10)
S-9	Barrio San Jorge I	100,00	100,00	99,87	99,40	12,7	42,16	25,36	11	CL	A-7-6 (11)
S-10	Barrio María de los Ángeles	100,00	99,88	98,96	96,01	25,0	43,85	23,40	13	CL	A-7-6 (13)
S-11	Barrio San Bernardo	100,00	98,68	96,13	90,28	21,7	43,93	20,07	14	CL	A-7-6 (14)
S-12	Barrio Lourdes	100,00	99,92	99,62	98,51	20,5	39,93	19,62	12	CL	A-6 (12)
S-13	Barrio Eduardo Avaroa	100,00	100,00	99,94	99,64	32,0	38,59	21,08	11	CL	A-6 (11)
S-14	Barrio Nueva Esperanza	100,00	99,06	95,78	77,97	5,6	41,93	23,56	12	CL	A-7-6 (12)
S-15	Barrio Los Chapacos	100,00	100,00	94,67	33,18	4,5	27,74	22,14	0	CL	A-6 (0)
S-16	Barrio Unión	100,00	100,00	99,76	86,04	3,5	25,80	17,99	8	CL	A-6 (8)
S-17	Barrio La Cañada	100,00	100,00	98,02	95,78	4,6	39,23	24,05	10	CL	A-6 (10)
S-18	Barrio German Bush	100,00	100,00	99,65	95,00	2,6	31,87	22,04	8	CL	A-6 (8)
S-19	Barrio Natividad	100,00	100,00	99,18	98,31	4,2	34,49	19,54	10	CL	A-6 (10)

**Fuente:** Elaboración propia



**Tabla 3.15** (Parte 2). Resumen de la clasificación de suelos ASTM D 2487 /  
AASHTO M-145

Muestra	Ubicación	Porcentaje que pasa el tamiz				Contenido de humedad	Límites de Atterberg ASTM D 4318			Clasificación de suelos	
		Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	w%	LL	LP	IP	SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145
S-20	Barrio Reyes	100,00	99,06	95,78	77,97	2,5	39,70	25,64	10	CL	A-6 (10)
S-21	Barrio 1 de Mayo	100,00	100,00	99,86	93,56	2,4	36,87	17,62	12	CL	A-6 (12)
S-22	Barrio Los Laureles	100,00	100,00	99,92	99,29	6,5	41,69	17,62	14	CL	A-7-6 (14)
S-23	Barrio Verde Olivo	100,00	99,95	99,70	86,97	2,0	38,30	15,59	13	CL	A-6 (13)
S-24	Barrio 24 de Junio	100,00	100,00	99,44	89,54	7,5	27,19	19,95	8	CL	A-6 (8)
S-25	Barrio El Portillo	100,00	100,00	99,88	93,82	2,2	36,15	23,29	9	CL	A-6 (9)
S-26	Barrio 8 de Marzo	100,00	99,90	98,78	65,80	2,6	27,14	18,52	6	CL	A-6 (6)
S-27	Barrio Jerusalén	100,00	100,00	99,93	92,57	7,0	27,17	19,70	8	CL	A-6 (8)
S-28	Barrio 2 de Mayo	100,00	99,35	98,92	75,56	4,5	29,09	21,22	8	CL	A-6 (8)
S-29	Barrio Artesanal	100,00	100,00	100,00	98,64	3,0	33,49	18,23	10	CL	A-6 (10)
S-30	Barrio Torrecillas	100,00	100,00	99,94	98,65	3,3	25,58	18,26	8	CL	A-6 (8)
S-31	Barrio San Blas	100,00	98,88	95,55	57,11	4,5	30,77	20,60	4	CL	A-6 (4)
S-32	Barrio Morros Blancos	100,00	99,38	96,80	67,56	3,7	24,95	15,66	7	CL	A-6 (7)

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.16** Resumen de expansión

Ubicación	Porcentaje de expansión 56 golpes				
	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Torrecillas natural	0,00	4,15	7,12	8,94	10,57
Torrecillas 2%Cal+aditivo	0,00	1,09	1,17	1,30	1,17
Torrecillas 4%Cal+aditivo	0,00	0,26	0,22	0,24	0,41
Torrecillas 6%Cal+aditivo	0,00	0,04	0,13	0,35	0,28
Miraflores natural	0,00	4,95	5,60	6,10	6,21
Miraflores 2%Cal+aditivo	0,00	1,11	1,15	1,32	1,15
Miraflores 4%Cal+aditivo	0,00	0,26	0,22	0,24	0,41
Miraflores 6%Cal+aditivo	0,00	0,07	0,11	0,35	0,26
Pampa La Castilla natural	0,00	6,82	11,03	13,24	14,46
Pampa La Castilla 2%Cal+aditivo	0,00	1,13	1,15	1,32	1,15
Pampa La Castilla 4%Cal+aditivo	0,00	0,28	0,30	0,35	0,41
Pampa La Castilla 6%Cal+aditivo	0,00	0,02	0,13	0,33	0,26
Reyes natural	0,00	2,80	5,62	8,34	9,92
Reyes 2%Cal+aditivo	0,00	4,15	4,23	4,28	4,28
Reyes 4%Cal+aditivo	0,00	2,32	2,65	2,65	2,80
Reyes 6%Cal+aditivo	0,00	0,63	0,61	0,59	0,72
Oscar Zamora natural	0,00	4,75	8,53	10,75	11,35
Oscar Zamora 2%Cal+aditivo	0,00	3,58	3,60	3,67	3,60
Oscar Zamora 4%Cal+aditivo	0,00	0,56	0,50	0,41	0,41
Oscar Zamora 6%Cal+aditivo	0,00	0,87	1,11	1,02	0,93

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.17** Resumen compactación Proctor modificado AASHTO T-180 y CBR  
AASHTO T-193 de los suelos agrupados escogidos

Muestra	Ubicación	Aditivo cal	Aditivo Terrasil	Densidad máxima seca	Humedad optima	Clasificación de suelos		Índice de Soporte CBR (%)			
		%	kg/m³	g/cm³	%	SUCS-ASTM D2487	AASHTO M-145	0,1"		0,2"	
								100% D.máx	95% D.máx	100% D.máx	95% D.máx
S-30	Barrio Torrecillas	Natural	Natural	1,72	12,75	CL	A-6 (8)	4,48	3,81	3,85	3,28
	Barrio Torrecillas	2,00	0,50	1,74	14,06			8,47	7,09	8,72	7,39
	Barrio Torrecillas	4,00	0,50	1,77	15,65			22,00	16,79	21,24	16,17
	Barrio Torrecillas	6,00	0,50	1,78	18,09			28,43	22,92	28,61	22,52
S-2	Barrio Miraflores	Natural	Natural	1,83	12,14	CL	A-6 (8)	3,54	2,89	3,37	2,77
	Barrio Miraflores	2,00	0,50	1,84	12,58			7,72	7,01	7,64	7,13
	Barrio Miraflores	4,00	0,50	1,86	14,59			19,61	17,05	16,04	13,97
	Barrio Miraflores	6,00	0,50	1,87	16,94			29,01	22,36	27,67	21,21
S-3	Barrio Pampa La Castilla	Natural	Natural	1,75	15,81	CL	A-6 (9)	3,44	2,54	2,64	2,00
	Barrio Pampa La Castilla	2,00	0,50	1,77	16,43			8,75	7,86	8,36	7,55
	Barrio Pampa La Castilla	4,00	0,50	1,80	17,47			24,23	19,82	22,02	18,13
	Barrio Pampa La Castilla	6,00	0,50	1,82	18,87			35,88	29,46	30,31	25,02
S-20	Barrio Reyes	Natural	Natural	1,72	16,59	CL	A-6 (10)	3,79	3,23	3,37	2,88
	Barrio Reyes	2,00	0,50	1,73	16,69			6,86	6,30	6,28	5,78
	Barrio Reyes	4,00	0,50	1,75	18,32			20,33	18,71	16,35	15,20
	Barrio Reyes	6,00	0,50	1,76	18,78			30,32	27,15	25,81	23,12
S-7	Barrio Oscar Zamora	Natural	Natural	1,81	16,20	CL	A-7-6 (17)	2,88	2,61	2,65	2,40
	Barrio Oscar Zamora	2,00	0,50	1,83	17,18			4,46	3,92	4,02	3,55
	Barrio Oscar Zamora	4,00	0,50	1,87	17,66			15,42	13,45	13,68	11,88
	Barrio Oscar Zamora	6,00	0,50	1,88	17,87			26,53	23,34	25,20	22,17

**Fuente:** Elaboración propia

**CAPÍTULO IV**

**ANÁLISIS Y CONFIABILIDAD DE  
RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS

#### 4.1 Base datos

En el análisis de los resultados obtenidos, se confirma que los suelos de la ciudad presentan, en su mayoría, la clasificación CL, correspondiente a arcillas de baja a media compresibilidad. Esta característica permitió contar con una base de datos representativa y consistente para los ensayos de estabilización. A partir de los resultados, se observa claramente un incremento progresivo en los valores del CBR al comparar el suelo natural con los suelos estabilizados con diferentes porcentajes de cal y Terrasil. Este comportamiento evidencia la efectividad de los aditivos empleados y proporciona una base sólida para aplicar el análisis estadístico.

##### 4.1.1 Análisis estadístico descriptiva

En esta sección se presenta el análisis estadístico descriptivo de los datos obtenidos a partir de los ensayos de CBR realizados para evaluar el comportamiento de los suelos arcillosos estabilizados con diferentes dosificaciones de cal y Terrasil, de esta forma calcular la media para las diferentes combinaciones, sus máximos y mínimos.

Vamos a los cálculos estadísticos descriptivos (media, mediana, moda, varianza, desviación estándar, rango, mínimo y máximo) para cada conjunto de datos.

**Tabla 4.1** (Parte 1). Datos para la estadística descriptivas.

Muestra	Ubicación	Aditivo cal	Aditivo TerraSil	Índice de soporte CBR (%)
		%	kg/m <sup>3</sup>	0,1"
				100% D.máx
S-30	Barrio Torrecillas	Natural	Natural	4,48
	Barrio Torrecillas	2,00%	0,50	8,47
	Barrio Torrecillas	4,00%	0,50	22,00
	Barrio Torrecillas	6,00%	0,50	28,43

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.1** (Parte 2). Datos para la estadística descriptivas.

Muestra	Ubicación	Aditivo cal	Aditivo TerraSil	Índice de soporte CBR (%)
		%	kg/m <sup>3</sup>	0,1"
				100% D.máx
S-2	Barrio Miraflores	Natural	Natural	3,54
	Barrio Miraflores	2,00	0,50	7,72
	Barrio Miraflores	4,00	0,50	19,61
	Barrio Miraflores	6,00	0,50	29,01
S-3	Barrio Pampa La Castilla	Natural	Natural	3,44
	Barrio Pampa La Castilla	2,00	0,50	8,75
	Barrio Pampa La Castilla	4,00	0,50	24,23
	Barrio Pampa La Castilla	6,00	0,50	35,88
S-20	Barrio Reyes	Natural	Natural	3,79
	Barrio Reyes	2,00	0,50	6,86
	Barrio Reyes	4,00	0,50	20,33
	Barrio Reyes	6,00	0,50	30,32
S-7	Barrio Oscar Zamora	Natural	Natural	2,88
	Barrio Oscar Zamora	2,00	0,50	4,46
	Barrio Oscar Zamora	4,00	0,50	15,42
	Barrio Oscar Zamora	6,00	0,50	26,53

**Fuente:** Elaboración propia

Media

CBR Natural 0.1" 100%:

$$Media = \frac{4,48 + 3,54 + 3,44 + 3,79 + 2,88}{5} = 3,63\%$$

Varianza

CBR Natural 0.1" 100%:

$$S^2 = 0.339$$

Desviación Estándar

CBR Natural 0.1" 100%:

$$Desviación\ Estándar = \sqrt{0.339} = 0.58$$

Rango

CBR Natural 0.1" 100%:

$$Rango = 2,88 - 4,48 = 1,60$$

Mínimo y Máximo

CBR Natural 0.1" 100%:

$$Mínimo = 2,88$$

$$Máximo = 4,48$$

**Tabla 4.2** Resultados para los datos estadísticos descriptivos

Tratamiento	Media (%)	Desviación estándar	Mín (%)	Máx (%)	Rango (%)
Natural (0%)	3,63	0,58	2,88	4,48	1,60
2% Cal + Terrasil	7,25	1,72	4,46	8,75	4,29
4% Cal + Terrasil	20,32	3,50	15,42	24,23	8,81
6% Cal + Terrasil	30,03	3,48	26,53	35,88	9,35

**Fuente:** Elaboración propia.

La media del índice CBR indica que la resistencia promedio del suelo mejora conforme aumenta el porcentaje de cal, mientras que la baja desviación estándar en cada tratamiento refleja una consistencia y estabilidad en los resultados, especialmente en suelos con mayor contenido de cal. Los valores máximos obtenidos, particularmente con el 6% de cal,

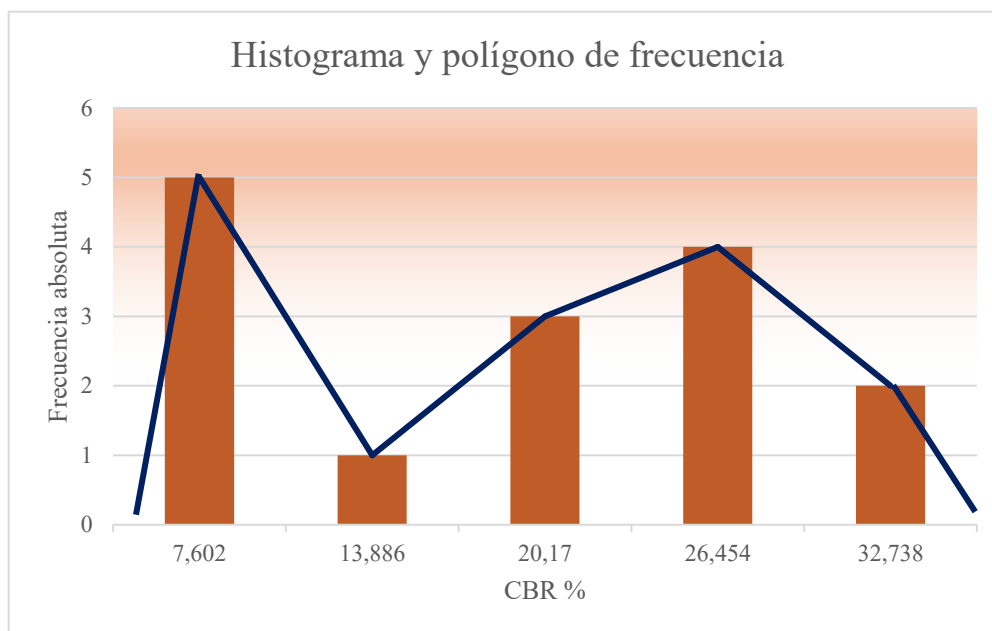
confirman la eficacia del tratamiento para aumentar la capacidad de carga, asegurando un desempeño más predecible y favorable.

**Tabla 4.3** distribución de frecuencias CBR suelos tratados

Intervalo	Frecuencia	Marca de clase	Frecuencia acumulada
	(fi)	(x)	(Fi)
4,46 - 10,74	5	7,602	5
10,74 - 17,03	1	13,886	6
17,03 - 23,31	3	20,17	9
23,31 - 29,60	4	26,454	13
29,60 - 35,88	2	32,738	15
Total	15		

**Fuente:** Elaboración propia.

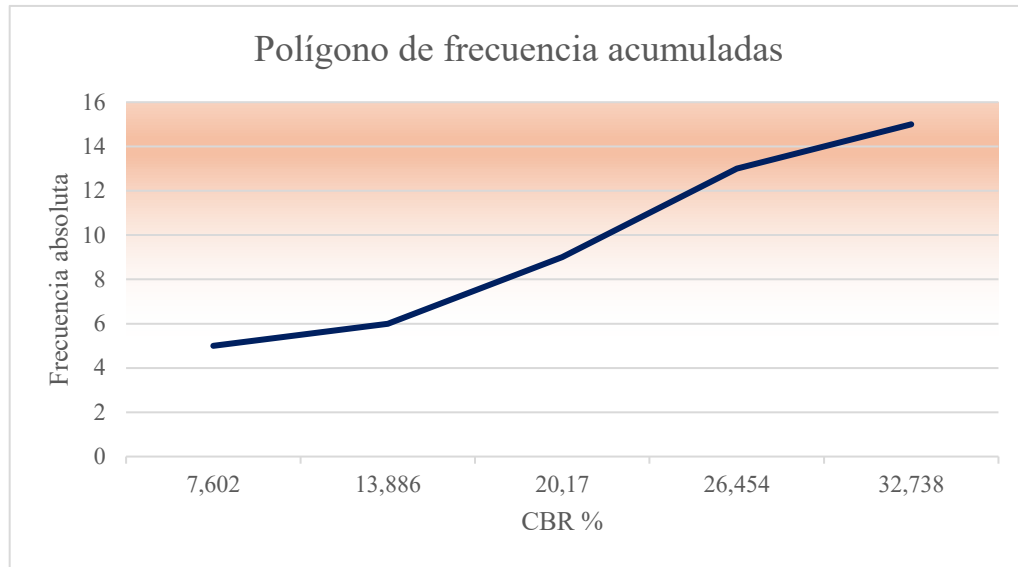
**Gráfico 4.1** Histograma y polígono de frecuencia CBR suelos tratados.



**Fuente:** Elaboración propia



**Gráfico 4.2** Polígono de frecuencia acumulada CBR suelo natural.



**Fuente:** Elaboración propia

El histograma indica que la frecuencia máxima se concentra en el intervalo más bajo (4,46-10,74), mientras que las frecuencias disminuyen progresivamente hacia los intervalos superiores. El polígono de frecuencia acumulada confirma que la mayoría de los datos se acumulan antes del intervalo 29,60-35,88, destacando así los valores mínimos y la dispersión limitada hacia los máximos. Estas gráficas facilitan la identificación de los rangos predominantes y los extremos dentro de la distribución de los datos.

#### 4.1.2 Análisis intervalo de confianza al 95% (IC 95%)

Un intervalo de confianza al 95% es un rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero de una población con un 95% de seguridad, basado en una muestra de datos. Expresar la incertidumbre de esa estimación.

Formula

$$CI = \bar{x} \pm t_{(n-1,0.975)} * \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde

$\bar{x}$  = Promedio del grupo.

S = desviación estándar.

n = Numero de datos.

t = Valor t de Student tabla según grados de libertad y confianza 95%.  $t_{(4,0.975)} = 2.776$

**Tabla 4.4** Tabla de intervalo de confianza al 95%.

Aditivos	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
0 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +0% cal	2,90	4,35
0,5 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +2% cal	5,11	9,39
0,5 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +4% cal	15,07	23,77
0,5 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +6% cal	25,82	34,48

**Fuente:** Elaboración propia

El intervalo es estrecho, indica que los datos son más consistentes y la estimación es más confiable.

#### 4.1.3 Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis debe establecer la hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ).

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): La aplicación de cal y Terrasil en arcillas no mejoran su CBR.
- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): La aplicación de cal y Terrasil en arcillas mejoran su CBR.

#### 4.1.4 Análisis estadística inferencial

Con el objetivo de determinar si los datos obtenidos eran aptos para el uso de análisis estadísticos paramétricos, se aplicó la prueba Anderson-Darling mediante el software XLSTAT 2025.

Dado que el tamaño muestral por grupo fue reducido ( $n < 30$ ), se optó por esta, recomendada por su sensibilidad en muestras pequeñas.

**Tabla 4.5** Tabla con los resultados de Anderson-Darling.

Aditivos	Anderson-Darling (p-valor)	Distribución normal
0 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +0% cal	0,7472	Sí
0,5 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +2% cal	0,2523	Sí
0,5 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +4% cal	0,7065	Sí
0,5 gr/m <sup>3</sup> Terrasil +6% cal	0,2980	Sí

**Fuente:** Elaboración propia

La interpretación de los resultados se realizará considerando un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ). Si el valor de  $p < 0.05$ , se rechazará la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se aceptará la hipótesis alternativa ( $H_1$ ).

##### 4.1.4.1 Análisis distribución t-Student

El análisis inferencial se basa en la teoría de la probabilidad y los principios estadísticos para sacar conclusiones sobre la población utilizando muestras, Se aplicó la distribución t-Student para comparar el CBR entre el suelo natural y los tratamientos con aditivos. Este análisis permitió verificar si las mejoras observadas fueron estadísticamente significativas, considerando el tamaño reducido de las muestras.. A continuación:

**Tabla 4.6** Planilla de datos para a distribución t-Student.

n	CBR		Diferencia (d)	(di - μd)²
	Antes	Después		
	%	%	%	
1	4,48	8,47	-3,99	134,220
2	3,54	7,72	-4,18	129,854
3	3,44	8,75	-5,31	105,377
4	3,79	6,86	-3,07	156,383
5	2,88	4,46	-1,58	195,869
6	4,48	22,00	-17,52	3,782
7	3,54	19,61	-16,07	0,245
8	3,44	24,23	-20,79	27,193
9	3,79	20,33	-16,54	0,931
10	2,88	15,42	-12,54	9,213
11	4,48	28,43	-23,95	70,135
12	3,54	29,01	-25,47	97,904
13	3,44	35,88	-32,44	284,417
14	3,79	30,32	-26,53	120,005
15	2,88	26,53	-23,65	65,200
Suma =				1400,728

**Fuente:** Elaboración propia

Cálculo de la media de las diferencias.

$$\mu_d = \frac{\sum_{i=1}^n di}{n}$$

$$\mu_d = -15,575 \%$$

Cálculo de la desviación estándar.

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (di - \mu_d)^2}{n - 1}}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{1400,728}{15 - 1}}$$

$$S_d = 10,003$$

Nivel de confianza de la investigación: NC = 95%

Nivel de significancia propuesto:  $\alpha = 5\%$

Grados de libertad:  $v = n - 1 = 14$

Cálculo de los estadísticos  $t_t$ :

$$fx = INV.T(\alpha; v)$$

El estadístico resulta:  $t_t = -1,761$

Calculando el estadístico de la hipótesis nula se tiene:

$$t_c = \frac{\mu_d - \mu_o}{\left(\frac{S_d}{\sqrt{n}}\right)}$$

$$t_c = \frac{-15,575 - 2,88}{\left(\frac{10,003}{\sqrt{15}}\right)}$$

$$t_c = -7,15$$

Comparamos los estadísticos.

$$Si \ t_c < t_t \rightarrow Ho \ cae \ en \ región \ de \ rechazo$$

$$Si \ -7,15 < -1,76 \ CUMPLE \rightarrow Ho \ cae \ en \ región \ de \ rechazo$$

Se acepta la hipótesis de investigación  $H_1$ , eso quiere decir que las mejoras son significativas. La aplicación de cal y Terrasil en arcillas mejoran su CBR.

#### 4.1.5 Especificación técnica elaborada

La presente especificación establece los parámetros técnicos recomendados para la estabilización de suelos arcillosos de clasificación CL, con el fin de optimizar su comportamiento, a partir de ensayos de laboratorio realizados.

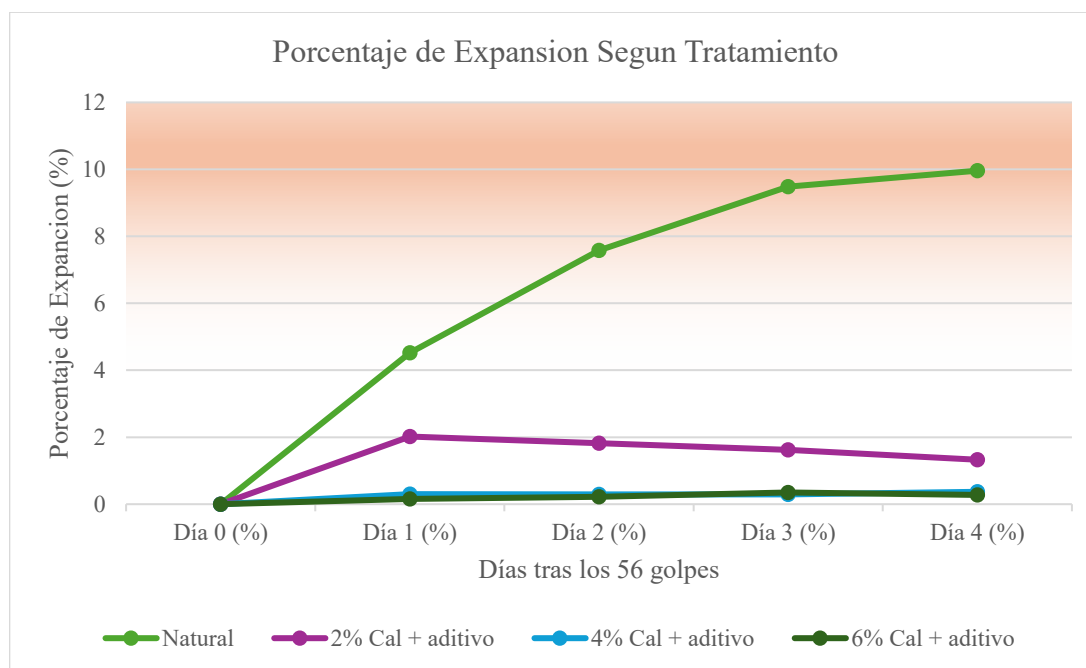
**Tabla 4.7** Especificaciones técnicas recomendadas.

Parámetro	Requisito / Valor recomendado	Explicación y/o uso
Tipo de suelo	Arcilloso de clasificación CL (AASHTO M145)	Suele encontrarse en capas de subrasante, aunque también puede estabilizarse en subbase cuando es necesario.
Expansión máxima (Día 4, AASHTO T-193)	$\leq 1,5 \%$	El suelo natural presentó expansiones de hasta 14,46 %. Con 4 % cal + 0,5 % Terrasil se reduce a $< 0,5 \%$ . Para suelos muy expansivos ( $> 10 \%$ ) usar 6 % cal + 0,5 % Terrasil.
CBR mínimo (AASHTO T-193)	$\geq 8 \%$ para subrasante; $\geq 20 \%$ para subbase	El CBR natural (2,88–4,48 %) es insuficiente. Con 4 % cal + 0,5 % Terrasil se alcanzan valores de 20–35 %, aptos para subrasante hasta subbase.
Método de mezcla	Mezcla en seco de cal con el suelo pulverizado y Terrasil disuelta en el agua	Garantizar homogeneidad antes de añadir agua y compactar con Proctor Modificado.
Control de calidad	Verificación de densidad y humedad in situ; CBR en muestras compactadas	Asegura que las propiedades obtenidas en laboratorio se logren también en obra.

**Fuente:** Elaboración propia

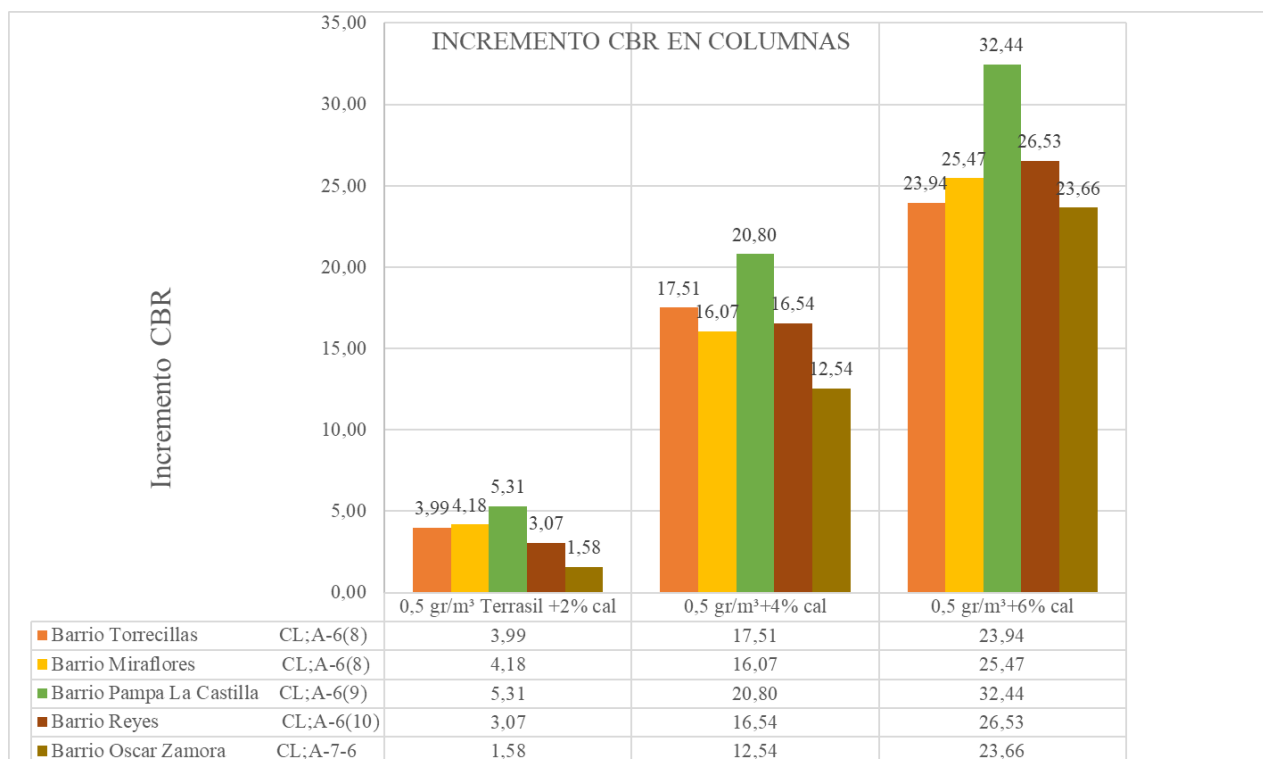
De acuerdo con los ensayos de expansión (AASHTO T-193), el suelo natural presentó expansiones de hasta 14,46 % en Pampa La Castilla y valores superiores al 8 % en la mayoría de las muestras.

**Gráfico 4.4** Expansión de los suelos.



**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 4.5** Columnas del incremento CBR.



**Fuente:** Elaboración propia

Según los resultados de CBR (AASHTO T-193), los suelos naturales evaluados presentan índices entre 2,88 % y 4,48 %, clasificándolos como “muy pobres” para subrasante.

Para alcanzar un  $CBR \geq 20\%$ , se requiere un contenido mínimo de 4 % de cal + 0,5 % de Terrasil, logrando incrementos de hasta 35,88 % en Pampa La Castilla y 30,32 % en Reyes.

En suelos con condiciones particularmente débiles ( $CBR_{\text{natural}} < 3\%$ ), se sugiere la aplicación de 6 % de cal + 0,5 % de Terrasil para alcanzar valores óptimos de soporte.

A continuación se presenta los datos para ajuste de una ecuación cuadrática.

**Tabla 4.8** Datos promedios de CBR 0.1”.

% Cal	CBR Promedio (0.1", 100% DMS)
0	3.626
2	7.252
4	20.318
6	30.034

**Fuente:** Elaboración propia

La ecuación que mejor ajusta la relación entre el porcentaje de cal y el CBR promedio a 0,1” (100% D. Max) es:

$$CBR = 0,387 * x^2 + 2,397 * x + 3,125$$

Donde:

x = porcentaje de cal (%)

CBR = índice de soporte California promedio en %



#### 4.1.6 Costo económico en estabilizaciones de suelo arcilloso

Adicionalmente se considerará la estabilización de dos tipos de subrasante: subrasante de arcilla tratada con aditivos cal + Terrasil y subrasante de arcilla tratada con cemento. Se evaluarán estos tres escenarios en un tramo de carretera con un ancho de vía de siete metros y un espesor de subrasante de 0,20 metros a lo largo de 100 metros.

##### 4.1.6.1 Comparación y análisis económico con otros productos

**Tabla 4.9** Comparación costos económicos (ANEXO VII)

Comparación costos económicos					
Unidad	Cantidad	2% cal + Terrasil	4% cal + Terrasil	6% cal + Terrasil	1% Cemento + Terrasil
m <sup>3</sup>	1,0	248,01 Bs	278,55 Bs	282,38 Bs	218,74 Bs

**Fuente:** Elaboración propia

Costo para 0,1km

Volumen de suelo en 0,1 km

$$V = 100 \text{ m} * 7 \text{ m} * 0,20 \text{ m}$$

$$V = 140 \text{ m}^3$$

Costo subrasante material arcilloso + 2% cal + Terrasil

$$\text{Costo subrasante} = \frac{140 \text{ m}^3 * 248,01 \text{ Bs/m}^3}{100 \text{ m}} = 34721 \text{ Bs} = 4960 \text{ \$us/100m}$$

Costo subrasante material arcilloso + 4% cal + Terrasil

$$\text{Costo subrasante} = \frac{140 \text{ m}^3 * 278,55 \text{ Bs/m}^3}{100 \text{ m}} = 38997 \text{ Bs} = 5571 \text{ \$us/100m}$$

Costo subrasante material arcilloso + 6% cal + Terrasil

$$\text{Costo subrasante} = \frac{140 \text{ m}^3 * 282,38 \text{ Bs/m}^3}{100 \text{ m}} = 39533 \text{ Bs} = 5647 \text{ $us/100m}$$

Costo subrasante material arcilloso + cemento + Terrasil

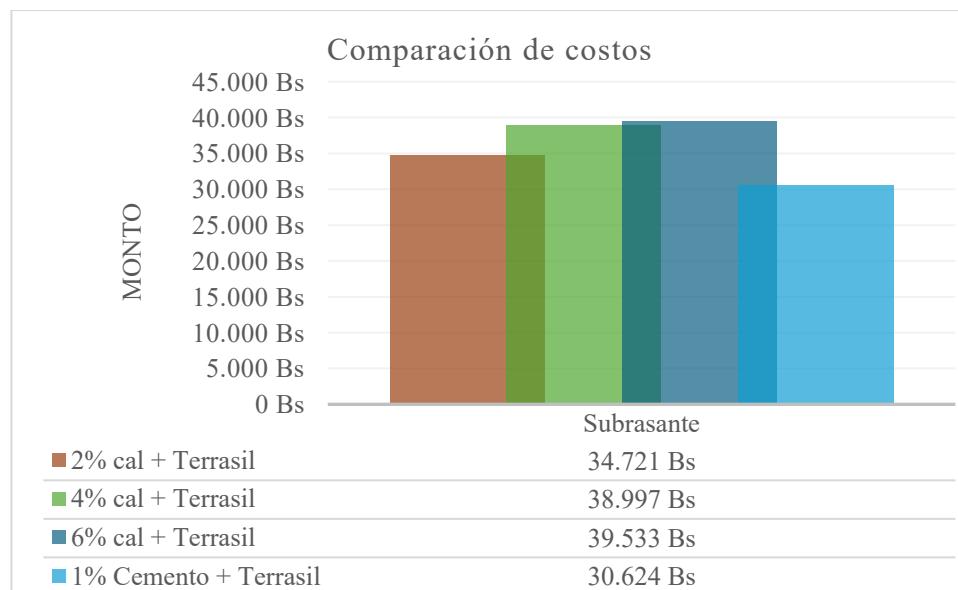
$$\text{Costo subrasante} = \frac{140 \text{ m}^3 * 218,74 \text{ Bs/m}^3}{100 \text{ m}} = 30623 \text{ Bs} = 4374 \text{ $us/100m}$$

**Tabla 4.10** Resultado costo de subrasante para 0,1km

Resultado costos para 0,1km		
2% cal + Terrasil	34721,4 Bs	4960,2 \$
4% cal + Terrasil	38997 Bs	5571 \$
6% cal + Terrasil	39533,2 Bs	5647,6 \$
1% Cemento + Terrasil	30623,6 Bs	4374,8 \$

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfico 4.6** Barras comparación de costos



**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con la guía técnica del proveedor, la combinación de 1% de cemento con Terrasil es una opción recomendada por su buen desempeño sin embargo, en este estudio se comprobó que la mezcla de 4% de cal con Terrasil ofrece resultados muy similares en términos de capacidad de soporte (CBR) igualando lo que dice la guía de un incremento de CBR de 15% a 20% ANEXO 6, siendo más adecuada para suelos arcillosos, que es el tipo de suelo analizado en este proyecto. Aunque el costo del tratamiento con cal es más elevado en comparación con el cemento, se ha evidenciado que esta combinación mejora notablemente las propiedades mecánicas del suelo, cumpliendo con los objetivos del estudio.

## **4.2 Síntesis de resultados**

En el presente proyecto se evaluaron suelos de distintos barrios de la ciudad, predominando en su mayoría suelos clasificados como CL (arcillas de baja a media compresibilidad), lo que permitió la adecuada continuidad de los ensayos. Estos suelos mostraron propiedades adecuadas para el desarrollo de pruebas de laboratorio, con variaciones en sus límites líquidos que facilitaron un análisis más detallado del comportamiento de los aditivos.

El análisis estadístico evidenció una relación significativa entre la aplicación de aditivos y la mejora en los valores del CBR. Se observó que la densidad máxima seca aumentó levemente conforme se incrementó el contenido de aditivos ya que la cal reordena mejor sus partículas, así como también la humedad óptima, efecto atribuido a la reacción química de la cal con los componentes del suelo, lo cual genera una modificación en la estructura interna del mismo. Adicionalmente, el Terrasil debía contribuir a una menor absorción de agua pero por su interacción con la cal vemos un incremento de la necesidad de agua. Ahora sobre la expansión del suelo es significativamente efectivos los aditivos empleados.

Los resultados del ensayo CBR mostraron incrementos importantes en la capacidad de soporte con la adición de cal. Con un 2% de cal, el incremento fue de aproximadamente 2% a 4%; con un 4%, el CBR aumentó entre 12% y 20%; y con un 6%, se alcanzaron valores entre 23% y 32%. Es importante destacar que estos resultados fueron más notables

en suelos con límites líquidos entre 32% y 44%. Además, de acuerdo con las especificaciones del proveedor de Terrasil, se espera que el tratamiento con 1% de cemento logre una mejora en el CBR del orden del 15% al 20%; sin embargo, en este estudio se comprobó que una dosificación de 4% de cal más Terrasil consigue resultados equivalentes, con la ventaja de ajustarse mejor a las condiciones de los suelos estudiados.

En resumen, los suelos tratados con cal y Terrasil mostraron mejoras significativas en su capacidad de soporte, pasando de una clasificación "muy pobre" en su estado natural a categorías "regular" y "bueno", lo que demuestra la eficacia de estos aditivos en la estabilización de suelos arcillosos.

**CAPÍTULO V**

**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

- Basado en los resultados obtenidos, se valida la hipótesis alternativa, demostrando que la incorporación de cal y Terrasil ejerce un impacto significativo en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso, evidenciado por el incremento del índice CBR. Este comportamiento confirma el potencial de dichos aditivos como una solución técnica eficaz y sostenible para optimizar el desempeño de suelos en proyectos de Ingeniería Civil.
- Las zonas identificadas fueron correctamente seleccionadas lo que permite obtener un material homogéneo, adecuado para evaluar el efecto de los estabilizantes propuestos en la región de estudio.
- Se logra una caracterización detallada de las arcillas de baja a media compresibilidad, lo que proporciona una base sólida para la realización de los ensayos de laboratorio, permitiendo evaluar con precisión el efecto de los aditivos aplicados.
- Se observa un aumento sutil en la densidad máxima seca, aún más notable en la humedad óptima y la capacidad de soporte CBR de las arcillas tratadas con cal y Terrasil, mientras que una disminución en la expansión de los suelos arcillosos tratados.
- Al comparar los costos se determina que la cal con Terrasil tiene un costo más elevado que con cemento con el que se comparó en este aspecto, aunque este estudio no se centró en un análisis económico profundo, los resultados técnicos obtenidos con cal y Terrasil son comparables, por lo que sigue siendo una opción viable en suelos como los tratados.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda la aplicación de los porcentajes de cal y Terrasil determinados en este estudio en proyectos de Ingeniería Civil que involucren suelos arcillosos de baja a media compresibilidad de acuerdo con la necesidad de CBR que se requiera.
- Se sugiere un monitoreo continuo de las propiedades mecánicas del suelo durante y después de la aplicación de los aditivos para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad en el tiempo.
- Se recomienda realizar investigaciones adicionales para explorar otros posibles aditivos o combinaciones de aditivos que puedan mejorar aún más las propiedades de los suelos arcillosos y aumentar su versatilidad en diferentes zonas geográficas y ambientales del departamento de Tarija.
- Es fundamental considerar los aspectos ambientales asociados a la aplicación de estabilizantes químicos. En el caso del aditivo Terrasil, si bien se trata de un producto no tóxico y biodegradable, es necesario asegurar que su uso no genere impactos negativos en los ecosistemas circundantes. Por ello, se recomienda realizar evaluaciones ambientales previas e integrales, especialmente cuando se proyecta su aplicación a gran escala, a fin de garantizar la sostenibilidad del proceso de estabilización y la protección del entorno.