

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería civil, comprender con precisión las propiedades y el comportamiento de los suelos arcillosos es fundamental, debido a su influencia directa en diversas aplicaciones constructivas. Estos suelos, caracterizados por su elevada plasticidad y capacidad de retención de agua, representan un desafío significativo para el diseño y ejecución de obras civiles. Por ello, su adecuada manipulación y tratamiento resultan esenciales para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras que se edifican sobre este tipo de terreno.

El diseño y la construcción de vías terrestres dependen en gran medida de una adecuada caracterización del suelo sobre el cual se desarrollarán las obras. En este contexto, los suelos arcillosos representan un reto particular debido a su baja capacidad portante, alta plasticidad y marcada tendencia a retener humedad, condiciones que pueden comprometer la estabilidad y la durabilidad de la infraestructura vial. Por ello, la evaluación precisa de sus propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos resulta fundamental para asegurar la seguridad, funcionalidad y eficiencia de los proyectos viales.

Uno de los métodos empleados para estudiar la dispersión de partículas de suelos arcillosos es el ensayo del densímetro, siendo el modelo 152H uno de los más utilizados en este tipo de estudios. Este ensayo permite obtener información detallada sobre la distribución del tamaño de partículas en suspensión.

Un aspecto fundamental para garantizar la precisión de este ensayo es lograr una adecuada dispersión de las partículas del suelo, lo cual se consigue mediante el uso de agentes dispersantes. Estos productos químicos cumplen la función principal de separar las partículas arcillosas, evitando su aglomeración y asegurando así resultados confiables. No obstante, es importante considerar que los diferentes tipos de dispersantes pueden presentar variaciones en su efectividad, lo que puede impactar de manera significativa la precisión de las mediciones obtenidas.

El proyecto de grado tiene como objetivo realizar una comparación entre distintos agentes dispersantes utilizando el ensayo del densímetro 152H aplicado a una muestra de suelo

arcilloso, con el propósito de identificar cuál de estos agentes resulta más eficaz en la determinación de la distribución granulométrica.

El proyecto de grado tiene como objetivo comparar tres diferentes agentes dispersantes hexametáfosfato de sodio, silicato de sodio y cloruro de sodio mediante el ensayo del densímetro 152H aplicado a suelos arcillosos, en el contexto de su uso para la construcción de obras de ingeniería civil. Esta investigación busca identificar cuál de estos dispersantes permite obtener una distribución granulométrica más precisa y reproducible, garantizando así una caracterización adecuada de los suelos, aspecto fundamental para optimizar los procesos de diseño y construcción de infraestructura civiles. A través de este trabajo, se pretende contribuir al fortalecimiento y optimización de las prácticas de ingeniería de suelos en el ámbito de las obras civiles.

La importancia de este proyecto de grado radica en su potencial para generar impacto tanto en el ámbito académico como en el práctico. A nivel académico, esta tesis representa una valiosa contribución al avance del conocimiento científico sobre las interacciones entre los suelos arcillosos y los agentes dispersantes, enriqueciendo así la comprensión de los procesos involucrados en la caracterización granulométrica. Desde una perspectiva práctica, los resultados obtenidos pueden tener un impacto significativo en la toma de decisiones relacionadas con la selección de agentes dispersantes, optimizando los procedimientos de análisis de suelos y contribuyendo a mejorar la calidad y eficiencia en los proyectos de infraestructuras civiles.

1.1 Antecedentes

El análisis del suelo es fundamental en el ámbito de la ingeniería, especialmente cuando se trabaja con suelos arcillosos. Uno de los métodos más utilizados para evaluar las propiedades físicas del suelo es el ensayo del densímetro 152H. Sin embargo, la precisión de este ensayo puede verse comprometida por la dificultad de separar las partículas del suelo, particularmente en los suelos arcillosos, donde tienden a formar agregados debido a las fuerzas cohesivas. Para abordar este desafío, se emplean agentes dispersantes que facilitan la dispersión de las partículas.

El conocimiento y la confiabilidad de los factores que caracterizan al suelo son de vital importancia, dado que las obras de ingeniería civil, especialmente en el ámbito vial, están directamente influenciadas por las condiciones del terreno. En muchos proyectos de infraestructura, la tierra se utiliza como un elemento fundamental de construcción, lo que hace imprescindible contar con una correcta distribución granulométrica para poder identificar las propiedades del suelo en el que se llevará a cabo la obra. Las condiciones del suelo, como material de construcción en obras viales, deben ser siempre evaluadas, considerando tanto sus características como su composición granulométrica. Este análisis es necesario no solo en proyectos pequeños, basados en suelos aparentemente normales y respaldados por datos estadísticos y experiencias locales, sino también en proyectos de mediana o gran envergadura, donde es esencial realizar una investigación exhaustiva de las propiedades mecánicas del suelo para garantizar la seguridad y estabilidad de la infraestructura.

Los comportamientos de los suelos arcillosos pueden presentar una alta variabilidad, dependiendo tanto de la presencia de agua como de la composición mineralógica del suelo, lo que plantea desafíos significativos en su manipulación y análisis. En este contexto, uno de los factores críticos para obtener resultados precisos en el ensayo del densímetro 152H es la correcta dispersión de las partículas del suelo. La dispersión adecuada es esencial para evitar la aglomeración de las partículas finas, lo cual podría distorsionar los resultados del análisis, afectando la precisión en la caracterización granulométrica del suelo.

El motivo de la comparación del proyecto de grado radica en la importancia fundamental de determinar cuál de los agentes dispersantes es el más efectivo al realizar el estudio de suelos arcillosos, con el objetivo de obtener una caracterización más precisa de las propiedades del suelo en el que se planea desarrollar infraestructuras civiles. Esta investigación también responde a la falta de información generalizada sobre la relevancia del análisis de suelos, ya que, en muchos casos, no se realiza un estudio adecuado del terreno antes de la construcción, lo que conlleva, en el futuro, a problemas estructurales. A través de este estudio, se busca proporcionar un marco comparativo que facilite a los ingenieros civiles y profesionales de la construcción la selección del dispersante más

adecuado, mejorando la precisión en el análisis de suelos. Esto, a su vez, contribuirá a una toma de decisiones más informada en el diseño y ejecución de proyectos civiles, lo que no solo mejorará la calidad de las infraestructuras, sino que también optimizará los costos asociados con su operación y mantenimiento a largo plazo.

1.2 Situación problemática

Los agentes dispersantes, son comúnmente utilizados en la ingeniería civil para mejorar la dispersión de las partículas de arcilla durante el ensayo del densímetro 152H.

La falta de estudios detallados que comparen la efectividad de estos agentes dispersantes en suelos arcillosos constituye una problemática importante. Esta situación se ve agravada por el hecho de que el comportamiento de los suelos varía considerablemente según su composición mineralógica y las condiciones ambientales, lo cual impacta directamente en la precisión de los diseños de obras civiles si no se utilizan los métodos más adecuados para su caracterización.

La problemática principal que se aborda en este estudio se centra en la necesidad de identificar y evaluar cuál de los agentes dispersantes disponibles es el más adecuado y preciso para lograr una correcta dispersión de las partículas en suelos arcillosos. Esta cuestión es de particular relevancia en el campo de la ingeniería civil, ya que la precisión en la dispersión de las partículas de suelo es crucial para la obtención de resultados confiables en los análisis granulométricos. Estos resultados son esenciales para la correcta caracterización de los suelos, un paso fundamental en el diseño y la ejecución de proyectos civiles.

Por lo tanto, es imprescindible realizar una comparación entre estos agentes dispersantes para identificar cuál de ellos ofrece los mejores resultados en el ensayo del densímetro 152H para suelos arcillosos aplicados a proyectos civiles. Esta comparación permitirá seleccionar el dispersante más adecuado y efectivo, lo cual contribuirá significativamente a la mejora de la calidad y durabilidad de las infraestructuras viales.

1.2.1 Problema

¿Cómo una comparación de agentes dispersantes para el ensayo del densímetro 152H en suelos arcillosos podrá definir que agente dispersante es el más adecuado para mejorar la dispersión de partículas en este tipo de suelo?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

1.2.2.1 Relevancia del problema

Este estudio radica en la importancia crítica de identificar un agente dispersante efectivo para lograr una adecuada dispersión de partículas, garantizando así una correcta caracterización de suelos arcillosos aplicada al diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras como edificios, carreteras, represas y otros proyectos de ingeniería civil.

La relevancia del problema radica en su potencial para mejorar la calidad de los ensayos geotécnicos en suelos arcillosos, que son fundamentales para el desarrollo de infraestructuras seguras. Al abordar la incertidumbre asociada con la elección de agentes dispersantes, la investigación puede conducir a una investigación más precisa en la dispersión de partículas de suelos arcillosos, a diseños geotécnicos más confiables y a una mayor seguridad en las obras de ingeniería civil.

1.2.2.2 Factibilidad del problema

Es factible dado que se cuenta con la disponibilidad de recursos necesarios, incluyendo los equipos y materiales requeridos para llevar a cabo los ensayos en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Asimismo, se garantiza la obtención de los agentes dispersantes analizados en esta investigación (hexametáfosfato de sodio, silicato de sodio y cloruro de sodio), así como la accesibilidad a muestras representativas de suelos arcillosos recolectadas en el área urbana de la ciudad de Tarija.

La metodología para la realización de los ensayos de dispersión y el uso del densímetro 152H está claramente definida en la literatura técnica, lo que permite aplicar un protocolo preciso y adecuado para la comparación de los diferentes agentes dispersantes, disponible para su ejecución en el mencionado laboratorio universitario.

Por lo tanto, la factibilidad de este proyecto de grado se encuentra respaldada por la disponibilidad de recursos materiales, la existencia de metodologías estandarizadas, el acceso a muestras representativas y el interés académico en el área, lo que sugiere que el estudio puede llevarse a cabo de manera efectiva, contribuyendo de forma significativa al avance del conocimiento en la caracterización de suelos arcillosos.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

1.2.3.1 Delimitación temporal

La delimitación temporal del proyecto de grado ocurre en tiempo “presente” teniendo un tiempo indefinido de modificación de resultados.

1.2.3.2 Delimitación espacial

La delimitación espacial del proyecto de grado es la mecánica de suelos en donde se usará suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) y suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) extraídos de la ciudad de Tarija de la provincia cercado.

1.3 Justificación

El proyecto de grado se justifica por su relevancia en el campo de la investigación aplicada a suelos arcillosos y el uso de agentes dispersantes. La comprensión del método del densímetro 152H para evaluar y comparar la efectividad de distintos agentes dispersantes resulta esencial en las construcciones de obras civiles, particularmente en proyectos viales que dependen de una adecuada caracterización y tratamiento del suelo.

Esta investigación aportará información valiosa sobre cómo los diferentes agentes dispersantes actúan al momento de desprender las partículas finas y lograr una dispersión más homogénea y precisa en suelos arcillosos, lo que permitirá una toma de decisiones más informada en la selección y aplicación de estos productos. Además, al emplear el método del densímetro 152H, se fortalecerá la base metodológica científica existente, ofreciendo un enfoque preciso y confiable para evaluar la dispersión de partículas en este tipo de suelos.

La elección de este método experimental agrega un valor académico significativo, ya que, si bien el densímetro 152H ha sido utilizado en diversos estudios relacionados con la

dispersión de partículas, su aplicación específica en suelos arcillosos con distintos agentes dispersantes abre la oportunidad de avanzar y refinar las metodologías actuales. Los resultados generados no solo beneficiarán a la comunidad académica, sino que también podrán influir en futuras investigaciones y optimizar prácticas en campos aplicados a la ingeniería civil.

El proyecto de grado aborda un desafío técnico relevante al comparar la efectividad de agentes dispersantes mediante el ensayo con densímetro 152H en suelos arcillosos, constituyéndose en un aporte técnico y científico para proyectos civiles. Los suelos arcillosos presentan propiedades complejas que afectan directamente su comportamiento mecánico y, por ende, la estabilidad y durabilidad de las infraestructuras civiles. La correcta selección del agente dispersante es crucial, ya que influye directamente en la precisión de los resultados del ensayo, permitiendo obtener datos granulométricos más exactos y logrando una caracterización más confiable del suelo. Al incrementar la fiabilidad de los ensayos, esta investigación contribuirá a un diseño más seguro de las estructuras, minimizando los riesgos de falla constructiva.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Comparar los agentes dispersantes (Hexametáfosfato de sodio, Silicato de sodio, Cloruro de sodio) mediante el ensayo del Densímetro 152H en suelos arcillosos; de tal manera se pueda determinar el agente dispersante más adecuado y preciso en la dispersión de partículas de suelos arcillosos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las muestras seleccionadas de suelos arcillosos.
- Determinar el porcentaje óptimo de cloruro de sodio al cual dispersa mejor las partículas de suelos arcillosos.
- Evaluar la influencia de cada agente dispersante en el tiempo de sedimentación de las partículas de suelos arcillosos al finalizar el ensayo del densímetro 152H.
- Determinar porcentajes de arcillas en los suelos arcillosos usando diferentes agentes dispersantes a través del ensayo del densímetro 152H.
- Evaluar la influencia de cada agente dispersante en el diámetro de partícula ultimo y porcentajes de arcilla en suspensión de partículas de suelos arcillosos al finalizar el ensayo del densímetro 152H.
- Determinar gráficamente la distribución del tamaño de partículas finas de los suelos arcillosos con diferentes agentes dispersantes.
- Comparar los resultados obtenidos con los diferentes agentes dispersantes con la finalidad de determinar cuál es más efectivo en la dispersión más homogénea y precisa en las partículas de suelos arcillosos.

1.5 Hipótesis

Si, al comparar los agentes dispersantes mediante el uso del densímetro 152H se podrá afirmar cual es el más adecuado y preciso al momento de dispersar las partículas fino de los suelos arcillosos.

1.6. Operacionalización de las variables

Variable de análisis: agentes dispersantes (defloculantes)

Tabla 1: Operacionalización de las variables

Variable de análisis	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Agentes Dispersantes (Defloculantes)	Los agentes dispersantes son aditivos que se usan en la ingeniería civil con la finalidad de dispersar las partículas arcillosas de una manera efectiva y tener una mejor distribución granulométrica de una muestra de suelo.	Ensayo del densímetro 152H (agente HEXAMETAFOSFATO DE SODIO).	Diámetro de partículas (mm)	Usando HEXAMETA FOSFATO DE SODIO
			porcentaje limo-arcilla (%)	
		Ensayo del densímetro 152H (agente SILICATO DE SODIO).	Diámetro de partículas (mm)	Usando SILICATO DE SODIO
			porcentaje limo-arcilla (%)	
		Ensayo del densímetro 152H (agente CLORURO DE SODIO).	Diámetro de partículas (mm)	Usando CLORURO DE SODIO
			porcentaje limo-arcilla (%)	

Fuente: Elaboración propia

1.7 Identificación del tipo de investigación

La investigación tiene una hipótesis de tipo “Descriptivo”.

Para poder realizar la comparación propuesta en el presente proyecto, se sientan las bases teóricas sobre los agentes dispersantes o de fluctuantes que se usa para el adecuado desprendimiento de las partículas de arcillas.

La variable propuesta no es manipulable por el investigador definiéndola con un diseño no experimental y por tener variable única es de tipo descriptivo.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestra

1.8.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio se define como las muestras de suelos arcillosos que son tratados con un agente dispersante determinado, donde será analizado mediante el ensayo del densímetro 152H, para determinar el más efectivo en la dispersión de partículas.

1.8.2 Población

La población como objeto de estudio serán los suelos arcillosos los cuales comprenden suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) y suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) de la ciudad de Tarija de la provincia cercado.

1.8.3 Muestra

Es un conjunto de muestra de suelo arcillosos los cuales comprenden suelos arcillosos de baja plasticidad CL extraídos de los barrios de San Jorge I, Pampa Galana, Miraflores, 12 de Abril y suelos arcillosos de alta plasticidad CH, extraídos de los barrios de El Constructor, Aranjuez, San Blas, Tablada Grande. Siendo cada una de ella tratada con los agentes dispersantes que se utiliza en el proyecto de grado. Permitiendo comparar cada muestra con cada uno de los agentes dispersantes con las muestras tratadas.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

El presente trabajo de investigación se ajusta más a un muestreo probabilístico (selección aleatoria de elementos) se utiliza técnicas de muestreo aleatorio para seleccionar las muestras de suelos arcillosos que forman parte de la muestra. El muestreo aleatorio que cada suelo arcilloso en la población tenga la misma probabilidad de ser seleccionado.

1.9 Métodos y técnicas empleadas

1.9.1 Métodos

El método que se utilizara para el tema de investigación es:

Ensayo del densímetro 152H

Tabla 2: Método de investigación

Empíricos	Teóricos
Trabajo en campo Observatorio Cuestionario	Análisis Síntesis Hipotético Deductivo
Experimento en Laboratorio	Revisión bibliográfica

Fuente: Elaboración propia

1.10 Alcance de la investigación

La siguiente investigación tiene como finalidad realizar una comparación entre los distintos agentes dispersantes (Defloculantes) en suelos arcillosos. Esta comparación pretende únicamente determinar cuál de los agentes dispersantes permite una dispersión más precisa y mejor al momento de dispersar partículas de suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) y alta plasticidad (CH) en el área urbana de cercado de la ciudad Tarija.

El alcance de investigación puede definirse en la funcionalidad de comparar entre los siguientes agentes dispersantes:

- Hexametafosfato de sodio
- Silicato de sodio
- Cloruro de sodio

Para realizar la comparación de los agentes dispersantes se realizará a través del ensayo del densímetro 152H mediante pruebas realizadas en el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

CAPÍTULO II
GENERALIDADES DE
SUELOS ARCILLOS Y
AGENTES
DISPERSANTE

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Generalidades de suelos

Suelo, puede definirse desde dos puntos de vista el geólogo y el ingenieril. El suelo está clasificado de acuerdo a sus propiedades físicas, como ser: la consistencia y el tamaño de sus partículas (Salinas, Campos, & Guardia, 2004).

El ingeniero compara al suelo como un material de construcción que tienen una importante influencia en el diseño y construcción de una obra de ingeniería. El suelo al igual que otros materiales posee propiedades ingenieriles, que están gobernadas por el tamaño de sus partículas y la forma en que estas interacciones entre sí. Los suelos por lo general, son materiales heterogéneos, por lo que no están compuestos de un mismo material en toda su masa, además son materiales no conservativos, es decir que la masa de suelo al deformarse no recupera su forma original (Campos Rodríguez & Guardia Niño de Guzmán, 2005).

2.2 Origen y composición de los suelos.

El suelo es un material muy complejo que está compuesto de materia sólida, líquida y gaseosa, donde la fase sólida puede ser mineral u orgánica, la porción mineral consiste en partículas de grandes tamaños, formas y composiciones químicas. La fracción orgánica incluye residuos en diferentes etapas de descomposición y organismos en estado de vida activa (Salinas, Campos, & Guardia, 2004).

2.2.1 Mecánica de suelos.

La mecánica de suelos, estudia el comportamiento y las propiedades físicas del suelo fuerzas y agentes externos actúan en la masa de suelo. Esta rama de la geotecnia considera la estructura del suelo, la forma de las partículas que lo constituyen y las fases que éste presenta, concentrándose en las propiedades ingenieriles (González, 2004).

2.2.2 Tipos de suelos

Según las normas aplicadas a la ingeniería Civil, se tiene la siguiente clasificación:

Tabla 3: Tamaño de las partículas de suelos

Nombre de la Organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Asociación Americana de transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.0002	<0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). U: S: Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of reclamation; American Society for Testing and Materials.	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	finos (es decir, limos y arcillas <0.0075)	

Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Definición de arcilla

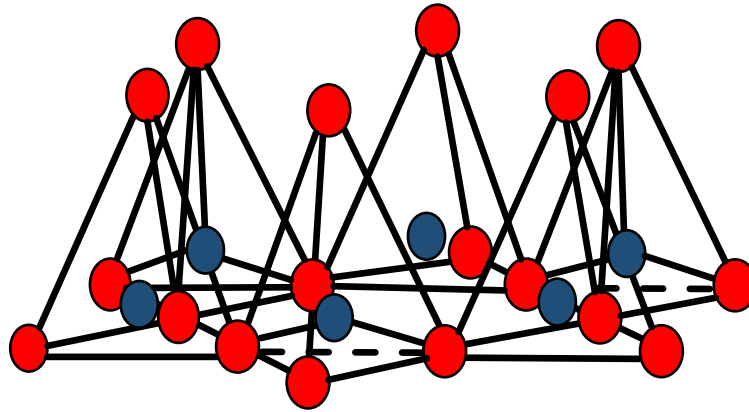
Los suelos arcillosos son una categoría de suelos que se caracterizan por estar compuestos principalmente por partículas de arcilla, las cuales tienen un tamaño de grano menor a 0.002 mm. Este tipo de suelo es un componente clave en la mecánica de suelos y tiene propiedades físicas y mecánicas que son relevantes para diversas aplicaciones en la ingeniería civil y la geotecnia (Bardet, 1997).

2.2.4 Estructura de la arcilla

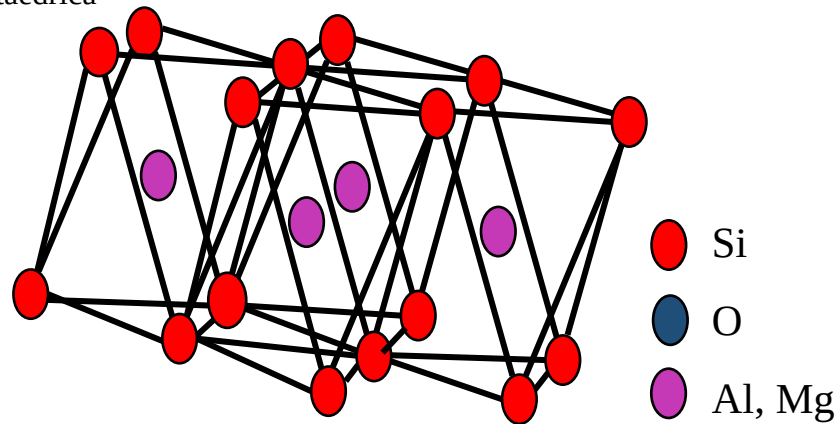
Las arcillas están compuestas por silicatos de aluminio hidratados, estos minerales se ordenan en capas sobrepuestas en forma de láminas, una silícica (unidad tetraédrica) y una aluminica (unidad octaédrica). La forma tetraédrica tiene una descompensación eléctrica, ya que el silicio aporta cuatro cargas positivas (Si^{4+}) frente a las ocho cargas negativas de los cuatro oxígenos presentes en los vértices, por lo que debe unirse a otros cationes para neutralizar sus cargas (Estructura de Las Arcillas, PDF, s. f.).

Figura 1: Estructura de arcilla

a) Unidad tetraédrica



b) Unidad octaédrica



Fuente: (Estructura de Las Arcillas | PDF, s. f.)

2.3 Arcillas de alta plasticidad (CH)

Las arcillas de alta plasticidad son in tipo de suelos arcillosos que se caracteriza por su propiedad de plasticidad y cohesión elevadas. Estas arcillas tienen la capacidad de deformarse considerablemente sin romperse, especialmente en presencia del agua. Dichas características se miden a través del índice de plasticidad (IP), que es la diferencia entre limite líquido y limite plástico. Generalmente, las arcillas de alta plasticidad presentan un IP que exceden los 7.

Las arcillas de alta plasticidad suelen contener minerales como montmoriollinita, que es responsable de su alta capacidad de retener agua, lo que puede ocasionar problemas en estructuras construidas sobre suelos que contienen alta cantidad de arcilla expansivas (Jiménez, J.A., & Chinchilla, I. (2006) comportamiento mecánico de suelos arcillosos).

2.4 Arcillas de baja plasticidad (CL)

Los suelos arcillosos de baja plasticidad son aquellos que contienen una proporción significativa de partículas de arcilla, pero presentan un índice de plasticidad (IP) relativamente bajo. Esto significa que, aunque poseen ciertas características plásticas, su capacidad de deformarse bajo tensión sin romperse es limitada. Generalmente, estos suelos son menos susceptibles a cambios volumétricos drásticos con la variación de humedad en comparación con los suelos arcillosos de alta plasticidad.

Estos suelos son importantes en la ingeniería civil porque tienden a tener mejor estabilidad y menor potencial de expansión o contracción, lo que los hace más adecuados para la construcción de cimientos y estructuras en comparación con suelos de mayor plasticidad (Propiedades y Comportamiento de los Suelos" de J. D. Marston.).

2.5 Contenido de Humedad

El contenido de humedad se define como la relación entre el peso del agua en una masa de suelo determinada y el peso de las partículas sólidas, expresado como porcentaje. El contenido de humedad de los suelos se determina mediante métodos estandarizados, como el ASTM D 2216, que se basa en el peso del agua y el peso del suelo seco (Norma Contenido de Humedad, s. f.).

El contenido de humedad de los suelos está relacionado con la densidad, porosidad y permeabilidad del suelo. La densidad del suelo, a medida que aumenta el contenido de agua, la densidad disminuye y viceversa. También afecta la porosidad del suelo, y a medida que aumenta el contenido de agua, aumenta la porosidad, y viceversa. Y la permeabilidad del suelo, a medida que aumenta el contenido de agua, la permeabilidad disminuye y viceversa (Descriptores geotécnicos (2), 2012).

Para determinar el contenido de humedad se usa el método de secado al horno.

2.5.1 Método de secado al horno

El método de secado en horno se considera un método estándar para determinar el contenido de agua en los suelos, y es ampliamente aceptado y utilizado en aplicaciones de ingeniería y geotécnicas (Contenido de humedad suelos, 2018).

Figura 2: Horno de secado



Fuente: Elaboración propia

2.6 Peso específico

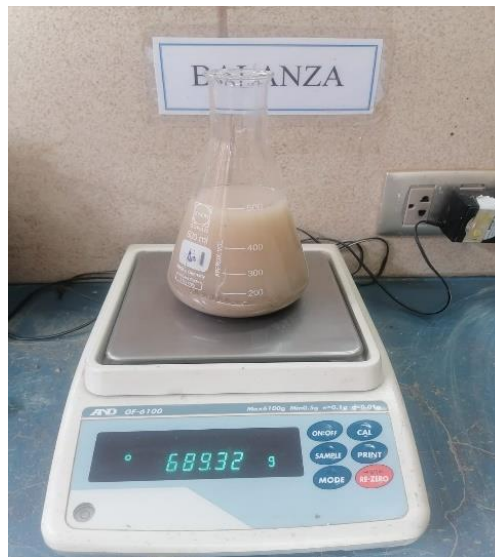
El objetivo es determinar el peso específico de nuestra muestra porque es un valor que necesitaremos para hacer el cálculo del análisis granulométrico mediante el método del densímetro.

2.6.1 Descripción breve del ensayo

Primero se pesa 80 gr de suelo húmedo, colocar la muestra en un plato y mezclar hasta formar pasta suave, luego se introduce dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme

una suspensión uniforme y llenar con agua hasta el 50% de su capacidad se debe extraer todo el aire atrapado dentro de los suelos rodando el frasco, someter el frasco de agua con suelo a efectos de temperatura dentro de un baño maría hasta alcanzar los 60°C en el centro del frasco, someter a un enfriamiento el frasco para repetir el proceso a diferentes temperaturas en un rango de 30°C a 15°C.

Figura 3: Peso específico de suelos arcillosos



Fuente: Elaboración propia

2.7 Granulometría de suelos.

La granulometría de suelos es un parámetro básico en la clasificación de un suelo como material ingenieril, pues define su posible uso y comportamiento, tanto como subrasante de carretera, agregado para mezcla asfáltica, material de relleno de algún corte, entre otros (Salas, Geotecnia y cimientos I, 2013).

El principal parámetro de clasificación obtenido de la curva granulométrica es el porcentaje que pasa la malla N°200, pues es el que determina, si un material clasifica como suelo fino o grueso, pues los pasos a seguir en la clasificación después de determinar si el material es suelo de grado fino o grueso son distintos.

2.7.1 Análisis por tamizaje.

El objetivo principal de esta prueba es obtener la curva granulometría de la muestra, por ende, obtener todos los parámetros que se puedan obtener de la curva. Es el principal parámetro de clasificación que se puede obtener en este tipo de ensayos es el porcentaje pasando la malla N°200, pues las partículas que pasan dicho tamiz no se les puede hacer un análisis granulométrico por mallas, para ello se requiere realizar un análisis granulométrico por densímetro (Calidad de la construcción, 2019).

El tamaño de la abertura de los tamices está especificado en la norma ASTM E11-13, estos diámetros se muestran en la tabla 4. Una vez pasado el material por los tamices, se pesa el material retenido en cada uno y por diferencia de pesos se obtiene el porcentaje que pasa (Bonilla, 2015).

Tabla 4: Diámetro de tamices

Tamiz	Abertura(mm)
N° 1	25
N° 3/4	19
N°3/8	9.5
N°4	4.75
N°6	3.35
N°8	2.36
N°10	2
N°16	1.18
N°20	0.85
N°30	0.6
N°40	0.425
N°50	0.3
N°60	0.25
N°80	0.18
N°100	0.15
N°140	0.106
N°170	0.088
N°200	0.075

Fuente: Norma ASTM E11-13

2.7.2 Método del lavado

El objetivo de este ensayo es graficar una curva granulométrica para poder establecer la distribución de los tamaños de los granos presentes en una masa de suelo.

2.7.3 Descripción breve del ensayo

Se tamiza una muestra de suelo que pase el tamiz N°10 se toma una muestra de 500 gr aproximadamente, la muestra se debe dejar reposar en agua hasta que sature completamente, sin perder material se introduce la muestra en el tamiz N°200, luego se procede a lavar el suelo hasta que el agua pasante tenga un aspecto claro, luego el material que se retiene en la malla N° 200, se lo introduce dentro de un plato para realizar un secado del suelo y se procede a tamizar por las mallas N°40 y N°200 y por último se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas.

Figura 4: Método del lavado



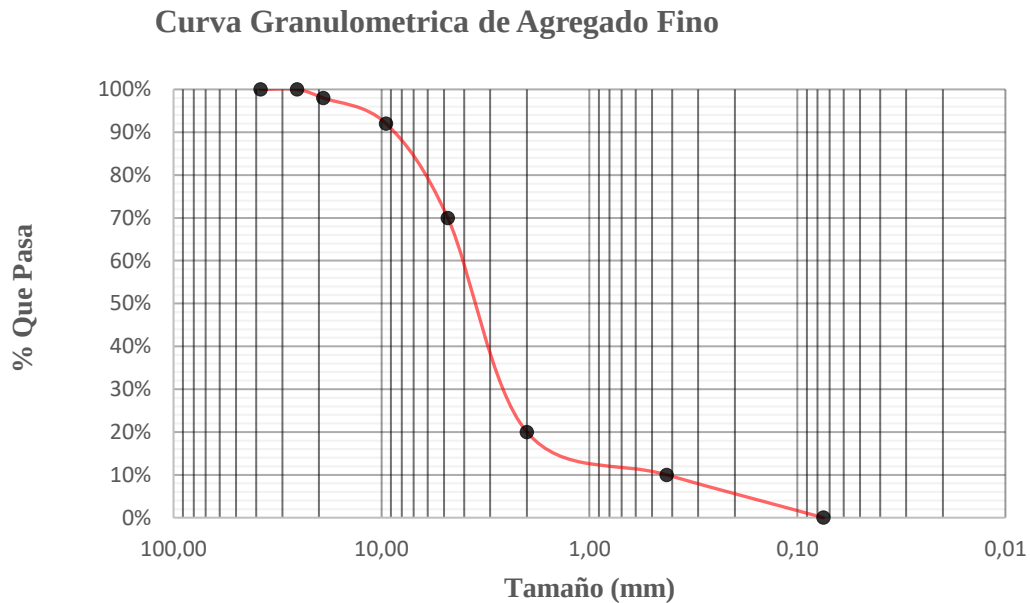
Fuente: Elaboración propia

2.7.4 Curva granulométrica.

Los resultados de análisis de graduación de un suelo se representan en una curva, que se denomina curva granulométrica. Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y los porcentajes pasando en escala aritmética (Calidad de la construcción, 2019).

Los datos más importantes que se pueden obtener de una curva granulométrica son los diámetros característicos (D_n) y las fracciones de arena, grava y finos, refiérase a finos a material que pasa el tamiz N° 200, en la gráfica 1 se detalla una curva granulométrica de un suelo.

Gráfica 1: Curva granulométrica típica de suelos



Fuente: Elaboración propia

2.8 Límites de Atterberg

La consistencia de una propiedad que describe el grado y tipo de cohesión y adhesión que presentan las partículas de suelo, estas propiedades están relacionadas con la resistencia del suelo a deformarse o romperse (Salas, Fundamentos sobre mecánica de suelos, 2013).

“La plasticidad es una propiedad del suelo, que le permite ser moldeado sin fractura. Por moldeado se entiende un cambio brusco en el suelo, de manera inducida, hace que este cambio se convierta en fijo. Esto se debe a las propiedades de los minerales que componen los suelos finos (las arcillas); en esencia, la plasticidad se da porque los minerales y el agua que presenta (agua absorbida) están cargados eléctricamente y estas cargas permiten que la estructura se conserve con mayores alteraciones. El estado de plasticidad del suelo

está en función a la presencia de la humedad y de las propiedades de sus componentes” (Morales, 2015, p.28).

2.8.1 Limite liquido

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresada en por ciento con respecto al peso de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De acuerdo con esta definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida, y según Atterberg es de 25g/cm². La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula (Crespo Villalaz, 2004).

El límite líquido “Se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba ASTM D-4318) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12.7 mm mediante 25 golpes”.

Cuando el suelo puede moldearse, es decir, cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico (Braja, M Das 2012, p. 17).

2.8.1.1 Descripción breve del ensayo

Se tamiza la muestra seca a través de la malla N°40 hasta obtener unos 200g aproximadamente, luego se mezcla el material en el plato con agua hasta la consistencia de una masa espesa, se deposita en la cuchara de casa grande o copa de casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base del aparato, hasta que el surco previamente se ha recortado, se cierran en una longitud de 12 mm. Si el número de golpes para que se cierre el surco es de 25, la humedad del suelo corresponde al límite líquido.

2.8.2 Limite plástico

“Se define como el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3,18 mm de diámetro. La prueba se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (Designación de prueba ASTM D- 4318)”.

El objetivo es hallar el contenido de humedad expresado en porcentaje cuando este se halle en el límite entre el estado plástico y el estado semisólido del suelo, según el procedimiento establecido en las normas.

El índice de plasticidad permite clasificar bastante bien a un suelo. Un IP alto corresponde a un suelo de alta plasticidad. Por el contrario, un IP bajo es característico de un suelo de baja plasticidad (Braja, M Das 2012, p.16).

Figura 5: Límites de Atterberg



Fuente: Elaboración propia

2.8.3 Índice de plasticidad

Se denomina Índice de Plasticidad o Índice plástico (IP) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico tal como lo definen los ensayos. Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Comparando el índice de plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas se puede decir si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso (Crespo Villalaz, 2004).

Esta propiedad se refiere al contenido de humedad en donde se da a notar como un suelo se comporta de manera plástica. Expresado en números es la resta entre los límites mencionados anteriormente: límite líquido y límite plástico (Morales, 2015, p.22).

Es la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP) de un suelo, para la realización de esta prueba se sigue el procedimiento establecido en la normatividad NTP 339.129 (ASTM D-4318).

2.9 Sistema de clasificación del suelo

El proceso de clasificación de suelos en cualquier sistema básico incluye la evaluación de propiedades físicas de los suelos a partir de indicadores, tales como la granulometría y la plasticidad y la aplicación de un procedimiento sistematizado para determinar las clases y subclases correspondientes. A partir de la clasificación del suelo es posible predecir propiedades que tenga el suelo como compresibilidad, resistencia y deformación, además de dar una noción del desempeño del material en su uso ingenieril; al saber el comportamiento de un suelo se pueden anticipar los problemas que éste experimentará ante las solicitaciones de carga de la construcción o puesta en servicio de una obra civil. Para poder clasificar un suelo es indispensable conocer previamente los parámetros clave que solicitan los sistemas de clasificación de suelos, tales como límites líquidos, índice de plasticidad, porcentaje pasando la malla N°200 y partículas inferiores a 0,002 mm. Estos parámetros se obtienen a partir de los ensayos de límites de Atterberg y granulometría, dichos parámetros se obtienen a partir de ensayos de laboratorio (Salas, Fundamentos sobre mecánica de suelos, 2013).

Existen dos métodos de clasificación mundialmente aceptados, el método SUCS y el método AASHTO. El método AASHTO es utilizado principalmente en la construcción de caminos y carreteras, mientras que SUCS es el más utilizado por los ingenieros geotécnicos.

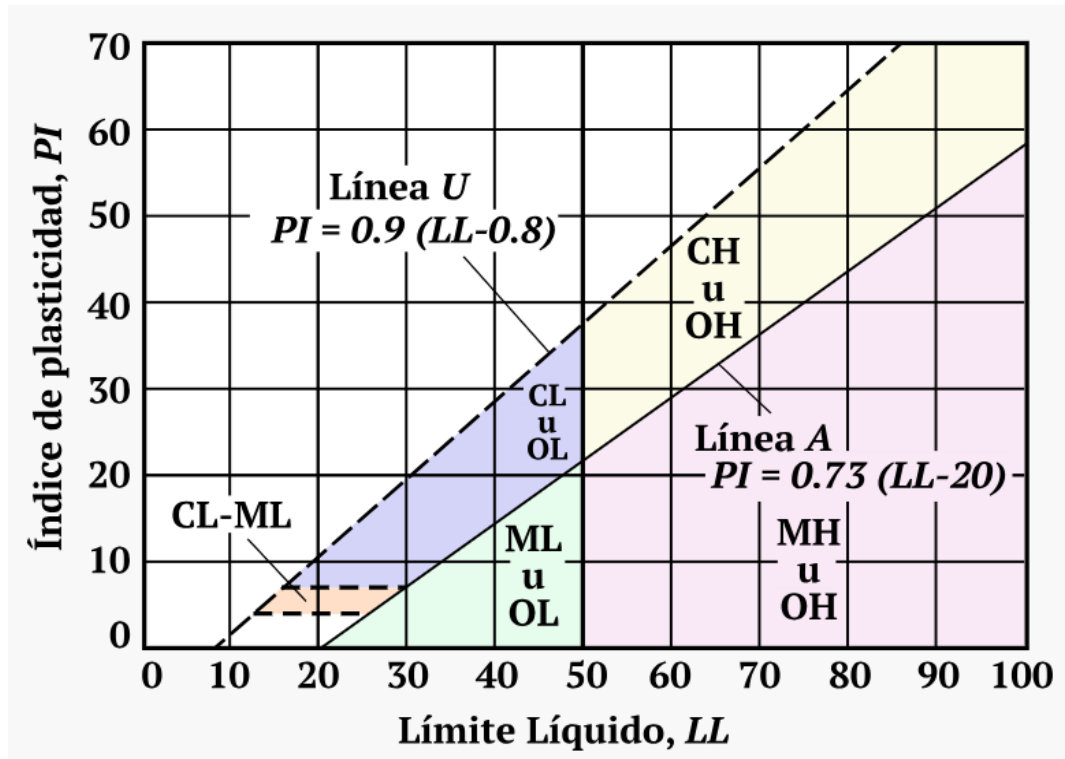
Este sistema SUCS, se encuentra estandarizado por la norma ASTM D2487, llamada “clasificación de suelos para usos ingenieriles”, en la gráfica, se detalla un esquema con los pasos a seguir, como se evidencia en dicha gráfica el primer paso es determinar si un suelo es de grano fino o grueso, pues la clasificación de un suelo grueso dependerá de la forma de su curva granulométrica y la de un suelo fino dependerá de su pasividad.

2.9.1 Carta de plasticidad

Para clasificar el suelo fino, es necesario conocer algunos límites de consistencia, como

el límite líquido (LL) e índice de plasticidad (IP). Estos parámetros se pueden obtener a través de la metodología mostrada en la normativa ASTM D4318.

Figura 6: Carta de plasticidad



Fuente: Olavarría., 2014

Esto hace que la carta de plasticidad permita clasificar al suelo fino en 4 tipos:

- CL: Arcillas de baja plasticidad.
- ML: Limos de baja plasticidad.
- CH: Arcillas de alta plasticidad.
- MH: Limos de alta plasticidad.

2.10 Densímetro 152H

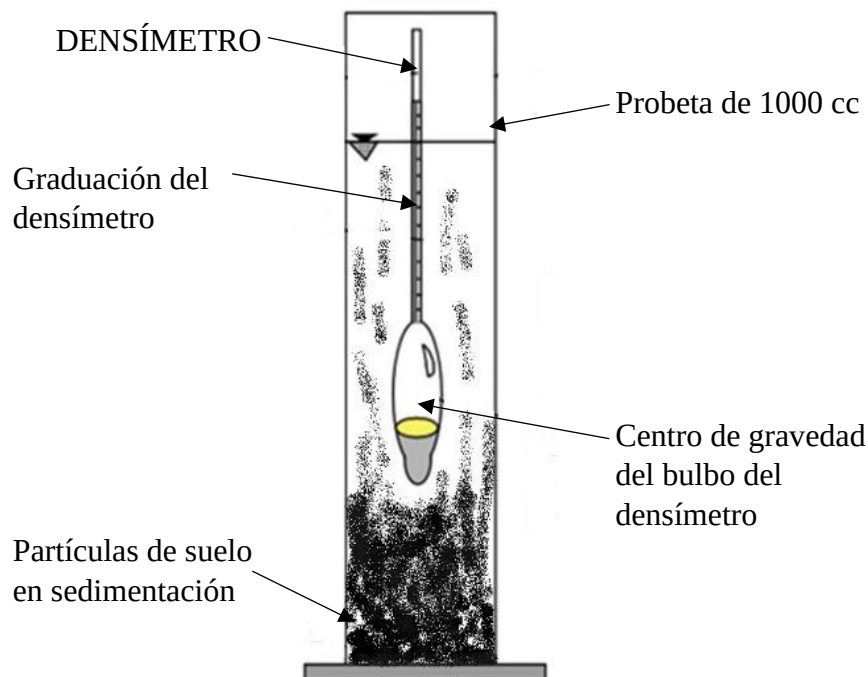
El densímetro es un instrumento que sirve para determinar la densidad relativa de los líquidos son necesidad de calcular antes su masa y volumen. Normalmente, está hecho de vidrio y consiste en un cilindro hueco con un bulbo pesado en su extremo para que pueda flotar en posición vertical basado en el principio de Arquímedes. Tiene un lastre de

mercurio en su parte inferior (que le hace sumergirse parcialmente en el líquido) y un extremo graduado directamente en unidades en densidad. El nivel del líquido marca sobre la escala el valor de su densidad (Braja M. Das).

Este método de prueba cubre la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de la porción de suelo de grano fino. El método de sedimentación o densímetro se utiliza para determinar la distribución del tamaño de partícula (gradación) del material que es más fino que el tamiz N°200 ($75\ \mu\text{m}$) y mayor que aproximadamente $0.2\ \mu\text{m}$. La prueba se realiza en material que pasa el tamiz N°10 ($2.0\ \text{mm}$) o más fino y los resultados se presentan como el porcentaje de masa más fino versus el logaritmo del diámetro de partícula.

Este método se puede utilizar para evaluar la fracción de grano fino de un suelo con una amplia gama de tamaños de partículas combinando los resultados de la sedimentación con un análisis de tamiz que da como resultado la curva de gradación completa. El método también se puede utilizar cuando no hay partículas de grano grueso o cuando la gradación del material de grano grueso no es necesaria (Norma ASTM D7928 – 17).

Figura 7: Ensayo del densímetro 152H



Fuente: Guía de laboratorio de suelos I

Ley de Stokes

El método de sedimentación se basa en el análisis de la sedimentación gravitacional de partículas en un fluido. Una suspensión de suelo dispersa se transfiere a un cilindro de sedimentación, se llena hasta un volumen definido, y se agita para obtener una distribución uniforme de partículas. Después de agitar, sacudir o girar el cilindro, el fluido se detiene y las partículas en la suspensión caen con una velocidad de sedimentación que está relacionada con su tamaño. Dependiendo de la distribución del tamaño de las partículas, su concentración en cualquier profundidad de la suspensión del suelo disminuye continuamente con el tiempo, porque las partículas sedimentadas más grandes que un tamaño determinado ha pasado la profundidad.

La ley de Stokes tiene varios supuestos que son: las partículas son esféricas y lisas; no hay interferencia entre las partículas; no hay diferencia entre la corriente en el medio del contenedor y los lados; el flujo es laminar; y las partículas tienen la misma densidad. Estos supuestos se aplican a partículas de suelo de diversas formas y tamaño.

La ley de Stokes describe la velocidad de sedimentación terminal v (m/s) de partículas esféricas en función de su diámetro D (mm).

Los métodos del densímetro hacen uso de mediciones de las concentraciones de sedimentos (o su densidad de suspensión equivalente) en algunas ocasiones y en profundidades predefinidas dentro del cilindro de sedimentación. Las partículas con diámetros mayores que un cierto valor se han asentado más allá de la profundidad de medición ya no forman parte de la suspensión anterior. El tiempo de asentamiento a una temperatura dada se puede calcular a partir de la ecuación (1). Para partículas de diámetros de 0.063mm, 0.020mm, 0.0063mm y 0.002mm, los tiempos de asentamiento para alcanzar una profundidad de 20 cm son del orden de 100, 101, 102 y 103 minutos. Los diámetros corresponden en la clasificación alemana de texturas del suelo a los límites de tamaño de arena a limo grueso, limo medio, limo fino y arcilla, respectivamente, y estos tiempos de asentamiento reflejan la dependencia cuadrática de la velocidad de sedimentación sobre el diámetro de partícula (Technical Paper; The Of Type, Concetration And Volume Of Dispersing Agent On The Magnitude Of The Clay Content Determined By The Hydrometer Analysis, Jornal of the South African, Institution of Civil Engineering, ISSN 1021-2019, Vol. 58).

2.11 Ensayo del densímetro 152H

En el presente trabajo se realizarán análisis de granulometría por medio del densímetro, los cuales se llevarán bajo la norma (Norma ASTM D422).

Teniendo en cuenta que la granulometría por densímetro ha sido de gran importancia en la investigación de suelos. Al identificar sus componentes finos, la mayoría de las investigaciones del tema mencionado están enfocadas en reconocimiento de diversos tipos de materiales fino, como lo son el limo y la arcilla comúnmente encontrados; como es el caso del artículo “SHORTCOMINGS IN THE ESTIMATION OF CLAY FRACTION BY HYDROMETER”, artículo que centra su estudio en el comportamiento de la arcilla y de su dispersión (shortcomings in the estimation of clay fraction by hydrometer).

Dado que el contenido de arcilla de un suelo se utiliza para determinar su actividad, y que a su vez se utiliza para propósitos de diseño, es muy importante determinar con precisión el contenido de arcilla de los suelos. Las determinaciones inexactas de contenido de arcilla tienen resultó en soluciones de diseño inapropiadas, que incluso han llevado a daños inaceptables a las estructuras. En Sudáfrica hay un problema con la determinación precisa del contenido de arcilla de los suelos. Esta dificultad, que fue expresado formalmente por Jacobsz y Day (2008), refuerza la necesidad de investigar todas las variables de la prueba del densímetro con una visión para mejorar su precisión y tal vez para estandarizar la prueba a nivel nacional, y posiblemente, en el futuro, internacionalmente (norma sans 3001-gr32014 – south african national estándar).

2.11.1 Descripción del ensayo del densímetro 152H

2.11.2 Análisis granulometría por medio del densímetro 152H

A continuación, se realizará una breve descripción sobre el ensayo realizado para por medio del densímetro para análisis granulométrico.

Equipo.

- Tamices – De 4.75 mm (N°4), de 0.425 mm (N°40) y de 0.075 mm (N°200).
- Tamizadora mecánica.
- Aparato agitador.
- Densímetro. Para estos ensayos se utilizó un densímetro 152H, va de 5 a + 60. Se identifica como 152H y está calibrado para el supuesto que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20° C (68° F) y que el suelo en suspensión tiene una gravedad específica de 2.65.
- Cilindro de vidrio para sedimentación: De unos 460 mm (18") de alto, y 60 mm (2.5") de diámetro y marcado para un volumen de 1000 ml a 20° C (68°F). El diámetro interior debe ser tal que la marca de 1000ml esté a 360 ± 20 mm (14 ± 1.0 ") desde el fondo, en el interior del cilindro.
- Termómetro de inmersión con apreciación de 0.5° C (0.9° F). Horno capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta $110^\circ \pm 5^\circ$ C ($230^\circ \pm 9^\circ$ F).
- Baño de Agua o Cuarto de temperatura constante.
- Vaso de vidrio (Beaker).
- Varilla de vidrio.
- Agente Dispersante. Una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.
- Agua destilada.

2.11.3 Calibración Del densímetro

El densímetro debe ser calibrado para determinar la profundidad efectiva en términos de lectura de densímetro, como en estos ensayos se utilizó el densímetro 152H, la profundidad efectiva se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla 5: Densímetro 152H

Profundidad Efectiva

lect. Corr.	"L"	lect. Corr.	"L"
	cm		cm
0	16.3	31	11.2
1	16.1	32	11.1
2	16	33	10.9
3	15.8	34	10.7
4	15.6	35	10.6
5	15.5	36	10.4
6	15.3	37	10.2
7	15.2	38	10.1
8	15	39	9.9
9	14.8	40	9.7
10	14.7	41	9.6
11	14.5	42	9.4
12	14.3	43	9.2
13	14.2	44	9.1
14	14	45	8.9
15	14.8	46	8.8
16	13.7	47	8.6
17	13.5	48	8.4
18	13.3	49	8.3
19	13.2	50	8.1
20	13	51	7.9
21	12.9	52	7.8
22	12.7	53	7.6
23	12.5	54	7.4
24	12.4	55	7.3
25	12.2	56	7.1
26	12	57	7
27	11.9	58	6.8
28	11.7	59	6.6
29	11.5	60	6.5
30	11.4		

Fuente: Norma ASTM D422

2.11.4 Preparado del dispersante

- Preparar 125 ml de solución (agua con dispersante), el porcentaje del dispersante es aproximado en un 4% en peso de lo que pesa 1000 ml de agua.
- La muestra se coloca en un recipiente y mezclarlo con los 125 ml de solución al 4% de dispersante.
- Dejar a la muestra reposar durante 24 horas, luego transferir a un vaso donde se pueda batir el material, en este vaso se puede aumentar agua hasta $\frac{2}{3}$ del volumen total del vaso, comenzar el batido durante un periodo de 1 minuto (cuando el tiempo de sedimentación es una hora hay que batir durante 5 minutos).
- En este periodo, el dispersante tendrá la misión de neutralizar todas las cargas que tienen las partículas del suelo y que generalmente están formando pequeños grumos o terrones, que son necesarios disolver.
- Pasado ese periodo, con el cuidado necesario, desde el plato de porcelana o loza, donde se encuentra la mezcla de suelo y solución al 4%, depositar en el vaso de la batidora y comenzar la operación de batir durante uno o dos minutos, hasta que la fuerza centrífuga logre deshacer los grumos o terrones de cada partícula.
- Una vez realizada esta operación, debe esperar hasta el siguiente paso.

2.11.5 Procedimiento

- Si se conoce la corrección por dispersante y punto cero, C_d y la corrección por menisco, C_m , se debe apuntar los valores para los respectivos cálculos más adelante.
- Se determina la gravedad específica de los sólidos, G_s .
- Seguido de esto se lleva la suspensión al cilindro de sedimentación de 1 litro. Esta debe ser llevada a la temperatura que se espera tendrá el laboratorio durante el ensayo.
- Un minuto antes de comenzar el ensayo, se tapa el cilindro de sedimentación con la mano o con un tapón adecuado, se agita la suspensión durante varios segundos, para remover los sedimentos del fondo y lograr que la suspensión sea uniforme, esta agitación se debe llevar durante un minuto, con movimientos hacia arriba y

hacia abajo. Otra alternativa para la suspensión de la misma puede ser agitada mediante un agitador manual, durante 1 minuto.

- Al terminar el minuto de agitación, se coloca el cilindro sobre una mesa. Se pone en marcha el cronometro, si hay espuma se debe quitar con un pedazo de papel absorbente. En seguida se introduce lentamente el densímetro en la suspensión (al introducirlo y extraerlo se debe tener cuidado para no alterar la suspensión).
- Una vez hecho esto se deben anotar las dos primeras lecturas de densímetro, al minuto y a los dos minutos de haber colocado el cilindro sobre la mesa (estas lecturas se deben realizar en el tope del menisco), ya realizadas esas dos lecturas, se extrae cuidadosamente el densímetro de la suspensión y se coloca en un cilindro graduado con agua destilada, se debe tener especial cuidado para no dejar el bulbo mucho tiempo en la suspensión ya que el material se puede adherir a este y puede causar errores en el ensayo.
- Luego de esto se introduce el densímetro nuevamente y se realizan lecturas a los 4, 8, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440 minutos del inicio de la suspensión, en cada una de las lecturas se debe tener especial cuidado al extraer el densímetro.
- Después de cada lectura, se debe tomar la temperatura, ya que los cambios de temperatura de la suspensión durante el ensayo afectan los resultados, para que no haya cambios de temperatura bruscos se debe mantener el cilindro alejado de hornos, rayos de sol o ventanas abiertas. Para que controlar los efectos de la temperatura se puede colocar el cilindro graduado en baño maría (esto en los primeros minutos de haber empezado el ensayo).

2.11.6 Corrección de las lecturas del densímetro 152H

Antes de iniciar con los cálculos, las lecturas de densímetro se deben corregir por menisco, temperatura, dispersante y punto cero.

- **Corrección por menisco (Cm)**

Los densímetros se calibran para leer correctamente a la altura de la superficie del líquido. La suspensión de suelo no es transparente y no es posible leer directamente a la superficie del líquido; por lo tanto, la lectura del densímetro se debe realizar en la

parte superior del menisco. La corrección por menisco es constante para un densímetro dado, y se determina introduciendo el densímetro en agua destilada o desmineralizada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua. Los valores corrientes de C_m son: Densímetro tipo 152 H

$$C_m = 1.0 \text{ g/litro}$$

- **Corrección por temperatura (C_t)**

En el caso de no disponer de un baño de agua o de un cuarto de temperatura constante que permita realizar toda la prueba a 20°C, a cada una de las lecturas de densímetro se debe aplicar también un factor de corrección por temperatura, el cual debe sumarse algebraicamente a cada lectura. Este factor puede ser positivo o negativo, dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar cada lectura. El valor del factor de corrección por temperatura para cada lectura de densímetro se obtiene de la siguiente tabla.

Tabla 6: Valores de corrección por temperatura

Temperatura °C	C_t
15	-1.1
16	-0.9
17	-0.7
18	-0.5
19	-0.3
20	0
21	0.2
22	0.4
23	0.7
24	1
25	1.3
26	1.6
27	2
28	2.5
29	3.05
30	3.8

Fuente: Norma ASTM D422

- **Corrección por agente de dispersión y por desplazamiento del punto cero (Cd)**

Los granos de suelos muy finos en suspensión tienden normalmente a flocular y se adhieren de tal forma que tienden a precipitarse juntos. Por lo tanto, es necesario añadir a las muestras un agente de disgregación para evitar la floculación durante el ensayo. La adición de un agente dispersante produce aumento en la densidad del líquido y obliga a realizar una corrección a la lectura observada en el densímetro observado. Así mismo, como la escala de cada densímetro ha sido graduada para registrar una lectura cero o lectura inicial a una temperatura base, que generalmente es 20°C (68°F), existirá un desplazamiento del punto cero, y las lecturas de densímetro observadas también deberán corregirse por este factor. El procedimiento para determinar la corrección por defloculante y punto cero consistirá en los pasos siguientes: Se selecciona un cilindro graduado de 1000 ml de capacidad y se llena con agua destilada o desmineralizada con una cantidad de defloculante igual a la que se empleará en el ensayo. Si en el ensayo no se va a utilizar defloculante, llénese el cilindro sólo con agua destilada o desmineralizada. En este caso la corrección será por punto cero. Se realiza, en la parte superior del menisco, la lectura del densímetro a continuación, se introduce un termómetro para medir la temperatura de la solución. Se calcula la corrección por defloculante y punto cero (Cd) mediante la fórmula:

$$Cd = T + C_m \pm C_t$$

Donde:

T= Lectura del densímetro, en agua con dispersante únicamente.

C_m= Corrección por menisco

C_t= Corrección por temperatura sumada algebraicamente

2.11.7 Cálculos

- Lectura de densímetro corregida: Se calculan las lecturas de densímetro corregidas por menisco (R), sumándole a cada lectura de densímetro no corregida (R'), la corrección por menisco C_m, o sea:

$$R = R' + Cm$$

- Cálculo del diámetro de las partículas (D): El diámetro máximo, D, de las partículas en suspensión correspondiente el porcentaje indicado por una lectura en el densímetro, debe ser calculado usando la Ley de Stokes. De acuerdo con la Ley de Stokes:

$$D = K \sqrt{\frac{l}{t}}$$

Donde

T= Tiempo transcurrido en minutos

L= Profundidad efectiva en mm

Tabla 7: Valores del K para el cálculo del diámetro de partícula

Temp e. °C	Peso especifico de las particulas de suelo								
	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8	2.85
10	0.0166	0.0161	0.016	0.1583	0.1555	0.0153	0.0151	0.0149	0.0147
11	0.0164	0.0161	0.0158	0.0156	0.0153	0.0151	0.0149	0.0147	0.0145
12	0.0161	0.0159	0.0156	0.0154	0.0151	0.0149	0.0147	0.0145	0.0143
13	0.0159	0.0157	0.0154	0.0152	0.0149	0.0147	0.0145	0.0143	0.0141
14	0.0157	0.0154	0.0152	0.015	0.0147	0.0145	0.0143	0.0141	0.0139
15	0.0155	0.0153	0.015	0.0148	0.0145	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137
16	0.0153	0.0151	0.0148	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0136
17	0.0152	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.014	0.0138	0.0136	0.0134
18	0.0149	0.0147	0.0144	0.0142	0.014	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
19	0.0144	0.0145	0.0143	0.014	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0131
20	0.0146	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131	0.0129
21	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127
22	0.0142	0.014	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128	0.0126
23	0.014	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.013	0.0128	0.0126	0.0124
24	0.0139	0.0137	0.0134	0.0132	0.013	0.0128	0.0126	0.0125	0.0123
25	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0122
26	0.0136	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122	0.012
27	0.0134	0.0132	0.013	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.012	0.0119
28	0.0133	0.013	0.0128	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119	0.0118
29	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.012	0.0118	0.0116
30	0.013	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.012	0.0118	0.0117	0.0115

Fuente: NORMA ASTM D422

- **Cálculo del porcentaje más fino al tamaño “D” o Porcentaje de suelo en suspensión:**

Las lecturas del densímetro deben corregirse aplicando todas las correcciones, (por menisco, por temperatura si es pertinente y por dispersante y punto cero de las escalas de densímetro). El porcentaje de suelo en dispersión determinado a partir de la lectura del densímetro corregida está afectado por la gravedad específica del suelo, las escalas de los densímetros están elaboradas para un valor de G de 2.65.

Para calcular el porcentaje de partículas de diámetro más fino que el correspondiente una lectura de densímetro dada, se utiliza la siguiente formula: Para densímetro 152H (Análisis Granulométrico Por Medio Del Densímetro, Norma ASTM D422).

$$\% \text{ mas fino} = \frac{R_{\text{corregida}} * a}{w} * 100$$

Wo= Masa de la muestra del suelo secado al horno

a= Factor de corrección por gravedad especifica

Tabla 8: Valores de “a” para diferentes gravedades específicas

Gs	"a"
2.95	0.94
2.85	0.96
2.8	0.97
2.75	0.98
2.7	0.99
2.65	1
2.6	1.01
2.55	1.02
2.5	1.03
2.45	1.05

Fuente: ASTM D422

2.12 Agentes dispersantes.

En ingeniería civil, los agentes dispersantes son agentes químicos que son utilizados para dispersar las partículas de grano fino que requieren el uso de un dispersante para que las partículas en suspensión se comporten individualmente y sedimenten con una velocidad diferencial entre si dependiendo de su radios, forma, peso y densidad.

Los agentes dispersivos neutralizan las cargas eléctricas, permitiendo que las partículas se precipiten de forma individual.

Su función es asegurar una distribución uniforme de las partículas en el material, mejorando la cohesión, la estabilidad y la resistencia a la deformación bajo carga. Estos agentes son esenciales para optimizar las propiedades mecánicas de los suelos y los agregados utilizados en la construcción de carreteras, ferrocarriles y otras infraestructuras (Burland, J. B. (1990). "On the Use of the Hydrometer for Soil Particle Size Analysis." Geotechnique).

2.12.1 Importancia en el ensayo del densímetro 152H

Medición Precisa: En el ensayo del densímetro 152H, se mide la sedimentación de las partículas en una suspensión. Si las partículas floculan, se agrupan y sedimentan más rápidamente, lo que llevaría a errores en la determinación de la distribución del tamaño de partículas.

Optimización de resultados:

Los dispersantes son herramientas esenciales en el análisis de suelos arcillosos, especialmente en el ensayo del densímetro, donde su capacidad para mantener las partículas en suspensión asegura mediciones precisas y fiables (Karls, M., & Terzaghi, K. (1975). Fine-Grained Soil Behavior." Geotechnical Engineering).

En la presente investigación se utilizó tres tipos de agentes dispersantes para suelos arcillosos del área periurbana de la ciudad de Tarija los cuales son los siguientes.

2.12.2 Hexametáfosfato de sodio

El hexametáfosfato de sodio es un compuesto químico utilizado como agente dispersante en suelos arcillosos. Comúnmente es el dispersante más utilizado de acuerdo a la norma ASTM para la dispersión de partículas de suelos en el ámbito de la ingeniería vial (Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. New York: John Wiley & Sons).

- **Fórmula Química:** $\text{Na}_6 [(\text{PO}_3)_6]$.
- **Tipo:** Sal de ácido meta fosfórico, soluble en agua.

2.12.3 Silicato de sodio

El silicato de sodio, conocido también como vidrio líquido, es un compuesto químico que también es utilizado como agente dispersante en suelos arcillosos. Este agente dispersante es también muy utilizado en el ámbito de mecánica de suelos el cual se usa para dispersar partículas de suelos (Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. New York: John Wiley & Sons).

- **Fórmula Química:** Na_2SiO_3 .
- **Aspecto:** Se presenta como un líquido viscoso o en forma de polvo seco. Es soluble en agua.

2. 12.4 Cloruro de sodio

El cloruro de sodio es un compuesto químico que es comúnmente conocido como sal de mesa, es un compuesto que puede desempeñar un papel en la dispersión de partículas en suelos arcillosos, aunque su uso como agente dispersante es menos común en comparación con otros compuestos (Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). "Defining and Assessing Soil Quality." Soil Science Society of America Journal).

- **Fórmula Química:** NaCl
- **Aspecto:** Se presenta como cristales blancos o un polvo granular.

CAPÍTULO III
RELEVAMIENTO DE
INFORMACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

En esta sección se presenta paso a paso todos los procedimientos que se llevan a cabo para realizar levantamientos de muestras de suelos para después poder realizar los diferentes ensayos que permitirán describir y analizar las propiedades del suelo natural.

Para ello primeramente se debe identificar el tipo de suelo a ser estudiado en la presente investigación lo cual se ha escogido arcillas de alta plasticidad (CH) y arcillas de baja plasticidad (CL), El estudio se focaliza en el área urbana de provincia Cercado-Tarija.

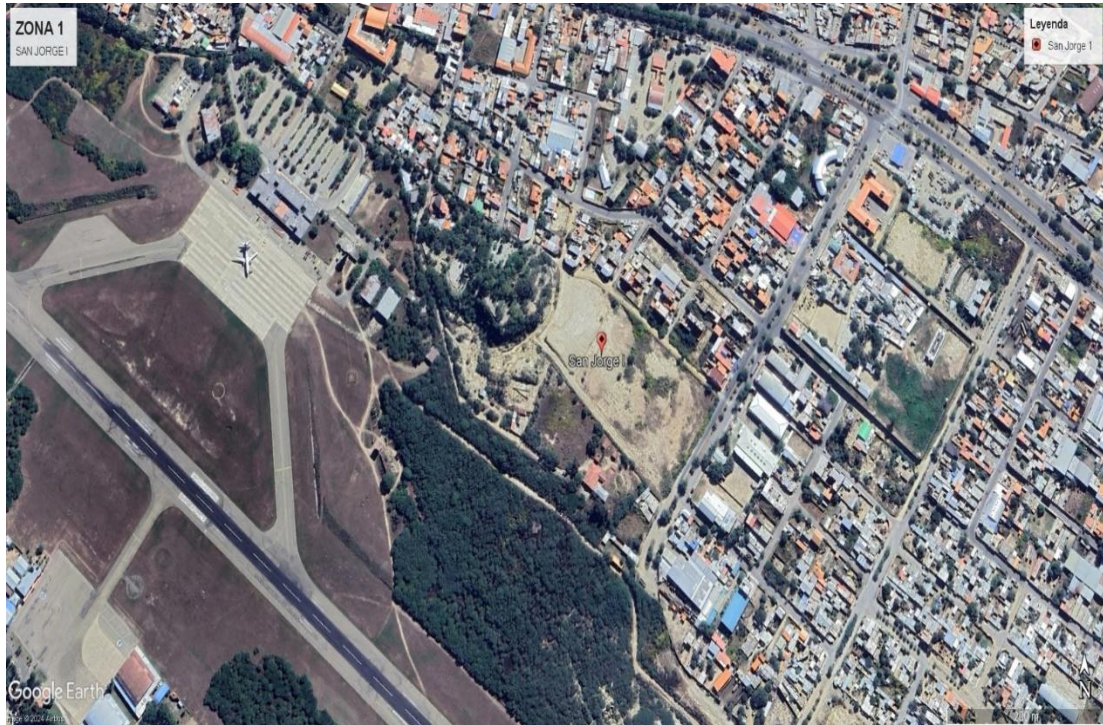
3.1. Ubicación.

Las muestras recolectadas para la investigación es un muestreo no probabilístico, la técnica a usar será el muestreo causal o accidental para obtener muestras representativas donde se deberá realizar un sondeo que se hizo de diferentes barrios de la ciudad Tarija con el fin de caracterizar suelos de alta plasticidad y baja plasticidad para así poder obtener muestras de diferentes zonas del área urbana de la ciudad de Tarija.

3.1.1 Zona San Jorge I

El barrio San Jorge I está ubicado en la provincia Cercado del departamento de Tarija, se encuentra ubicada a 7 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 8: Imagen satelital de extracción de muestras en el barrio San Jorge I



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°32'56.46"S

Longitud: 64°42'15.51"W

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 323510.00 m E

Coordenada Norte: 7616125 m S

3.1.2 Zona Pampa Galana

El barrio pampa galana está ubicado en la provincia Cercado departamento de Tarija, se encuentra a 4 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 9: Imagen satelital de extracción de muestras en el barrio Pampa Galana



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°31'24.95"S

Longitud: 64°42'28.72"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 323099.15 m E

Coordenada Norte: 7618935.05 m S

3.1.3 Zona Miraflores

La zona de Miraflores ubicada en la provincia Cercado del departamento de Tarija, se encuentra ubicada a 3 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 10: Imagen satelital de la zona de extracción de muestra en el barrio Miraflores



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°32'52.27"S

Longitud: 64°44'8.45"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 320259.00 m E

Coordenada Norte: 7616218.00 m S

3.1.4 Zona 12 de Abril

La zona del barrio 12 de abril ubicada en la provincia Cercado del departamento de Tarija, se encuentra ubicada a 4.5 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 11: Imagen satelital de la zona de extracción de muestra en el barrio 12 de Abril



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°30'36.60"S

Longitud: 64°42'30.27"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 323038.31 m E

Coordenada Norte: 7620421.62 m S

3.1.5 Zona El Constructor

El barrio El Constructor está ubicado en la provincia Cercado del departamento de Tarija, se encuentra ubicada a 3.8 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 12: Imagen satelital de la zona de extracción de muestra en el barrio El Constructor



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°31'21.96"S

Longitud: 64°42'48.04"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 322542.00 m E

Coordenada Norte: 7619021.00 m S

3.1.6 Zona Aranjuez

El barrio Aranjuez está ubicado en la provincia Cercado del departamento de Tarija, se encuentra ubicada a 8 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 13: Imagen satelital de la zona de extracción de muestra en el barrio Aranjuez



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°31'28.78"S

Longitud: 64°45'10.68"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 318439.67 m E

Coordenada Norte: 7618765.54 m S

3.1.7 Zona San Blas.

La zona de San Blas ubicada en la provincia Cercado del departamento de Tarija, se encuentra ubicada a 6.2 km del centro de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Figura 14: Imagen satelital de extracción de muestra en el barrio de San Blas



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°33'35.95"S

Longitud: 64°43'39.18"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 321116.56 m E

Coordenada Norte: 7614884.83 m S

3.1.8 Zona Tablada Grande

La zona de Tablada Grande está ubicada en la provincia Cercado del departamento de Tarija. Se encuentra ubicada a 10.2 km del centro de la ciudad de Tarija, provincia Cercado.

Figura 15: Imagen satelital de extracción de muestra en el barrio de Tablada Grande



Fuente: (Google Earth, 2024)

La ubicación geográfica del punto de extracción son las siguientes coordenadas:

Coordenadas (GEOGRÁFICAS)

Latitud: 21°33'41.57"S

Longitud: 64°44'58.22"O

Coordenadas (UTM)

Coordenada Este: 318844.08 m E

Coordenada Norte: 7614685.65 m S

3.2 Selección de la muestra

Para la selección de las muestras de los suelos. Se tuvo que tomar en cuenta distintos barrios de la ciudad de Tarija de la provincia cercado que cuenten con suelos arcillosos.

Con este objetivo fue necesario hacer un previo reconocimiento del área para saber los tipos de suelos existentes encontrando suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) y suelos arcillosos de alta plasticidad (CH).

3.3 Equipo para la obtención de la muestra

Para la recolección de muestra se utilizarán los siguientes equipos:

Picota: Instrumento que servirá para realizar la excavación y poder extraer el suelo con mayor facilidad.

Pala: Instrumento que servirá para recolectar el suelo y poder almacenar las muestras en las bolsas plásticas o papel estañado para conservar la humedad natural del suelo.

Bolsas de hule: Estas bolsas tienen la ventaja que son duras para el transporte y así poder contener el contenido de humedad natural de la muestra.

3.4 Extracción de muestras

Las muestras se extrajeron cumpliendo con las especificaciones y siguiendo los pasos de las guías de laboratorio. Para obtener muestras representativas de suelos se procedió a excavar unos 30 cm de profundidad en las subrasantes, para eliminar las posibles impurezas superficiales.

Se tomó una pequeña muestra de cada punto en bolsas de nylon para evitar que pierda su humedad natural, la muestra restante se tomó en bolsas plásticas más grandes para realizar los respectivos ensayos en laboratorio.

3.5 Memoria fotográfica de la extracción de las muestras

Figura 16: Extracción de la muestra 1 zona San Jorge I



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Extracción de la muestra 2 zona Pampa Galana



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Extracción de la muestra 3 zona Miraflores



Fuente: Elaboración propia

Figura 19: Extracción de la muestra 4 zona 12 de Abril



Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Extracción de la muestra 5 zona El Constructor



Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Extracción de la muestra 6 zona Aranjuez



Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Extracción de la muestra 7 zona San Blas



Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Extracción de la muestra 8 zona Tablada Grande



Fuente: Elaboración propia

3.6 Agentes dispersantes

En el presente trabajo de investigación se trabajó con tres agentes dispersantes los cuales son el hexametáfosfato de sodio, silicato de sodio, y por último el cloruro de sodio. En donde los dispersantes del hexametáfosfato de sodio, silicato de sodio fueron importados de la provincia de Buenos Aires Argentina de la empresa MARBE-DEPARTAMENTO QUIMICOS. Mientras que el cloruro de sodio se utilizó la sal común de mesa.

Figura 24: Agentes dispersantes



Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Ficha técnica del Hexametafosfato de sodio

IDENTIFICACIÓN	
Producto:	Hexametafosfato de sodio
Sinónimos:	SHMP, Polifosfato de Sodio, vidrioso Polifosfato de sodio, Sodio vidrioso (polifosfato), Sal de Graham, Calgon.
Formula química:	(Na P O ₃) ₆
CAS:	68915 - 31 - 1
CAS 2:	10361 - 03 - 2
EINECS:	272 - 808 - 3
EINECS 2:	233 - 782 - 9
Aditivo alimentario:	E452 (i)

3.6.1.1 Propiedades físicas

PROPIEDADES	ESPECIFICACIÓN
APARIENCIA	Polvo, granular, blanco
IDENTIFICACIÓN	Conforme al estándar
PUREZA (COMO P ₂ O ₅)	60.00 - 71.00 (%)
PRUEBA DE SODIO	Positiva
PRUEBA DE FOSFATOS	Positiva
SOLUBILIDAD	Soluble en agua
PH (1% SOLUCION)	3.00 - 9.00
PERDIDAS DEL SECADO	1.00 % máx.
MATERIA INSOLUBLE EN AGUA	0.10 % máx.
POLIFOSFATO SUPERIOR	1.00 % máx.
FLUORUROS	10.00 mg/kg máx. (Expresado como fluor)
ARSÉNICO	1.00 mg/kg máx.
CADMIO	1.00 mg/kg máx.

Fuente: MARBE-Departamento químicos

3.6.2 Ficha técnica del Silicato de sodio

IDENTIFICACIÓN	
Producto:	Silicato de sodio
Fórmula química:	Na_2SiO_3
Peso molecular:	184 g/ mol

3.6.2.1 Propiedades fisicoquímicas

PROPIEDAD	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
RELACIÓN (Si O ₂ : Na ₂ O)	-	3.00 - 3.25
DENSIDAD BAUMÉ	°Be	40 - 42.43
ÓXIDO DE SODIO (Na ₂ O)	% p/p	8.75 - 9.86
ÓXIDO DE SILICIO (Si O ₂)	% p/p	26.45 - 30.75
GRAVEDAD ESPECÍFICA	-	1.381 - 1.4286
SÓLIDOS TOTALES	% p/p	36.1 - 40.1
COLOR	-	GRISACEO

Fuente: MARBE-Departamento químicos

3.6.3 Ficha técnica del Cloruro de sodio



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO" CENTRO DE
ANÁLISIS, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO "CEANID"
Laboratorio Oficial del Ministerio de Salud y Deportes Red de Laboratorios de
Micronutrientes
Laboratorio Oficial del "SENASAG"



INFORME DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

I. INFORMACIÓN DEL SOLICITANTE

Cliente:	Yamil Narvaez Rios				
Solicitante:	Yamil Narvaez Rios				
Dirección:	B/ Pedro Antonio Flores Av. Gran Chaco				
Teléfono/Fax:	68693943	Correo-e	*****	Código	AL 0392/25

II. INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Descripción de la muestra:	Cloruro de sodio (Na CL)		
Código de muestreo:	M - 1	Fecha de vencimiento: *****	Lote: *****
Fecha y hora de muestreo:	07/05/2025		
Procedencia:	Cercado - Tarija - Tarija - Bolivia		
Lugar de muestreo:	Av. Circunvalación		
Responsable de muestreo:	Yamil Narvaez Rios		
Código de la muestra:	0715 FQ 0590	Fecha de recepción de la muestra	07/05/2025
Cantidad recibida:	1 Kg	Fecha de análisis de la muestra	2025-05-07 al 2025-05-21

III. RESULTADOS

PARAMETRO	TECNICA y/o METODO DE ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	LIMITES PERMISIBLES (para sal de mesa) Min. Max.	REFERENCIA DE LOS LIMITES
Humedad	NB 328006:07	g/100g	0.22	Sin referencia	Sin referencia
Pureza	NB 328008:06	g/100g	96.43	Sin referencia	Sin referencia
Material insoluble en agua	NB 328007:06	g/100g	0.3	Sin referencia	Sin referencia
NB: Norma Boliviana g/100g: gramos por cien gramos					

- 1) Los resultados reportados se remiten la muestra ensayada en el Laboratorio.
- 2) El presente informe solo puede ser reproducido en forma parcial y/o, con la autorización del CEANID.
- 3) Los datos de la muestra y el muestreo, fueron suministrados por el cliente.

Tarija, 21 de mayo del 2025

3.7 Caracterización de los materiales

Para conocer las características de las arcillas de baja plasticidad y alta plasticidad se realizó ensayos de laboratorio los cuales fueron controlados por los encargados del laboratorio de mecánica de suelos de la universidad Juan Misael Saracho.

3.7.1 Caracterización de suelos arcillosos “CL”, “CH”

Se realizó los siguientes ensayos en laboratorio para la caracterización de suelos arcillosos:

Tabla 9: Ensayos a desarrollar

Ensayos	Norma
Contenido de humedad	ASTM D2216
Peso específico	ASTM D854-02
Análisis granulométrico	ASTM C117-95
Límite líquido	ASTM D4318-00
Límite plástico	ASTM D4318-00

Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Determinación del contenido de humedad (ASTM D2216)

Se realizó por el método del horno, donde se tomó tres muestras representativas de cada arcilla, se pesó las muestras con su humedad natural y se llevó al horno a una temperatura constante de 110°C durante 24 horas. Transcurrido el tiempo se sacó las muestras del horno y se pesó nuevamente, obteniendo así el peso seco de la muestra el cual servirá para determinar el contenido de humedad.

Figura 25: Ensayo de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Contenido de humedad

Nº	SUELOS	CONTENIDO DE HUMEDAD
		[%]
1	San Jorge I	6.437
2	Pampa Galana	7.766
3	Miraflores	5.383
4	12 de Abril	6.831
5	El Constructor	8.091
6	Aranjuez	7.259
7	San Blas	6.231
8	Tablada Grande	9.035

Fuente: Elaboración propia

3.7.3 Determinación del peso específico (ASTM D-854.02)

Se calibro el frasco volumétrico de 500 ml. El proceso de calibración empezó con el lavado del frasco volumétrico luego se hizo secar y se pesó, después se llenó con agua destilada hasta la mitad del volumen del frasco (250 ml) y se llevó a baño maría caliente hasta lograr una temperatura de 60°C. Se sacó del baño maría caliente y aumento agua destilada hasta casi llegar a la marca del menisco y completo con la pipeta hasta el 100%.

Luego llevar a baño maría frío y esperar que la temperatura baje hasta 30°C y hacer 5 mediciones de temperatura hasta 15°C con sus pesos respectivos tratando de limpiar bien la base del frasco.

Para el peso específico para las arcillas se usó 80 gramos de suelo el cual se mezcló con agua hasta conseguir una pasta. Se agregó la pasta al frasco con agua hasta 250 ml, luego se metió en baño maría caliente hasta los 60°C. Luego se enrazó hasta el menisco con agua destilada y se colocó a baño maría frío hasta reducir a los 30°C donde se empezó a hacer 5 mediciones de temperaturas hasta los 15°C con sus pesos respectivos tratando de limpiar bien la base del frasco al pesar y enrazar al 100% del volumen con la pipeta en cada medición. Una vez acabado el ensayo se hizo secar la muestra en horno para sacar el peso seco de la muestra.

Figura 26: Ensayo peso específico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Peso específico

N°	SUELOS	PESO ESPECIFICO
		[g/cm³]
1	San Jorge I	2.72
2	Pampa Galana	2.66
3	Miraflores	2.70
4	12 de Abril	2.80
5	El Constructor	2.72
6	Aranjuez	2.73
7	San Blas	2.77
8	Tablada Grande	2.75

Fuente: Elaboración propia

3.7.4 Análisis granulométrico ASTM C117-95

Como se trata de material arcilloso se realizó un lavado por el tamiz N°200, para luego realizar la granulometría con los respectivos tamices.

Se dejó en saturación durante 24 horas una muestra representativa de 2000g suelo arcilloso para posteriormente realizar la granulometría del suelo arcillosos por el método del lavado usando el tamiz N°200.

Después de realizar el lavado se hace secar el material restante que quedo retenido en el tamiz N°200 en un horno a temperatura constante de 110°C por 24 horas desde el momento de meter el suelo al horno.

Una vez secado el material se procede a realizar un tamizado con los tamices N°4, N°10, N°40 y finalmente N°200 los cuales son usados de acuerdo a la norma para suelos finos.

Figura 27: Lavado por el tamiz N°200 para suelos arcillosos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Análisis granulométrico

N°	SUELOS	GRANULOMETRIA
		[%]
1	San Jorge I	98.11%
2	Pampa Galana	99.22%
3	Miraflores	95.45%
4	12 de Abril	98.77%
5	El Constructor	99.47%
6	Aranjuez	99.24%
7	San Blas	98.68%
8	Tablada Grande	99.05%

Fuente: Elaboración propia

3.7.5 Determinación del límite líquido y plástico (ASTM D-4318)

3.7.5.1 Límite líquido (ASTM D-4318)

Se realizó por el método de casagrande. Se instaló el equipo en una superficie plana y se calibro la altura de caída de la copa a 1 cm.

La muestra se procesa para eliminar cualquier material retenido por el tamiz N°40. El límite líquido se determina mediante la realización de ensayos en los que se lleva una parte de la muestra en una copa de bronce, dividido en dos por una herramienta de ranurado, y luego se deja fluir juntos hasta chocar causada por los golpes repetidos ocasionadas en la copa en un dispositivo mecánico estándar. Una vez que se realiza a la unión de 1,27 cm se debe anotar los golpes y realizar la extracción toda la unión y depositando en una capsula. Posteriormente se debe pesar en una balanza de precisión de 0.01g. Este procedimiento se realiza 4 veces para los golpes entre 15-20, 20-25, 25-30, 30-35. Una vez teniendo todos los puntos se lleva al horno a 110 °C por 24 horas y se vuelve a pesar la muestra para posteriormente realizar los cálculos necesarios y conocer el límite líquido de cada suelo arcilloso.

Figura 28: Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

3.7.5.2 Límite plástico (ASTM D4318)

El límite plástico se determina presionando alternativamente juntos y rodar en un cilindro de 3.2 mm (1/8 pulg) de diámetro una pequeña porción de suelo de plástico hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el que el hilo se desmorona y no puede ya ser presionado y laminados de nuevo. El contenido de agua del suelo en este punto se presenta como el límite plástico una vez obtenido el rollito se procede a cortar con la espátula en trocitos en los que se encuentre las rajaduras y poner en la capsula a pesar. Para realizar el ensayo se debe tener 3 capsulas para posteriormente meter al horno a 110°C durante 24 horas y se vuelve a pesar para así poder realizar los cálculos respectivos y obtener el límite plástico de las muestras de suelos arcillosos.

Figura 29: Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

3.7.5.3 Índice de plasticidad (ASTM D4318)

Una vez realizado el límite líquido y el límite plástico se calculó el índice de plasticidad el cual es la resta del límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$).

Tabla 13: Ensayos de límites líquidos y plástico

N°	SUELOS	LÍMITES DE ATTERBERG		
		LL (%)	LP (%)	IP (%)
1	San Jorge I	29.802	19.243	10.559
2	Pampa Galana	33.905	19.808	14.096
3	Miraflores	42.712	22.973	19.739
4	12 de Abril	47.108	24.682	22.426
5	El Constructor	53.110	26.170	26.940
6	Aranjuez	54.880	25.530	29.350
7	San Blas	56.544	25.594	30.950
8	Tablada Grande	56.747	24.755	31.992

Fuente: Elaboración propia

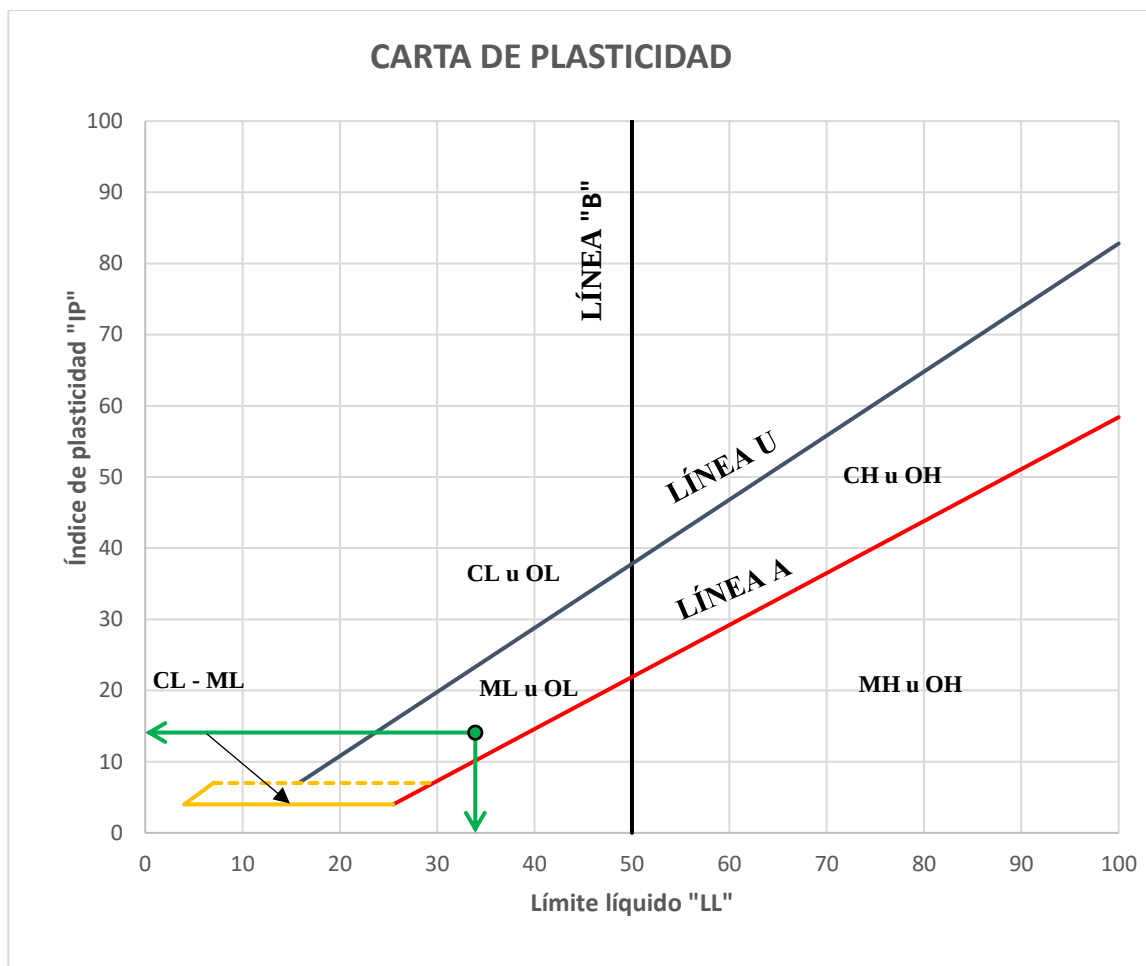
3.7.6 Clasificación de suelos finos

3.7.6.1 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUSC)

Se observa que los 8 ensayos de granulometría pasan más de 50% pasa el tamiz N°200 por lo tanto, es un suelo limo arcilloso.

Para la clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUSC), necesitamos los datos de límite líquido e índice de plasticidad para usar la carta de plasticidad.

Gráfica 2: Carta plástica por el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Clasificación de las muestras

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
SUELOS	San Jorge I	Pampa Galana	Mira Flores	12 de Abril	El Constructor	Aranjuez	San Blas	Tablada Grande
CLASIFICACIÓN DE SUELO SUCS	CL	CL	CL	CL	CH	CH	CH	CH

Fuente: Elaboración propia

3.7.7 Resumen de resultados de caracterización

Tabla 15: Resumen de caracterización de suelos

N°	Suelos	Contenido de humedad	Granulometría	Peso específico	Límites de atterberg			Clasificación de suelo
					LL [%]	LP [%]	IP [%]	
1	San Jorge I	6.437	98.11%	2.72	30.00	19.00	11.00	CL
2	Pampa Galana	7.766	99.22%	2.66	34.00	20.00	14.00	CL
3	Miraflores	5.383	95.45%	2.70	43.00	23.00	20.00	CL
4	12 de Abril	6.831	98.77%	2.80	47.00	25.00	22.00	CL
5	El Constructor	8.091	99.47%	2.72	53.00	26.00	27.00	CH
6	Aranjuez	7.259	99.24%	2.73	55.00	27.00	28.00	CH
7	San Blas	6.231	98.68%	2.77	57.00	26.00	31.00	CH
8	Tablada Grande	9.035	99.05%	2.75	57.00	25.00	32.00	CH

Fuente: Elaboración propia

3.8 Análisis granulométrico por el método de densímetro 152H (ASTM D422) en suelos arcillosos

Este análisis está regulado por la norma ASTM D 422, en la cual tomamos una cantidad de suelo seco colocándolo en un recipiente junto con un agente dispersante durante un tiempo de 24 horas. Transcurrido el tiempo, el compuesto es transferido al recipiente de un agitador mecánico, en el cual es mezclado por 1 minuto. Seguidamente, colocamos la muestra en un cilindro de sedimentación graduado y agregamos agua destilada hasta una medida indicada. Tapando con la mano o un tapón adecuado agitamos vigorosamente por

60 segundos. Ponemos en marcha el cronómetro e introducimos lentamente el densímetro en la muestra en suspensión. Procedemos a tomar lecturas con el densímetro a diferentes intervalos, y luego lo extraemos colocándolo en un cilindro con agua limpia. Como parte del ensayo, registramos la temperatura con un termómetro. Una vez obtenidos los datos se hacen los cálculos, correcciones y gráficos correspondientes.

Los resultados se expresan mediante una curva granulométrica, en la que se tenga en cuenta también la fracción de suelo evaluada mediante el método de tamizado. En la curva granulométrica deben leerse el porcentaje de limo más arcilla y el porcentaje de arcilla.

Figura 30: Muestra de suelo arcilloso en reposo con defloculante por 24 horas



Fuente: Elaboración propia

3.8.1 Ensayo del densímetro 152H

Figura 31: Realización del ensayo del densímetro 152H



Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Realización ensayo del densímetro 152H



Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Probetas en la piscina con temperatura constante para en el ensayo del densímetro 152H.



Fuente: Elaboración propia

En el proyecto de grado se realizó ensayos de densímetro 152H con tres diferentes agentes dispersantes, por lo cual se detallará la obtención de datos y cálculos respectivo del ensayo para cada dispersante.

3.8.2 Obtención de datos en ensayo del densímetro 152H

Tabla 16: Datos de la muestra de Tablada Grande con hexametáfosfato de sodio

Tiempo [min]	T [°C]	Lect. Real Rh [g/l]
1	22	54
2	22	54
4	22	53
8	22	53
15	22	52
30	22	49
60	22	46
120	22	42
240	22	38
480	22	33
1440	22	27
1860	22	26
2880	22	23
3360	22	22
4320	22	19
8640	22	15

Fuente: Elaboración propia

3.8.3 Cálculos

3.8.3.1 Correcciones para el ensayo por densímetro 152H

Las correcciones a usar: temperatura, menisco, dispersante.

Corrección por temperatura: Al tener una temperatura constante de 22 grados para el ensayo del densímetro 152H se obtiene de la tabla 6, de acuerdo a la temperatura:

$$T^{\circ} = 22^{\circ}\text{C} \quad C_t = 0.4 \text{ g/l}$$

C_t = Corrección por temperatura

Corrección por menisco: La corrección por menisco para en densímetro 152H es de:

$$C_m = 1.0 \text{ g/l}$$

C_m = Corrección por menisco

Corrección por defloculante: Esta corrección se calcula usando la siguiente formula:

$$RC_d = R_h + C_m \pm C_t$$

R_h = Lectura del densímetro en agua con defloculante únicamente

C_m = Corrección por menisco

C_t = Corrección por temperatura

$$RC_d = 4 + 1 + 0.4$$

$$RC_d = 5.4 \text{ g/l}$$

La corrección por defloculante o por cero siempre es negativa

$$C_d = 0.00 - 5.4$$

$$C_d = -5.4 \text{ g/l}$$

3.8.3.2 Cálculo de las lecturas de densímetro corregidas

Coeficiente (K) se extrae de la tabla 7, cuyos parámetros de entrada son el peso específico y la temperatura de cada lectura. Si es necesario interpolar se interpola.

$$G_s = 2.75 \text{ g/cm}^3 \quad T^{\circ} = 22^{\circ}\text{C} \quad k = 0.0129$$

Factor de corrección por pesos específico (a) se extrae de la tabla 8, de acuerdo al valor de peso específico del suelo estudiado.

$$G_s = 2.75 \text{ g/cm}^3 \quad a = 0.990$$

3.8.3.3 Lectura del densímetro 152H corregida

$$R_r = R_H + C_m$$

R_r = Lectura del densímetro corregida

R_H = Lectura del densímetro

C_m = Corrección por menisco

$$R_r = 54 + 1$$

$$R_r = 55 \text{ g/l}$$

Se sigue el mismo procedimiento para todas las lecturas.

3.8.3.4 Lectura final del densímetro 152H corregida

$$R_c = R_r - C_d \pm C_t$$

R_c = Lectura final corregida

R_r = Lectura del densímetro corregida

C_d = Corrección por defloculante

C_t = Corrección por temperatura

$$R_c = 55 - 5.4 + 0.4$$

$$R_c = 50 \text{ g/l}$$

Se sigue el mismo procedimiento para todas las lecturas.

3.8.3.5 Cálculo de la velocidad de sedimentación, el diámetro de la partícula, y los porcentajes más finos parcial y total.

El valor de la profundidad efectiva se extrae de la tabla 5, de acuerdo al tipo densímetro utilizado, en nuestro caso el densímetro 152H y la lectura final corregida.

$$R_c = 50 \text{ g/l} \quad L = 8.10 \text{ cm}$$

Se saca la profundidad efectiva para cada una de las lecturas final corregida.

3.8.3.6 Velocidad de sedimentación

$$V = \frac{L}{t}$$

V= Velocidad de sedimentación

L=Profundidad efectiva (cm)

t= Tiempo (min)

$$V = \frac{8.10}{1}$$

$$V=8.10 \text{ cm/min}$$

Procedimiento de la misma manera para cada uno de los tiempos obtenidos.

3.8.3.7 Calculo del diámetro de las partículas

$$D = K * \sqrt{\frac{L}{t}}$$

D= Diámetros de las partículas

K= Coeficiente K

$\frac{L}{t}$ = Velocidad de sedimentación

$$D = 0.0129 * \sqrt{\frac{8.10}{1}}$$

$$D= 0.0367 \text{ mm}$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de los tiempos.

3.8.3.8 Porcentaje más fino parcial

$$\%P = \frac{a * Rc}{md} * 100$$

%P= Porcentaje más fino parcial

a= Factor de corrección por peso específico

Rc= Lectura final corregida

md= Peso del suelo seco

$$\%P = \frac{0.98 * 50}{50} * 100$$

$$\%p = 98\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las lecturas.

3.8.3.9 Porcentaje más fino total

$$\%Pf = \frac{\%Pn200 * \%Pparcial}{100}$$

%Pf= Porcentaje más fino total

%Pn200= Porcentaje que pasa por el tamiz N°200

%Pparcial= Porcentaje más fino parcial

$$\%Pf = \frac{99.05 * 98}{100}$$

$$\%Pf = 97.07\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las lecturas a continuación, se muestra la tabla completa sobre los cálculos del ensayo por densímetro 152H para una muestra de suelo arcilloso de la zona Tablada Grande usando el agente dispersante de hexametafosfato de sodio.

Modelo Densímetro: 152H
Peso suelo seco: 50 g
Peso específico: 2.75 g/cm³
Agente Dispersante:
 Hexametafosfato de sodio (NaPO₃)₆
 "a" 0.98

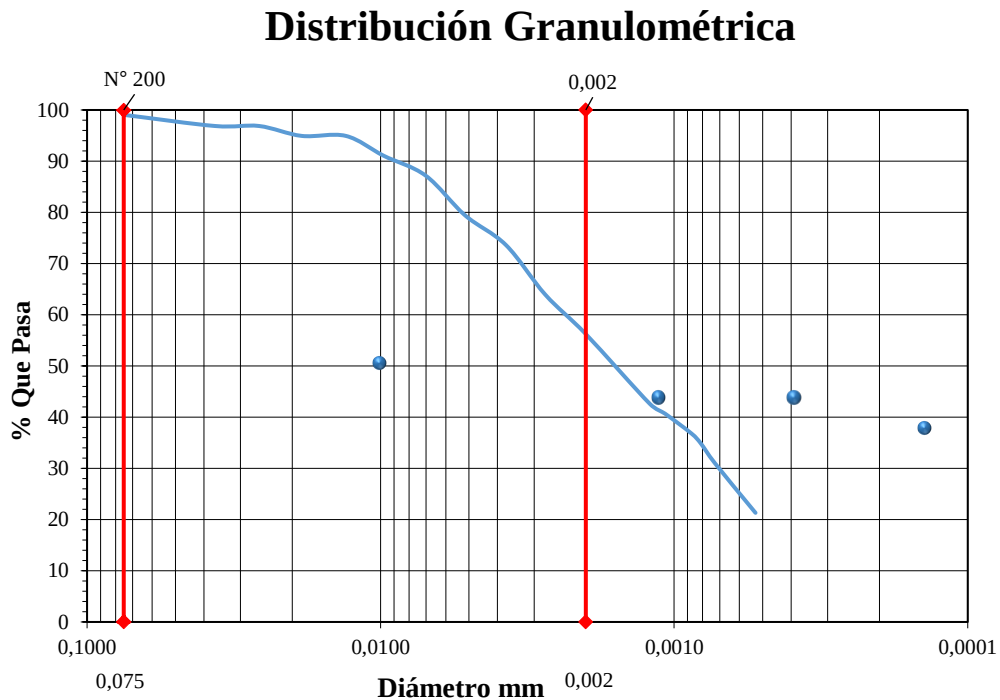
Temperatura [°C]: 22
Registro Densímetro [g/l]: 4
Ct [g/l]: 0.4
Cm [g/l]: 1
RCd [g/l]: 5.4

Tiempo [min]	T [°C]	Lect. Real Rh [g/l]	Const. K Tabla	Ct [g/l]	Lect. Corr. Menis. Rr [g/l]	correc. Por defluc. Cd [g/l]	Lect. Corr. Rc [g/l]	Prof. Efec. L [cm]	L/t [cm/min]	a	Diam. Part. [mm]	Más Fino Parc. [%]	Más Fino Tot. [%]
											0.0750		99.05
1	22	54	0.013	0.4	55	5.4	50	8.10	8.100	0.980	0.0367	98.00	97.07
2	22	54	0.013	0.4	55	5.4	50	8.10	4.050	0.980	0.0260	98.00	97.07
4	22	53	0.013	0.4	54	5.4	49	8.30	2.075	0.980	0.0186	96.04	95.13
8	22	53	0.013	0.4	54	5.4	49	8.30	1.050	0.980	0.0131	96.04	95.13
15	22	52	0.013	0.4	53	5.4	48	8.40	0.560	0.980	0.0097	94.08	93.19
30	22	49	0.013	0.4	50	5.4	45	8.90	0.297	0.980	0.0070	88.20	87.36
60	22	46	0.013	0.4	47	5.4	42	9.40	0.157	0.980	0.0051	82.32	81.54
120	22	42	0.013	0.4	43	5.4	38	10.10	0.084	0.980	0.0037	74.48	73.77
240	22	38	0.013	0.4	39	5.4	34	10.70	0.045	0.980	0.0027	66.64	66.01
480	22	33	0.013	0.4	34	5.4	29	11.50	0.024	0.980	0.0020	56.84	56.30
1440	22	27	0.013	0.4	28	5.4	23	12.5	0.009	0.980	0.0012	45.08	44.65
1860	22	26	0.013	0.4	27	5.4	22	12.7	0.007	0.980	0.0011	43.12	42.71

2880	22	23	0.013	0.4	24	5.4	19	13.2	0.005	0.980	0.0009	37.24	36.89
3360	22	22	0.013	0.4	23	5.4	18	13.3	0.004	0.980	0.0008	35.28	34.94
4320	22	19	0.013	0.4	20	5.4	15	13.8	0.003	0.980	0.0007	29.40	29.12
8640	22	15	0.013	0.4	16	5.4	11	14.5	0.002	0.980	0.0005	21.56	21.36

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3: Curva de la distribución granulométrica de la zona de Tablada Grande usando hexametáfosfato de sodio



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procede a calcular el porcentaje de arcilla interpolando, y porcentaje de limo que contiene nuestra muestra de suelo arcilloso de Tablada Grande

Para densímetro 152H

Porcentaje más fino que: 0.002 mm= **56.35 % Arcilla**

Porcentaje de limo= % (0.075 mm) - %(0.002mm)

Porcentaje de limo= 99.05 – 56.35 = **42.70 %Limo**

3.8.4 Obtención de datos en ensayo del densímetro 152H

Tabla 18: Datos de la muestra de Tablada Grande con silicato de sodio

Tiempo [min]	T [°C]	Lect. Real Rh [g/l]
1	22	53
2	22	52
4	22	50
8	22	48
15	22	45
30	22	42
60	22	40
120	22	36
240	22	31
480	22	28
1440	22	22
1860	22	21
2880	22	18
3360	22	17
5040	22	15

Fuente: Elaboración propia

3.8.5 Cálculos

3.8.5.1 Correcciones para el ensayo por el densímetro 152H

Las correcciones a usar: temperatura, menisco, dispersante.

Corrección por temperatura: Al tener una temperatura constante de 22 grados para el ensayo del densímetro 152H se obtiene de la tabla 6, de acuerdo a la temperatura.

$$T^{\circ} = 22^{\circ}\text{C} \quad C_t = 0.4 \text{ g/l}$$

C_t = corrección por temperatura

Corrección por menisco: La corrección por menisco para en densímetro 152H es de:

$$C_m = 1.0 \text{ g/l}$$

C_m = Corrección por menisco

Corrección por defloculante: Esta corrección se calcula usando la siguiente formula:

$$RC_d = R_h + C_m \pm C_t$$

R_h = Lectura del densímetro en agua con defloculante únicamente

C_m = Corrección por menisco

C_t = Corrección por temperatura

$$RC_d = 3 + 1 + 0.4$$

$$RC_d = 4.4 \text{ g/l}$$

La corrección por defloculante o por cero siempre es negativa

$$C_d = 0.00 - 4.4$$

$$C_d = -4.4 \text{ g/l}$$

3.8.5.2 Cálculo de las lecturas de densímetro 152H corregidas

Coeficiente (K) se extrae de la tabla 7, cuyos parámetros de entrada son el peso específico y la temperatura de cada lectura. Si es necesario interpolar se interpola.

$$G_s = 2.75 \text{ g/cm}^3 \quad T^{\circ} = 22^{\circ}\text{C} \quad k = 0.0129$$

Factor de corrección por pesos específico (a) se extrae de la tabla 8, de acuerdo al valor de peso específico del suelo estudiado.

$$G_s = 2.75 \text{ g/cm}^3 \quad a = 0.990$$

3.8.5.3 Lectura del densímetro 152H corregida

$$R_r = R_H + C_m$$

R_r = Lectura del densímetro corregida

R_H = Lectura del densímetro

C_m = Corrección por menisco

$$R_r = 53 + 1$$

$$R_r = 54 \text{ g/l}$$

Se sigue el mismo procedimiento para todas las lecturas.

3.8.5.4 Lectura final del densímetro 152H corregida

$$R_c = R_r - C_d \pm C_t$$

R_c = Lectura final corregida

R_r = Lectura del densímetro corregida

C_d = Corrección por defloculante

C_t = Corrección por temperatura

$$R_c = 54 - 4.4 + 0.4$$

$$R_c = 50 \text{ g/l}$$

Se sigue el mismo procedimiento para todas las lecturas.

3.8.5.5 Cálculo de la velocidad de sedimentación, el diámetro de la partícula, y los porcentajes más finos parcial y total.

El valor de la profundidad efectiva se extrae de la tabla 5, de acuerdo al tipo densímetro utilizado, en nuestro caso el densímetro 152H y la lectura final corregida.

$$R_c = 50 \text{ g/l} \quad L = 8.10 \text{ cm}$$

Se saca la profundidad efectiva para cada una de las lecturas final corregida.

3.8.5.6 Velocidad de sedimentación

$$V = \frac{L}{t}$$

V= Velocidad de sedimentación

L=Profundidad efectiva (cm)

t= Tiempo (min)

$$V = \frac{8.10}{1}$$

$$V=8.10 \text{ cm/min}$$

Procedimiento de la misma manera para cada uno de los tiempos obtenidos.

3.8.5.7 Calculo del diámetro de las partículas

$$D = K * \sqrt{\frac{L}{t}}$$

D= Diámetros de las partículas

K= Coeficiente K

$\frac{L}{t}$ = Velocidad de sedimentación

$$D = 0.0129 * \sqrt{\frac{8.10}{1}}$$

$$D= 0.03671 \text{ mm}$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de los tiempos.

3.8.5.8 Porcentaje más fino parcial

$$\%P = \frac{a * Rc}{md} * 100$$

%P= Porcentaje más fino parcial

a= Factor de corrección por peso específico

Rc= Lectura final corregida

md= Peso del suelo seco

$$\%P = \frac{0.98 * 50}{50} * 100$$

$$\%p= 98\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las lecturas.

3.8.5.9 Porcentaje más fino total

$$\%Pf = \frac{\%Pn200 * \%Pparcial}{100}$$

%Pf = Porcentaje más fino total

%Pn200 = Porcentaje que pasa por el tamiz N°200

%Pparcial = Porcentaje más fino parcial

$$\%Pf = \frac{99.05 * 98}{100}$$

$$\%Pf= 97.07\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las lecturas.

A continuación, se muestra la tabla completa sobre los cálculos del ensayo por densímetro 152H para una muestra de suelo arcilloso de la zona Tablada Grande usando el agente dispersante de silicato de sodio.

Modelo Densímetro: 152 H
Peso suelo seco: 50 g
Peso específico: 2.75 g/cm³
Agente Dispersante:
 Silicato de Sodio (Na₂SiO₃)
 "a" 0.980

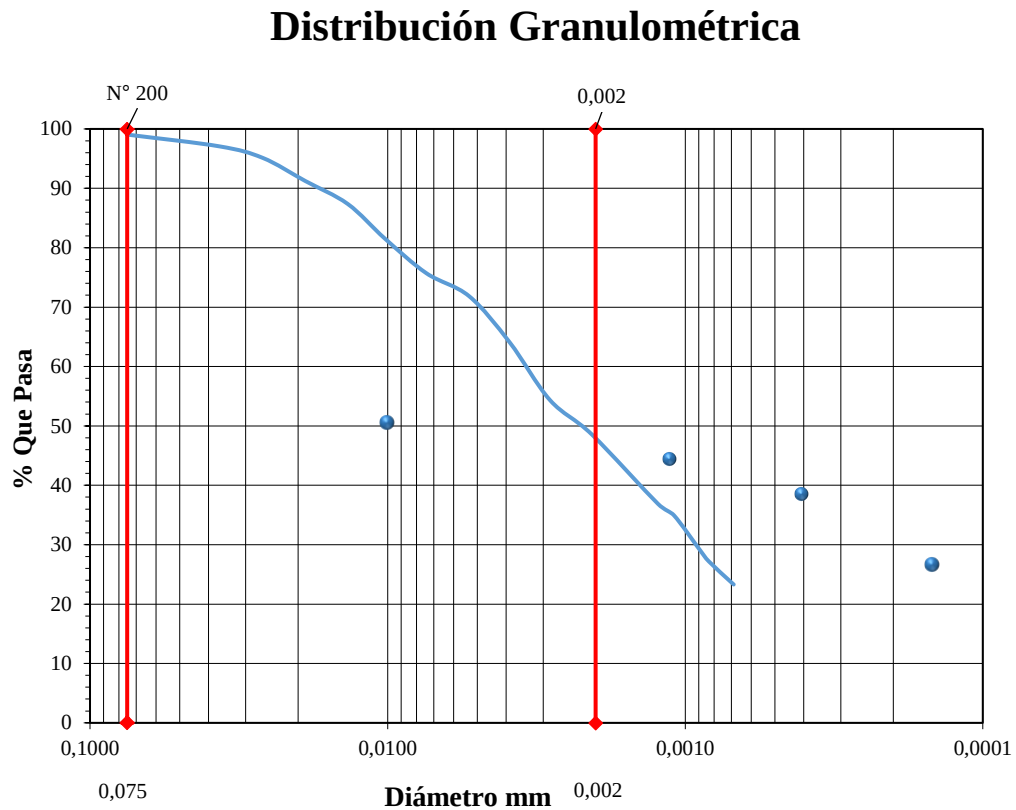
Temperatura (°C): 22
Registro Densímetro (g/l): 3
Ct (g/l): 0.4
Cm (g/l): 1
RCd (g/l): 4.4

Tiempo (min)	T °C	Lect. Real Rh (g/l)	Const. K Tabla	Ct (g/l)	Lect. Corr. Menis. Rr (g/l)	correc. Por defluc. Cd (g/l)	Lect. Corr. Rc (g/l)	Prof. Efec. L (cm)	L/t (cm/min)	a	Diam. Part. (mm)	% Más Fino Parc.	% Más Fino Tot.
											0.075		99.05
1	22	53	0.013	0.4	54	4.4	50	8.10	8.100	0.980	0.03671	98.00	97.07
2	22	52	0.013	0.4	53	4.4	49	8.30	4.150	0.980	0.02628	96.04	95.13
4	22	50	0.013	0.4	51	4.4	47	8.60	2.150	0.980	0.01892	92.12	91.24
8	22	48	0.013	0.4	49	4.4	45	8.90	1.113	0.980	0.01361	88.20	87.36
15	22	45	0.013	0.4	46	4.4	42	9.40	0.627	0.980	0.01021	82.32	81.54
30	22	42	0.013	0.4	43	4.4	39	9.90	0.330	0.980	0.00741	76.44	75.71
60	22	40	0.013	0.4	41	4.4	37	10.20	0.170	0.980	0.00532	72.52	71.83
120	22	36	0.013	0.4	37	4.4	33	10.90	0.091	0.980	0.00389	64.68	64.07
240	22	31	0.013	0.4	32	4.4	28	11.70	0.049	0.980	0.00285	54.88	54.36
480	22	28	0.013	0.4	29	4.4	25	12.20	0.025	0.980	0.00206	49.00	48.53
1440	22	22	0.013	0.4	23	4.4	19	13.2	0.009	0.980	0.00124	37.24	36.89
1860	22	21	0.013	0.4	22	4.4	18	13.3	0.007	0.980	0.00109	35.28	34.94
2880	22	18	0.013	0.4	19	4.4	15	13.8	0.005	0.980	0.00089	29.40	29.12

3360	22	17	0.013	0.4	18	4.4	14	14	0.004	0.980	0.00083	27.44	27.18
5040	22	15	0.013	0.4	16	4.4	12	14.3	0.003	0.980	0.00069	23.52	23.30

Fuente :Elaboración propia

Gráfica 4: Curva de la distribución granulométrica de la zona de Tablada Grande usando silicato de sodio



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procede a calcular el porcentaje de arcilla interpolando, y porcentaje de limo que contiene nuestra muestra de suelo arcilloso de Tablada Grande.

Para densímetro 152H

Porcentaje más fino que: 0.002 mm = **47.70 % Arcilla**

Porcentaje de limo= % (0.075 mm) - %(0.002mm)

Porcentaje de limo= 99.05 – 47.70 = **51.35 % Limo**

3.8.6 Obtención de datos en ensayo del densímetro 152H

Tabla 20: Datos de la muestra de Tablada Grande con cloruro de sodio al 2%

Tiempo [min]	T [°C]	Lect. Real Rh [g/l]
1	22	52
2	22	51
4	22	49
8	22	45
15	22	41
30	22	35
60	22	29
120	22	24
240	22	17
480	22	15
1140	22	9

Fuente: Elaboración propia

3.8.7 Cálculos

3.8.7.1 Correcciones para el ensayo por densímetro 152H

Las correcciones a usar: temperatura, menisco, dispersante.

Corrección por temperatura: Al tener una temperatura constante de 22 grados para el ensayo del densímetro 152H se obtiene de la tabla 6, de acuerdo a la temperatura.

$$T^{\circ} = 22\text{ }^{\circ}\text{C} \quad C_t = 0.4\text{ g/l}$$

Ct= Corrección por temperatura

Corrección por menisco: La corrección por menisco para en densímetro 152H es de:

$$C_m = 1.0 \text{ g/l}$$

C_m = Corrección por menisco

corrección por defloculante: Esta corrección se calcula usando la siguiente formula:

$$RCd = R_h + C_m \pm C_t$$

R_h = Lectura del densímetro en agua con defloculante únicamente

C_m = Corrección por menisco

C_t = Corrección por temperatura

$$RCd = 5 + 1 + 0.4$$

$$RCd = 6.4 \text{ g/l}$$

La corrección por defloculante o por cero siempre es negativa

$$C_d = 0.00 - 4.4$$

$$C_d = -4.4 \text{ g/l}$$

3.8.7.2 Calculo de las lecturas de densímetro 152H corregidas

Coeficiente (K) se extrae de la tabla 7, cuyos parámetros de entrada son el peso específico y la temperatura de cada lectura. Si es necesario interpolar se interpola.

$$G_s = 2.75 \text{ g/cm}^3 \quad T^\circ = 22^\circ \text{C} \quad k = 0.0129$$

Factor de corrección por pesos específico (a) se extrae de la tabla 5, de acuerdo al valor de peso específico del suelo estudiado.

$$G_s = 2.75 \text{ g/cm}^3 \quad a = 0.990$$

3.8.7.3 Lectura del densímetro 152H corregida

$$R_r = R_h + C_m$$

R_r = Lectura del densímetro corregida

RH= Lectura del densímetro

Cm= Corrección por menisco

$$Rr = 52+1$$

$$Rr = 53 \text{ g/l}$$

Se sigue el mismo procedimiento para todas las lecturas.

3.8.7.4 Lectura final del densímetro 152H corregida

$$Rc= Rr-Cd\pm Ct$$

Rc=Lectura final corregida

Rr= Lectura del densímetro corregida

Cd= Corrección por defloculante

Ct= Corrección por temperatura

$$Rc= 53-6.4+0.4$$

$$Rc=47 \text{ g/l}$$

Se sigue el mismo procedimiento para todas las lecturas.

3.8.7.5 Calculo de la velocidad de sedimentación, el diámetro de la partícula, y los porcentajes más finos parcial y total.

El valor de la profundidad efectiva se extrae de la tabla 8, de acuerdo al tipo densímetro utilizado, en nuestro caso el densímetro 152H y la lectura final corregida.

$$Rc= 47 \text{ g/l} \quad L= 8.60 \text{ cm}$$

Se saca la profundidad efectiva para cada una de las lecturas final corregida.

3.8.7.6 Velocidad de sedimentación

$$V = \frac{L}{t}$$

V= Velocidad de sedimentación

L= Profundidad efectiva (cm)

t = Tiempo (min)

$$V = \frac{8.60}{1}$$

$$V=8.60 \text{ cm/min}$$

Procedimiento de la misma manera para cada uno de los tiempos obtenidos.

3.8.7.7 Calculo del diámetro de las partículas

$$D = K * \sqrt{\frac{L}{t}}$$

D= Diámetros de las partículas

K= Coeficiente K

$\frac{L}{t}$ = Velocidad de sedimentación

$$D = 0.0129 * \sqrt{\frac{8.60}{1}}$$

$$D= 0.0378 \text{ mm}$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de los tiempos.

3.8.7.8 Porcentaje más fino parcial

$$\%P = \frac{a * Rc}{md} * 100$$

%P= Porcentaje más fino parcial

a= Factor de corrección por peso específico

Rc= Lectura final corregida

md= Peso del suelo seco

$$\%P = \frac{0.98 * 47}{50} * 100$$

$$\%p = 92.12\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las lecturas.

3.8.7.9 Porcentaje más fino total

$$\%Pf = \frac{\%Pn200 * \%Pparcial}{100}$$

$\%Pf$ = Porcentaje más fino total

$\%Pn200$ = Porcentaje que pasa por el tamiz N°200

$\%Pparcial$ = Porcentaje más fino parcial

$$\%Pf = \frac{99.05 * 92.12}{100}$$

$$\%Pf = 91.24\%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de las lecturas.

A continuación, se muestra la tabla completa sobre los cálculos del ensayo por densímetro 152H para una muestra de suelo arcilloso de la zona Tablada Grande usando el agente dispersante de Cloruro de sodio al 2%.

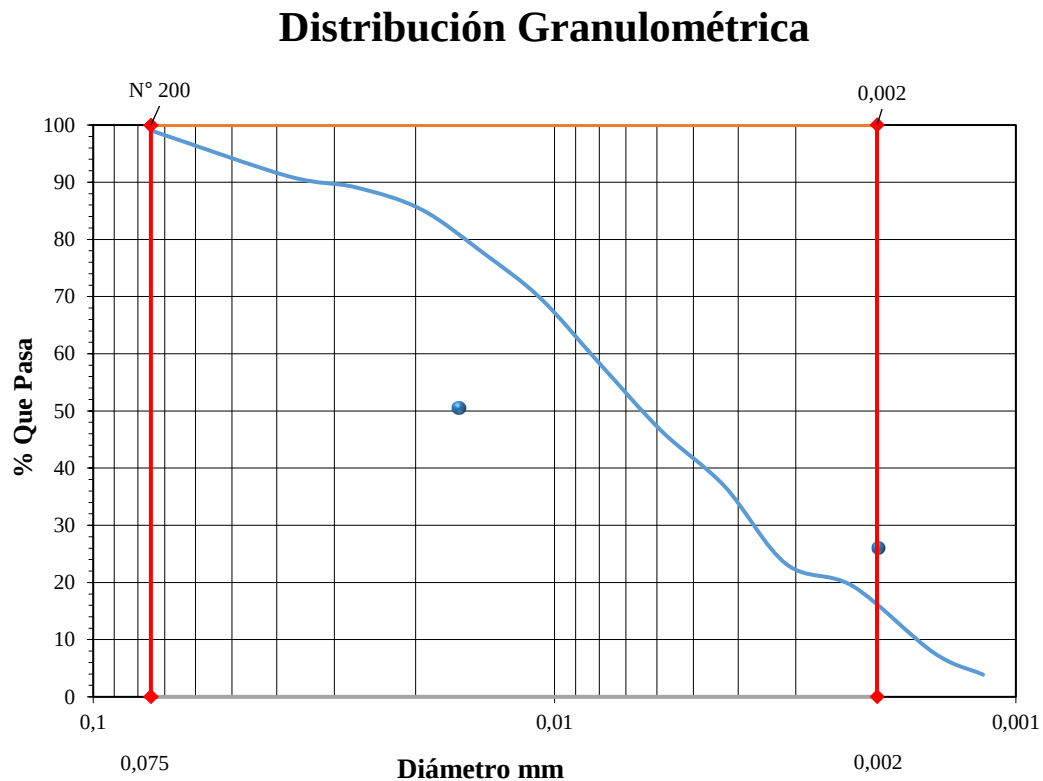
Modelo Densímetro:	152 H	Temperatura (°C):	22
Peso suelo seco:	50 g	Registro Densímetro (g/l):	5
Peso específico:	2.75 g/cm ³	Ct (g/l):	0.4
Agente Dispersante:	Cloruro de sodio (NaCl)	Cm (g/l):	1
		RCd (g/l):	6.4
"a"	0.980		
porcentaje:	2%		

Tiempo (min)	T °C	Lect. Real Rh (g/l)	Const. K Tabla	Ct (g/l)	Lect. Corr. Menis. Rr (g/l)	correc. Por defluc. Cd (g/l)	Lect. Corr. Rc (g/l)	Prof. Efec. L (cm)	L/t (cm/min)	a	Diam. Part. (mm)	% Mas Fino Parc.	% Mas Fino Tot.
											0.0750		99.05
1	22	52	0.013	0.4	53	6.4	47	8.60	8.600	0.980	0.0378	92.12	91.24
2	22	51	0.013	0.4	52	6.4	46	8.80	4.400	0.980	0.0271	90.16	89.30
4	22	49	0.013	0.4	50	6.4	44	9.10	2.275	0.980	0.0195	86.24	85.42
8	22	45	0.013	0.4	46	6.4	40	9.70	1.213	0.980	0.0142	78.40	77.66
15	22	41	0.013	0.4	42	6.4	36	10.40	0.693	0.980	0.0107	70.56	69.89
30	22	35	0.013	0.4	36	6.4	30	11.40	0.380	0.980	0.0080	58.80	58.24
60	22	29	0.013	0.4	30	6.4	24	12.40	0.207	0.980	0.0059	47.04	46.59
120	22	24	0.013	0.4	25	6.4	19	13.20	0.110	0.980	0.0043	37.24	36.89
240	22	17	0.013	0.4	18	6.4	12	14.30	0.060	0.980	0.0031	23.52	23.30

480	22	15	0.013	0.4	16	6.4	10	14.70	0.031	0.980	0.0023	19.60	19.41
1140	22	9	0.013	0.4	10	6.4	4	15.60	0.014	0.980	0.0015	7.84	7.77
1920	22	7	0.013	0.4	8	6.4	2	16.00	0.008	0.980	0.0012	3.92	3.88

Fuente :Elaboración propia

Gráfica 5: Curva de la distribución granulométrica de la zona de Tablada Grande usando cloruro de sodio al 2%



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procede a calcular el porcentaje de arcilla interpolando, y porcentaje de limo que contiene nuestra muestra de suelo arcilloso de Tablada Grande.

Para densímetro 152H

Porcentaje más fino que: 0.002 mm = **15.01 % Arcilla**

Porcentaje de limo= % (0.075 mm) - %(0.002mm)

Porcentaje de limo= 99.05 – 15.01 = **84.04 % Limo**

Tabla 22: Matriz de resultados de los suelos arcillosos

N. o	Suelos	Coordenadas	Contenido de humedad	Granulometría	Peso específico	Límites de atterberg			Clasificación de suelo	Hexametafosfato de sodio		Silicato de sodio		cloruro de sodio al 2%	
						LL [%]	LP [%]	IP [%]		% Limo	% Arcilla	% Limo	% Arcilla	% Limo	% Arcilla
1	San Jorge I	21°32'56.46"S 64°42'15.51"W	6.437	98.11%	2.72	30	19	11	CL	61.60	36.51	68.48	29.63	82.65	18.21
2	Pampa Galana	21°31'24.95"S 64°42'28.72"O	7.766	99.22%	2.66	34	20	14	CL	72.17	27.05	74.85	24.37	90.64	8.58
3	Miraflores	21°32'52.27"S 64°44'8.45"O	5.383	95.45%	2.7	43	23	20	CL	69.94	25.51	72.15	23.30	95.45	0
4	12 de Abril	21°30'36.60"S 64°42'30.27"O	6.831	98.77%	2.8	47	25	22	CL	74.06	22.73	78.65	20.12	88.96	9.81
5	El Constructor	21°31'21.96"S 64°42'48.04"O	8.091	99.47%	2.72	53	26	27	CH	58.18	41.29	64.02	35.45	86.42	12.63
6	Aranjuez	21°31'28.78"S 64°45'10.68"O	7.259	99.24%	2.73	55	27	28	CH	49.61	49.63	57.42	41.82	99.24	0
7	San Blas	21°33'35.95"S 64°43'39.18"O	6.231	98.68%	2.77	57	26	31	CH	61.81	36.87	67.48	31.21	83.22	14.90
8	Tablada Grande	21°33'41.57"S 64°44'58.22"O	9.035	99.05%	2.75	57	25	32	CH	42.70	56.35	51.35	47.70	84.04	15.01

Fuente : Elaboración propia

CAPÍTULO IV

COMPARACIÓN DE

AGENTES

DISPERSANTES POR EL

ENSAYO DEL

DENSÍMETRO 152H

CAPÍTULO IV

COMPARACIÓN DE AGENTES DISPERSANTES POR EL ENSAYO DEL DENSÍMETRO 152H

En el desarrollo del proyecto de grado se trabajó con tres tipos de agentes dispersantes: hexametáfosfato de sodio, silicato de sodio y cloruro de sodio. Cabe señalar que tanto el hexametáfosfato de sodio como el silicato de sodio cuentan con normativas establecidas que indican el uso de un 4% de dispersante para cada muestra de ensayo mediante el método del densímetro 152H. Sin embargo, el cloruro de sodio no cuenta con una normativa específica que determine el porcentaje adecuado para trabajar en este tipo de ensayos. Por este motivo, se procedió inicialmente a determinar el porcentaje óptimo de cloruro de sodio que permita alcanzar una adecuada dispersión de partículas en los suelos analizados. Una vez definido este valor, fue posible realizar la comparación de resultados con los obtenidos utilizando los otros dos agentes dispersantes normados.

Se realizaron ensayos en diferentes suelos recolectados en los barrios de la zona urbana de Tarija, utilizando cloruro de sodio en concentraciones del 2%, 4% y 6%. El objetivo fue determinar cuál de estos porcentajes proporciona la mejor capacidad de dispersión de partículas en suelos de naturaleza arcillosa. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

4.1 Comparación de la investigación para determinar el porcentaje óptimo de cloruro de sodio

4.1.1 Porcentajes de arcilla y limo detectada de cada suelo arcilloso para determinar el porcentaje más adecuado de cloruro de sodio

A continuación, se presentan los valores obtenidos de las fracciones de limo y arcilla correspondientes a cada uno de los porcentajes de cloruro de sodio (2%, 4% y 6%) utilizados en los ensayos.

Tabla 23: Comparación de porcentajes de arcilla y limo detectada de cada suelo arcilloso para determinar el porcentaje más adecuado de cloruro de sodio

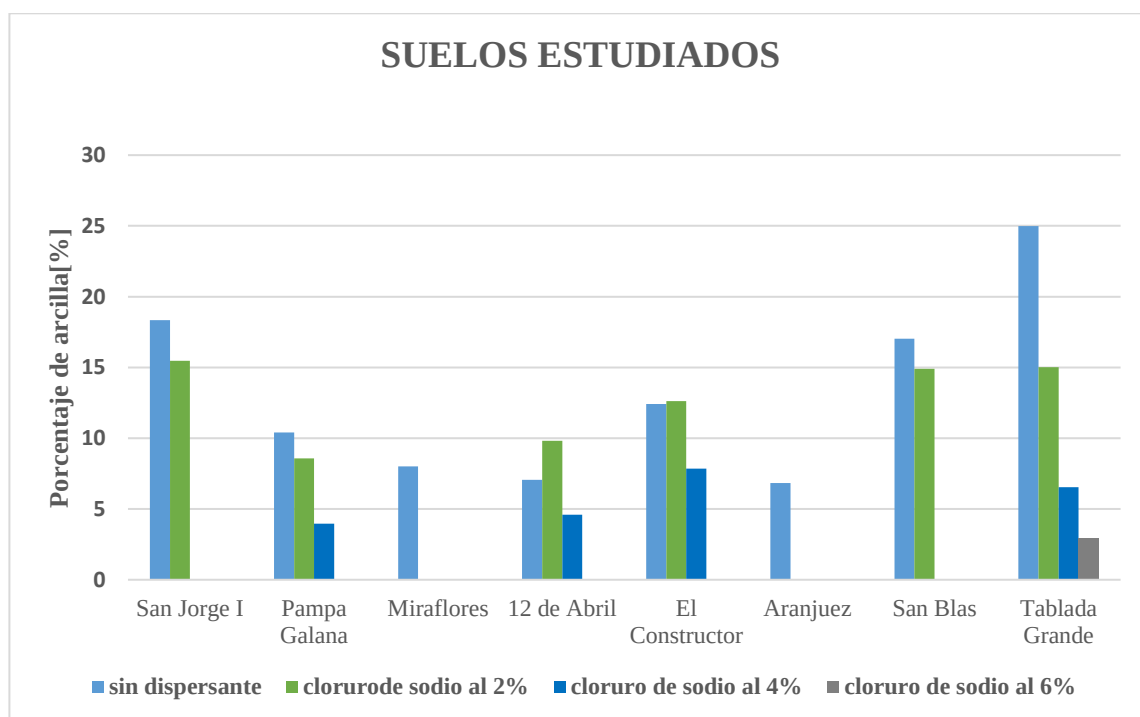
N°	Suelos	Partículas de	Sin dispersante	Cloruro de sodio al 2%	Cloruro de sodio al 4%	Cloruro de sodio al 6%	Clasificación de suelo
			[%]	[%]	[%]	[%]	sucs
1	San Jorge I	limo	79.76	82.65	98.11	98.11	CL
		arcilla	18.35	15.46	0	0	
2	Pampa Galana	limo	88.81	90.64	95.27	99.22	CL
		arcilla	10.41	8.58	3.96	0	
3	Miraflores	limo	87.43	95.45	89.58	95.45	CL
		arcilla	8.02	0	0	0	
4	12 de Abril	limo	91.71	88.96	94.18	98.77	CL
		arcilla	7.06	9.81	4.59	0	
5	El Constructor	limo	87.05	86.42	91.63	99.47	CH
		arcilla	12.42	12.63	7.84	0	
6	Aranjuez	limo	92.4	99.24	99.24	99.24	CH
		arcilla	6.84	0	0	0	
7	San Blas	limo	81.66	83.22	98.68	98.68	CH
		arcilla	17.02	14.9	0	0	
8	Tablada Grande	limo	74.06	84.04	92.52	96.15	CH
		arcilla	24.99	15.01	6.53	2.9	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 23, se presentan los valores obtenidos de las fracciones de limo y arcilla para cada uno de los suelos arcillosos estudiados mediante el ensayo del densímetro 152H. Los

resultados evidencian que, tanto en suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) como en suelos arcillosos de alta plasticidad (CH), se obtiene un mayor porcentaje de arcilla dispersada al utilizar un 2% de cloruro de sodio, en comparación con los porcentajes de 4% y 6%, los cuales muestran una menor cantidad de arcilla dispersada. A partir de esta comparación, se determina que el uso de un 2% de cloruro de sodio proporciona una mejor dispersión de las partículas finas en los suelos arcillosos analizados.

Gráfica 6: Cuadro comparativo en porcentajes de arcilla con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Fuente: Elaboración propia

Se puede evidenciar en la gráfica 6, correspondiente al ensayo del densímetro 152H, que en casi todas las muestras analizadas existe una diferencia significativa en el porcentaje de partículas menores a 0.002 mm al utilizar un 2% de cloruro de sodio, lo que indica una mayor dispersión de partículas finas en comparación con los porcentajes de 4% y 6%. Sin embargo, también se observa que con este porcentaje (2%) se obtiene una menor cantidad de arcilla respecto a los ensayos realizados al 0%, es decir, sin dispersante. Este resultado es poco favorable para la investigación, ya que sugiere que el cloruro de sodio puede tener

un efecto contrario al esperado, promoviendo la floculación de las partículas finas en suelos arcillosos tanto de baja plasticidad (CL) como de alta plasticidad (CH) en lugar de facilitar su dispersión.

4.1.2 Tiempo de sedimentación al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes porcentajes de cloruro de sodio

Tabla 24: Comparación del tiempo de sedimentación al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes porcentajes de cloruro de sodio

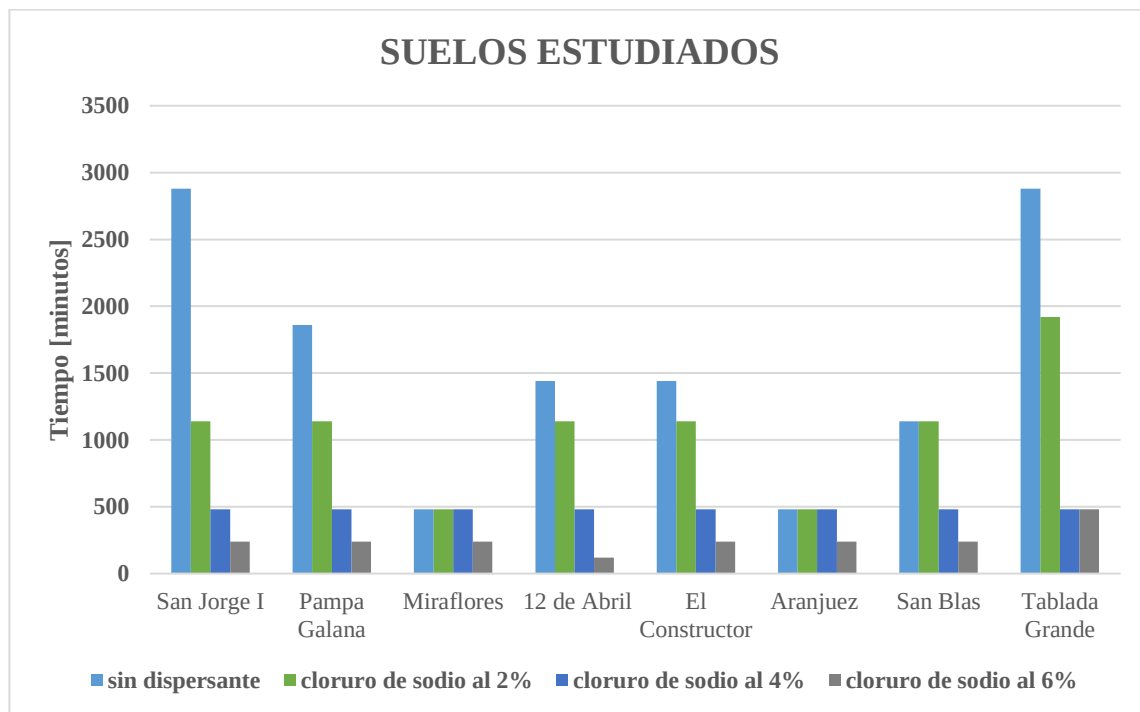
Suelos	Sin dispersante	Cloruro de sodio al 2%	Cloruro de sodio al 4%	Cloruro de sodio al 6%	Clasificación de suelo
	minutos	minutos	minutos	minutos	sucs
San Jorge I	2880	1140	480	240	CL
Pampa Galana	1860	1140	480	240	CL
Miraflores	480	480	480	240	CL
12 de Abril	1440	1140	480	120	CL
El Constructor	1440	1140	480	240	CH
Aranjuez	480	480	480	240	CH
San Blas	1140	1140	480	240	CH
Tablada Grande	2880	1920	480	480	CH

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 24, se presenta el tiempo total requerido para la ejecución del ensayo del densímetro 152H considerando los diferentes porcentajes de cloruro de sodio utilizados

(0%, 2%, 4% y 6%) en suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) y suelos arcillosos de alta plasticidad (CH).

Gráfica 7: Cuadro de comparación del tiempo de sedimentación final de suelos arcillosos con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Fuente: Elaboración propia

La gráfica 7, presenta los resultados de cada una de las muestras estudiadas, permitiendo observar y comparar el tiempo total requerido para la ejecución del ensayo del densímetro 152H en los diferentes suelos arcillosos. Se evidencia que, en la mayoría de las muestras, el tiempo total para un porcentaje de cloruro de sodio al 2% es mayor en comparación con los otros porcentajes evaluados. Esto se debe a que, al lograrse una mejor dispersión de las partículas con el 2% de cloruro de sodio, las partículas tardan más en sedimentar. En contraste, al aumentar el porcentaje de cloruro de sodio a 4% y 6%, se observa un efecto contrario al esperado: Las partículas tienden a aglomerarse, generando fenómenos de floculación, lo cual acelera la sedimentación y reduce la efectividad en la dispersión de las partículas finas de los suelos arcillosos. Asimismo, se observa que las muestras

ensayadas sin dispersante (0% de cloruro de sodio) presentan un tiempo mayor respecto a los porcentajes ensayados, lo cual no resulta favorable para los objetivos del estudio.

4.1.3 Diámetro de partículas más pequeña y porcentaje de arcilla en suspensión al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes porcentajes de cloruro de sodio

Tabla 25: Comparación del diámetro de partículas más pequeña y porcentaje de arcilla en suspensión al final del ensayo del densímetro 152H

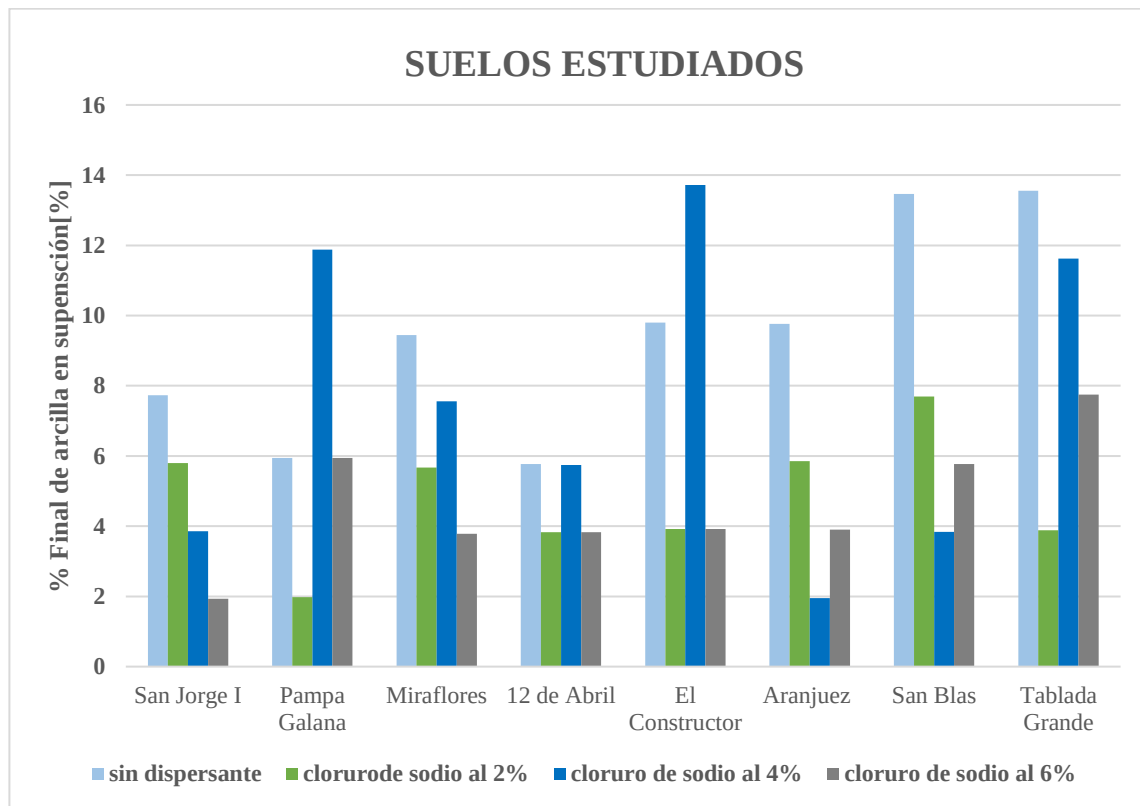
N°	suelos		sin disper sante	cloruro de sodio al 2%	cloruro de sodio al 4%	cloruro de sodio al 6%	Clasificación de suelo
1	San Jorge I	Diam. Part. (mm)	0.0010	0.0015	0.0024	0.0034	CL
		% Más Fino Total	7.73	5.80	3.86	1.93	
2	Pampa Galana	Diam. Part. (mm)	0.0012	0.0015	0.0024	0.0034	CL
		% Más Fino Total	5.94	1.98	11.88	5.94	
3	Miraflores	Diam. Part. (mm)	0.0024	0.0024	0.0024	0.0034	CL
		% Más Fino Total	9.44	5.67	7.56	3.78	
4	12 de Abril	Diam. Part. (mm)	0.0013	0.0015	0.0023	0.0047	CL
		% Más Fino Total	5.77	3.83	5.74	3.83	
5	El Constructor	Diam. Part. (mm)	0.0014	0.0015	0.0023	0.0033	CH
		% Más Fino Total	9.80	3.92	13.72	3.92	
6	Aranjuez	Diam. Part. (mm)	0.0023	0.0024	0.0024	0.0034	CH
		% Más Fino Total	9.76	5.85	1.95	3.90	
7	San Blas	Diam. Part. (mm)	0.0015	0.0015	0.0024	0.0033	CH
		% Más Fino Total	13.46	7.69	3.84	5.77	
8	Tablada Grande	Diam. Part. (mm)	0.0009	0.0012	0.0023	0.0023	CH
		% Más Fino Total	13.56	3.88	11.62	7.75	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 25, se presentan los diámetros de partículas correspondientes a cada suelo al finalizar los ensayos, así como el porcentaje de partículas en suspensión al concluir el ensayo del densímetro 152H. Esta información permite realizar una comparación entre los diferentes porcentajes de cloruro de sodio utilizados, considerando ambos parámetros mencionados.

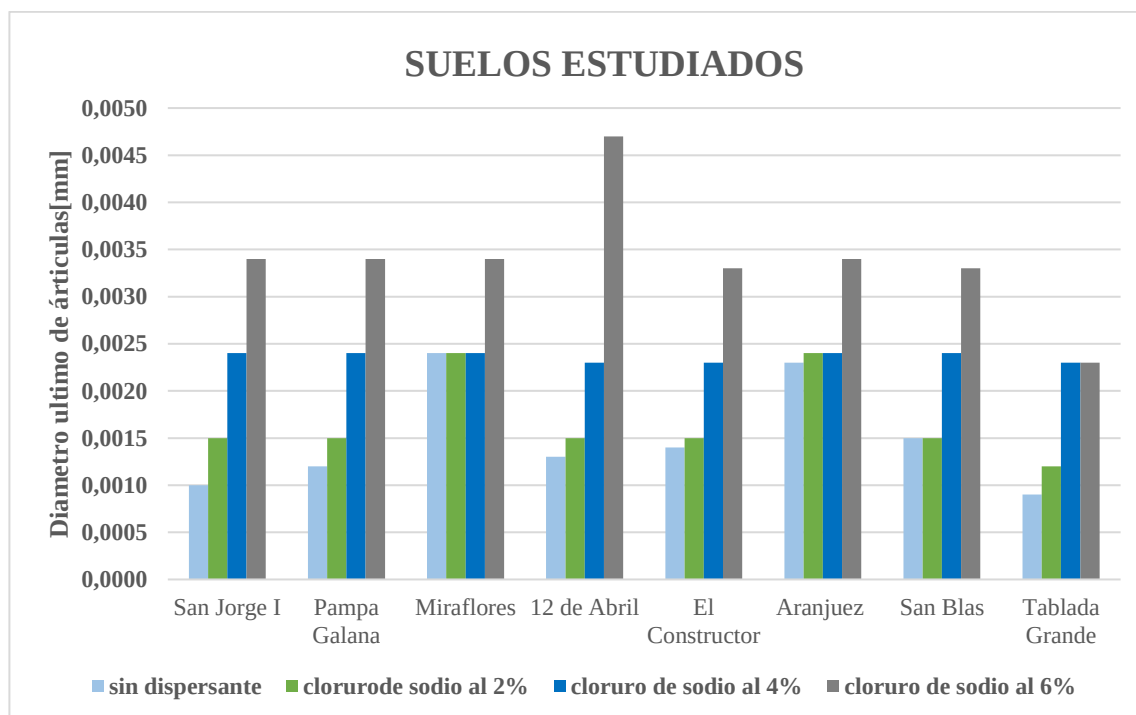
A continuación, se presentan los cuadros comparativos en forma de gráficas para cada uno de los suelos estudiados, detallando la relación entre el diámetro de partículas y el porcentaje de partículas en suspensión al finalizar el ensayo.

Gráfica 8: Cuadro comparativo del porcentaje de arcilla en suspensión al finalizar el ensayo del densímetro 152H con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9: Cuadro comparativo del diámetro ultimo de partículas al finalizar el ensayo del densímetro 152H con diferentes porcentajes de cloruro de sodio



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las gráficas comparativas 8 y 9, que permiten visualizar una comparación más precisa, se observa que prácticamente en todos los suelos estudiados tanto en suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) como en suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) los resultados indican que el cloruro de sodio al 2% es el candidato más efectivo. Este porcentaje logra mantener un mayor contenido de partículas finas en suspensión, evitando en mayor medida la floculación en comparación con las concentraciones del 4% y 6%. A concentraciones más bajas, como el 2%, el efecto de agrupamiento o floculación es reducido, lo que se traduce en partículas más pequeñas y correctamente dispersadas dentro del medio de ensayo.

Los datos obtenidos indican que el cloruro de sodio al 2% provoca una reducción en el tamaño promedio de las partículas en los diferentes tipos de suelos, sin incrementar excesivamente el diámetro de las partículas. Este comportamiento sugiere que el cloruro

de sodio al 2% es más efectivo para lograr una dispersión más uniforme y pura, evitando que las partículas tiendan a reagruparse de manera rápida.

En conclusión, tras realizar todas las comparaciones con los diferentes porcentajes de cloruro de sodio para determinar cuál es el más efectivo en la dispersión de partículas finas en suelos arcillosos mediante el ensayo del densímetro 152H, tanto en suelos de baja plasticidad (CL) como en suelos de alta plasticidad (CH), se concluye que el uso de un 2% de cloruro de sodio es el más efectivo. Esto se debe a que, a medida que aumenta el porcentaje de cloruro de sodio, también lo hace la floculación de las partículas, lo que disminuye la efectividad en la dispersión y la distribución granulométrica de las partículas finas en los suelos arcillosos. Por lo tanto, se optó por utilizar un 2% de cloruro de sodio en los ensayos realizados con el densímetro 152H, para luego compararlo con los dos agentes dispersantes normados, el hexametafosfato de sodio y el silicato de sodio.

4.2 Comparación de agentes dispersantes por ensayo del densímetro 152H

Una vez determinado que el porcentaje más efectivo de cloruro de sodio para la dispersión de partículas finas en suelos arcillosos es del 2%, se cuenta ya con los tres agentes dispersantes necesarios para realizar la comparación correspondiente en suelos arcillosos. Los agentes considerados para esta comparación son:

- Hexametafosfato de sodio
- Silicato de sodio
- Cloruro de sodio al 2%

A continuación, se mostrará los resultados obtenidos:

4.2.1 Porcentajes de arcilla y limo detectada de cada suelo arcilloso

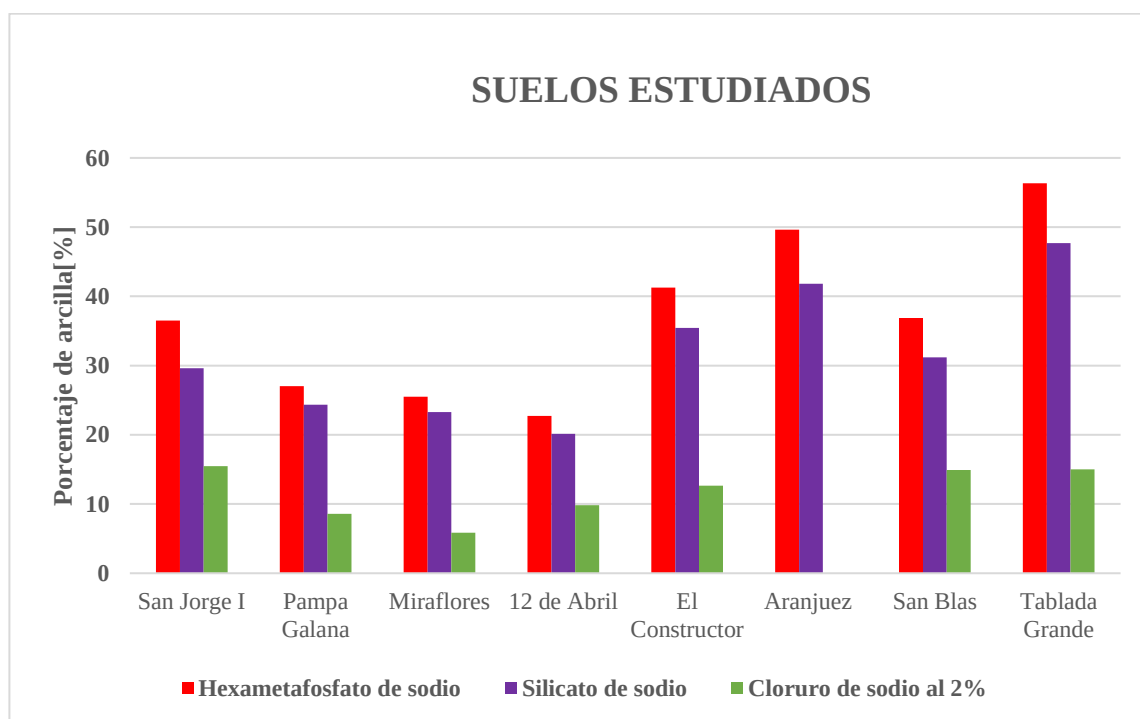
Tabla 26: Comparación de porcentajes de arcilla y limo detectada de cada suelo arcilloso

N°	Suelos	Partículas de	Hexametafosfato de sodio	Silicato de sodio	Cloruro de sodio al 2%	Clasificación de suelo
			[%]	[%]	[%]	sucs
1	San Jorge I	limo	61.6	68.48	82.65	CL
		arcilla	36.51	29.63	18.21	
2	Pampa Galana	limo	72.17	74.85	90.64	CL
		arcilla	27.05	24.37	8.58	
3	Miraflores	limo	69.94	72.15	95.45	CL
		arcilla	25.51	23.3	0	
4	12 de Abril	limo	74.06	78.65	88.96	CL
		arcilla	22.73	20.12	9.81	
5	El Constructor	limo	58.18	64.02	86.42	CH
		arcilla	41.29	35.45	12.63	
6	Aranjuez	limo	49.61	57.42	99.24	CH
		arcilla	49.63	41.82	0	
7	San Blas	limo	61.81	67.48	83.22	CH
		arcilla	36.87	31.21	14.9	
8	Tablada Grande	limo	42.7	51.35	84.04	CH
		arcilla	56.35	47.7	15.01	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26, se puede observar los valores de porcentajes de limo y arcilla que está comprendido cada suelo estudiado con los diferentes agentes dispersantes donde se puede evidenciar que el agente dispersante de hexametáfosfato de sodio tiene una mayor cantidad de suelo con un diámetro menor a 0.002 mm lo cual corresponde a arcilla. La diferencia en comparación con el cloruro de sodio al 2% es significativa mientras que en comparación con el agente dispersante de silicato de sodio existe una diferencia en cantidad de arcilla, pero no tan significativa esto se puede evidenciar en los suelos estudiados de baja plasticidad (CL) y suelos de alta plasticidad (CH).

Gráfica 10: Resumen de los cuadros comparativos de porcentajes de arcilla con diferentes agentes dispersantes



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 10, se muestran los porcentajes de arcilla obtenidos con cada dispersante utilizado para los diferentes tipos de suelos estudiados. Se observa que el hexametáfosfato de sodio es el agente dispersante más efectivo, registrando los porcentajes más altos de arcilla dispersada en todos los tipos de suelos analizados, siendo especialmente notable en el suelo de la zona de Tablada Grande, donde alcanza un 56,35% de arcilla dispersada.

Por su parte, el silicato de sodio presenta porcentajes menores en comparación con el hexametafosfato de sodio, pero aun así muestra resultados significativos, destacándose también en la zona de Tablada Grande con un 47,705% de arcilla dispersada. Finalmente, el cloruro de sodio al 2% arroja los porcentajes más bajos de arcilla dispersada, lo que indica su menor eficacia en la dispersión de partículas finas en suelos arcillosos.

4.2.2 Tiempo de sedimentación al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes agentes dispersantes

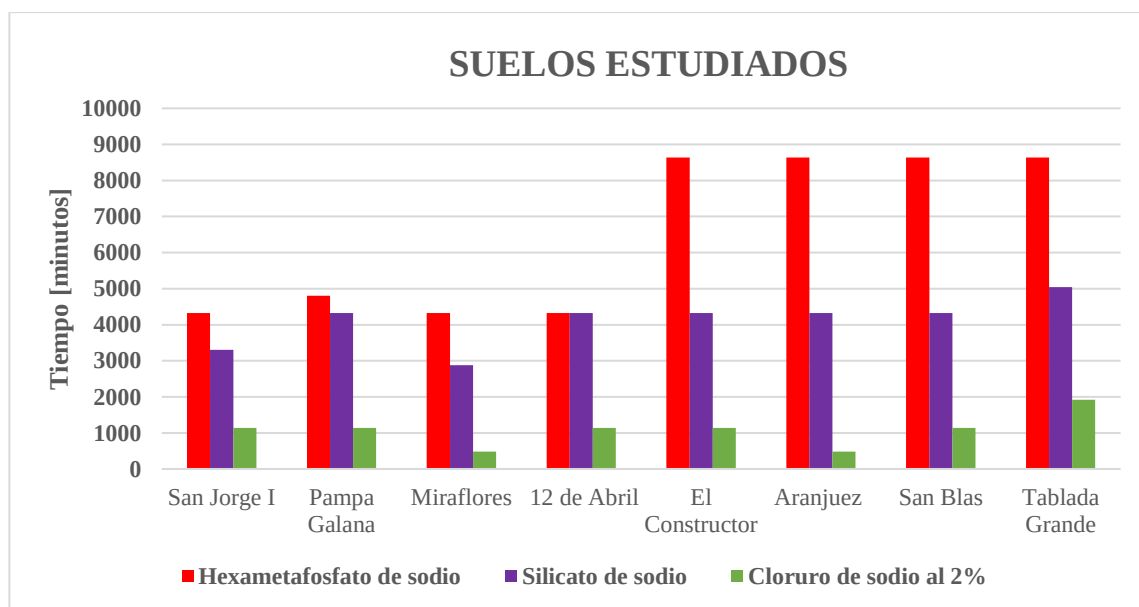
Tabla 27: Comparación del tiempo de sedimentación al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes agentes dispersantes

N°	Suelos	Hexametafosfato de sodio	Silicato de sodio	Cloruro de sodio al 2%	Clasificación de suelo
		minutos	minutos	minutos	sucs
1	San Jorge I	4320	3300	1140	CL
2	Pampa Galana	4800	4320	1140	CL
3	Miraflores	4320	2880	480	CL
4	12 de Abril	4320	4320	1140	CL
5	El Constructor	8640	4320	1140	CH
6	Aranjuez	8640	4320	480	CH
7	San Blas	8640	4320	1140	CH
8	Tablada Grande	8640	5040	1920	CH

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 27, se presenta el tiempo total en minutos, que tomó finalizar los ensayos realizados mediante el densímetro 152H en cada uno de los suelos arcillosos considerando los diferentes agentes dispersantes utilizados. A continuación, se muestran gráficos comparativos que permiten visualizar el tiempo total empleado en cada suelo estudiado, facilitando el análisis entre los distintos dispersantes aplicados.

Gráfica 11: Cuadro comparativo del tiempo final de sedimentación con diferentes agentes dispersantes



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 11, se observa que, al utilizar el dispersante de hexametáfosfato de sodio, los tiempos de ensayo varían entre 4.320 y 8.640 minutos. Aunque estos tiempos son mayores en comparación con los obtenidos usando otros dispersantes, su capacidad de dispersión es superior, ya que logra reducir de manera más efectiva las fuerzas de atracción entre las partículas de arcilla, traduciéndose en una separación más eficiente. Por otro lado, al emplear el agente dispersante de silicato de sodio, los tiempos registrados son menores, con un máximo de 4.320 minutos, ofreciendo así un buen balance entre eficiencia y duración del ensayo, lo que lo posiciona como una alternativa viable para la dispersión de partículas en suelos arcillosos. Finalmente, al trabajar con el dispersante de cloruro de sodio, los tiempos son notablemente más bajos, con un rango de 480 a 1.140 minutos, lo

cual indica una menor efectividad en la dispersión de partículas y limita su aplicación en comparación con los otros agentes dispersantes analizados.

4.2.3 Diámetro de partículas más pequeña y porcentaje de arcilla en suspensión al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes agentes dispersantes

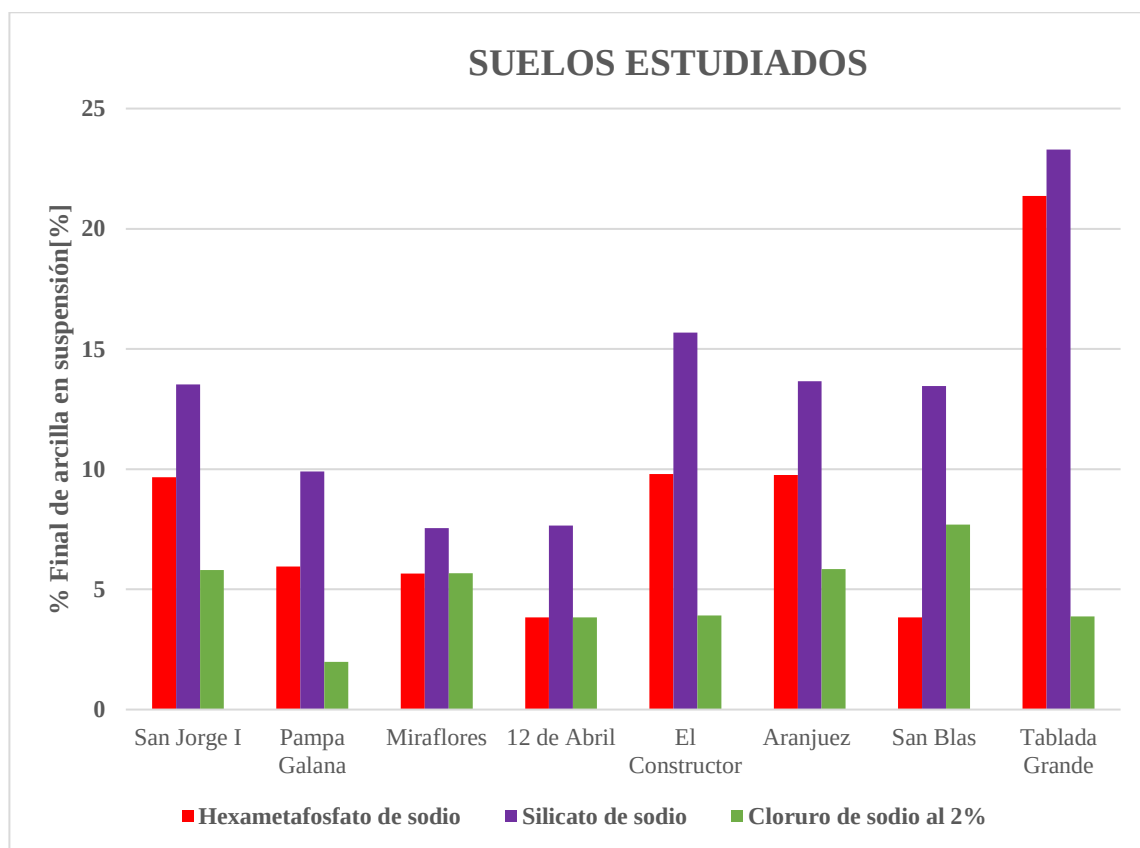
Tabla 28: Comparación del diámetro de partículas más pequeña y porcentaje de arcilla en suspensión al final del ensayo del densímetro 152H con diferentes agentes dispersantes

N°	Suelos		Hexametafosfato de sodio	Silicato de sodio	Cloruro de sodio al 2%	Clasificación de suelo (sucs)
1	San Jorge I	Diam. Part. (mm)	0.0008	0.0009	0.0015	CL
		% Más Fino Total	9.66	13.53	5.80	
2	Pampa Galana	Diam. Part. (mm)	0.0008	0.0008	0.0015	CL
		% Más Fino Total	5.95	9.90	1.98	
3	Miraflores	Diam. Part. (mm)	0.0008	0.0010	0.0024	CL
		% Más Fino Total	5.66	7.55	5.67	
4	12 de Abril	Diam. Part. (mm)	0.0008	0.0008	0.0015	CL
		% Más Fino Total	3.83	7.66	3.83	
5	El Constructor	Diam. Part. (mm)	0.0006	0.0008	0.0015	CH
		% Más Fino Total	9.80	15.68	3.92	
6	Aranjuez	Diam. Part. (mm)	0.0005	0.0008	0.0024	CH
		% Más Fino Total	9.76	13.66	5.85	
7	San Blas	Diam. Part. (mm)	0.0006	0.0008	0.0015	CH
		% Más Fino Total	3.84	13.46	7.69	
8	Tablada Grande	Diam. Part. (mm)	0.0005	0.0007	0.0012	CH
		% Más Fino Total	21.36	23.30	3.88	

Fuente: Elaboración propia

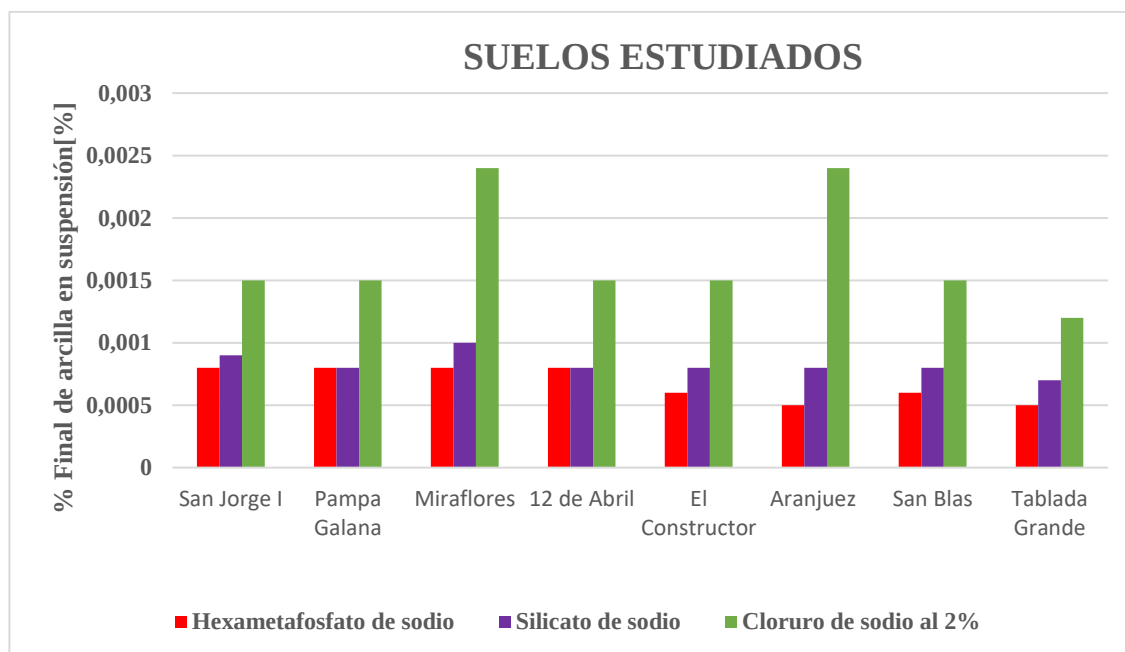
En la tabla 28, se presentan los valores obtenidos de los diámetros finales de cada suelo estudiado, así como los porcentajes de suelo fino en suspensión correspondientes a cada muestra analizada mediante el ensayo del densímetro 152H en suelos arcillosos. Esta tabla permite realizar una comparación de los resultados obtenidos de acuerdo con los diferentes agentes dispersantes utilizados en cada uno de los suelos arcillosos, facilitando el análisis de la eficacia de cada dispersante en la dispersión de las partículas finas.

Gráfica 12: Cuadro comparativo de arcilla en suspensión al finalizar el ensayo con diferentes agentes dispersantes.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13: Cuadro comparativo de los diámetros de partícula ultima al finalizar el ensayo con diferentes agentes dispersantes.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 12, se observa que el hexametáfosfato de sodio presenta porcentajes de arcilla en suspensión al finalizar el ensayo por densímetro 152H que oscilan entre 3.83% y 21.36%, destacándose especialmente el suelo de Tablada Grande, que muestra un alto porcentaje de arcilla en suspensión. Por otro lado, el silicato de sodio arroja valores de arcilla en suspensión más altos que el hexametáfosfato de sodio, con un rango que va desde 7.55% hasta 23.30%. En cambio, el cloruro de sodio presenta los porcentajes más bajos de material fino en suspensión, con valores que varían entre 1.98% y 7.69%, indicando una menor efectividad para mantener la arcilla en suspensión.

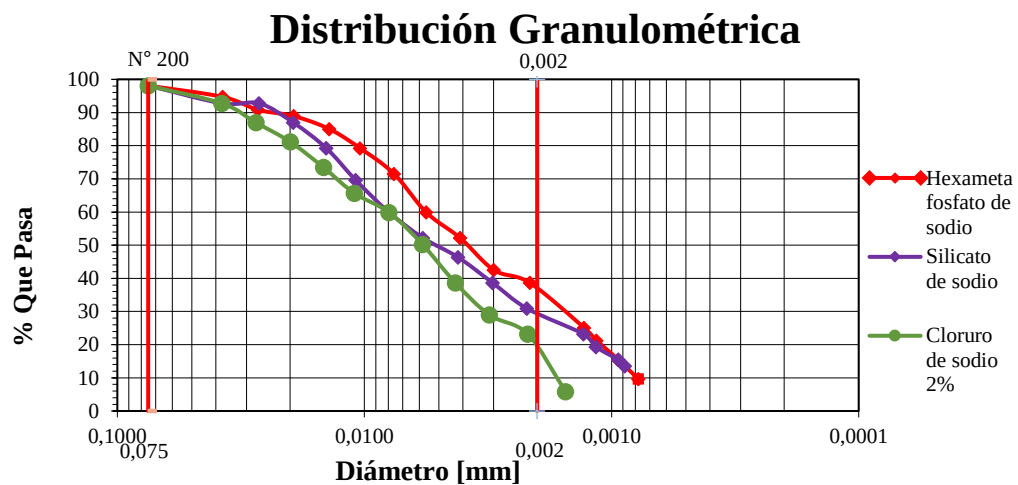
En la gráfica 13, se observa que el dispersante de hexametáfosfato de sodio produce los diámetros más pequeños de partículas, que varían entre 0.0008 mm y 0.0005 mm, siendo especialmente notables en los suelos arcillosos de alta plasticidad (CH), lo que indica una dispersión eficiente y una mejor caracterización granulométrica. Por otro lado, el dispersante de silicato de sodio presenta diámetros de partículas que oscilan entre 0.0010 mm y 0.0007 mm, mostrando una dispersión algo menos estable, aunque aún válida para análisis, el cloruro de sodio genera diámetros de partículas más grandes, desde 0.0024 mm

hasta 0.0012 mm, lo que sugiere una dispersión menos efectiva y limita su uso para obtener una dispersión óptima en suelos arcillosos.

4.2.4 Curva de distribución granulométrica de los suelos arcillosos estudiados con los diferentes agentes dispersantes

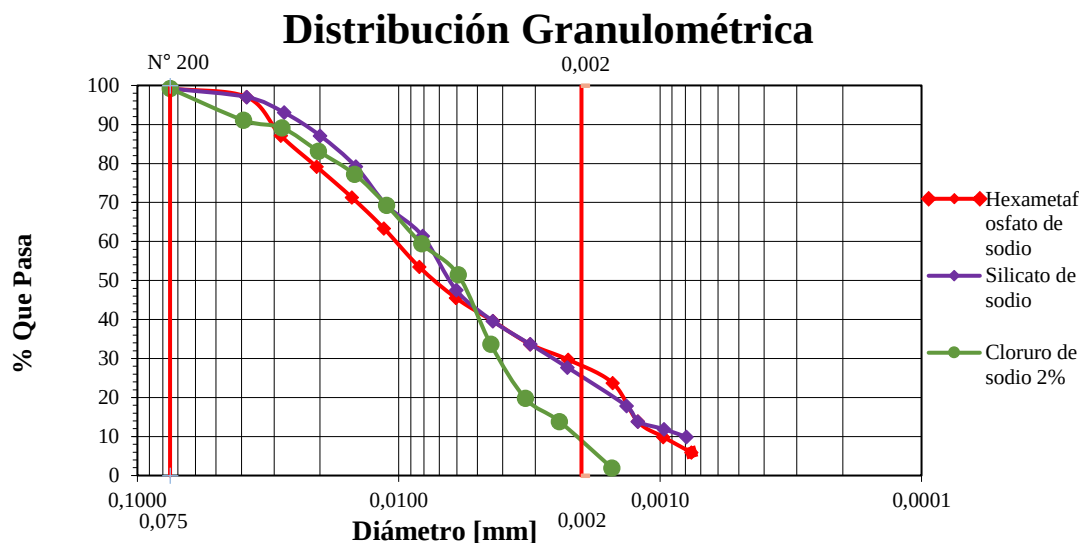
4.2.4.1 Comparación en suelos arcillosos de baja plasticidad (CL)

Gráfica 14: Distribución granulométrica de la zona de San Jorge I



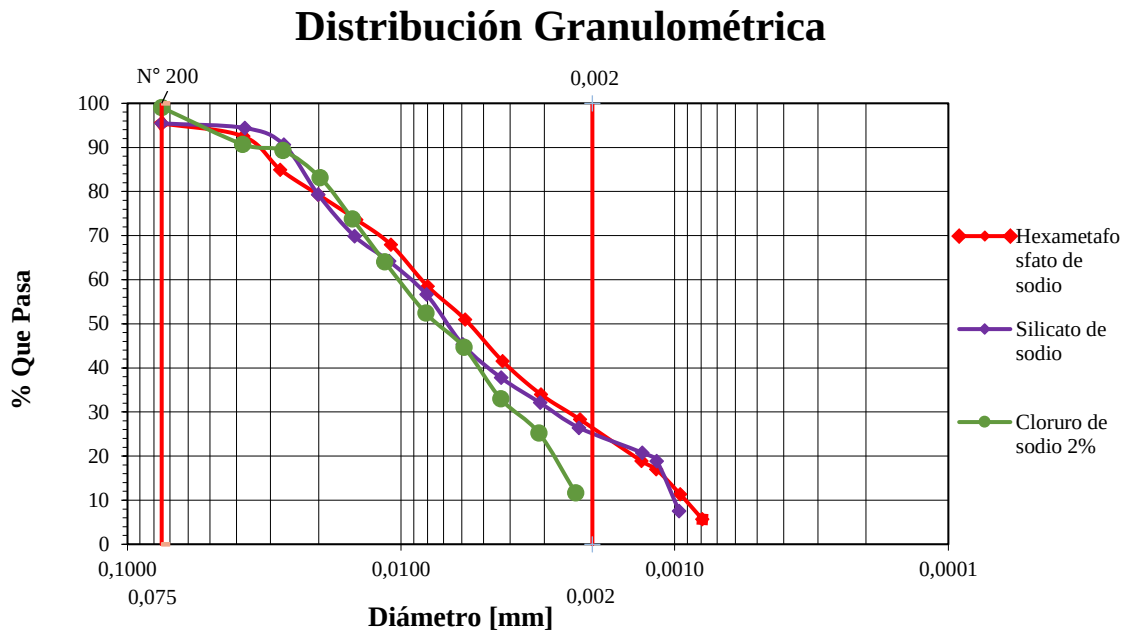
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 15: Distribución granulométrica de la zona de Pampa Galana



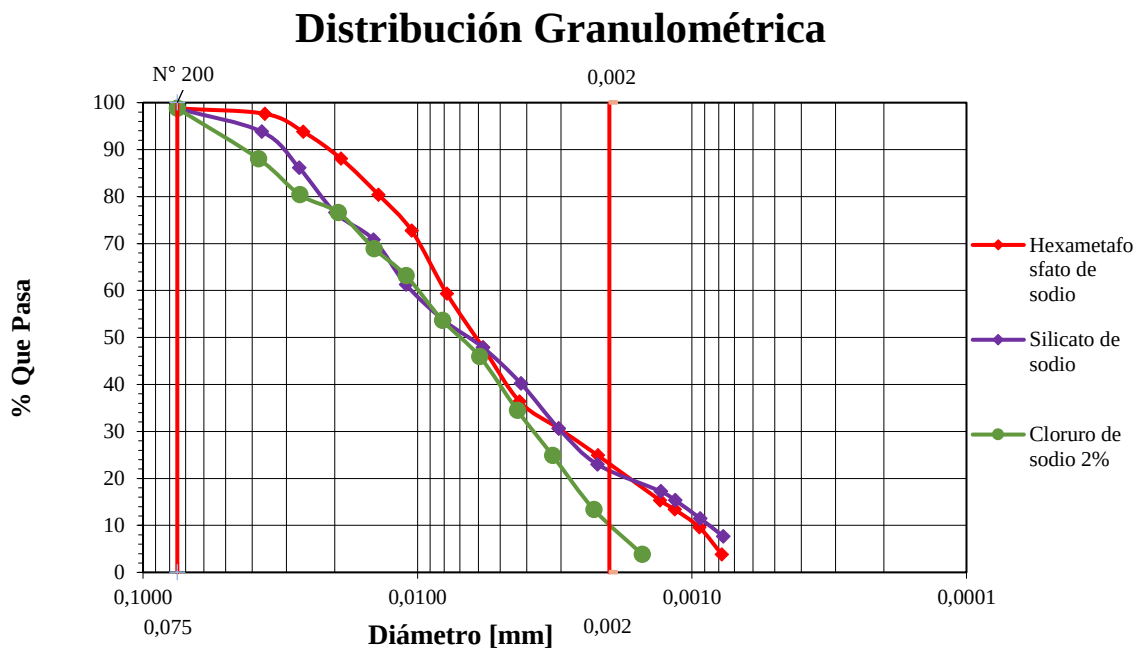
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 16: Distribución granulométrica de la zona de Miraflores



Fuente: Elaboración propia

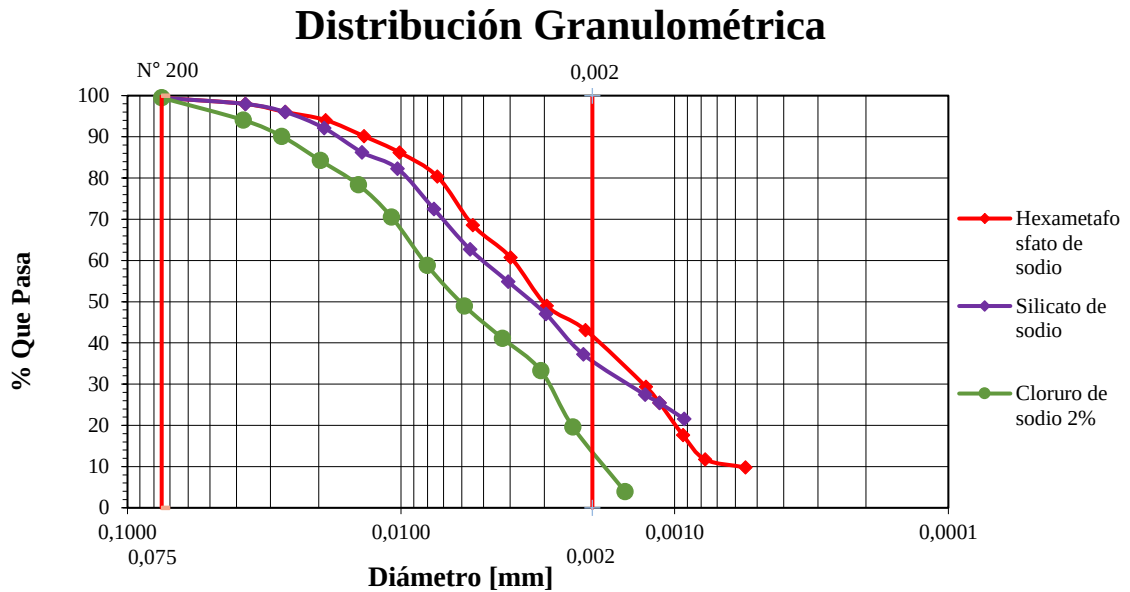
Gráfica 17: Distribución granulométrica de la zona de 12 de Abril



Fuente: Elaboración propia

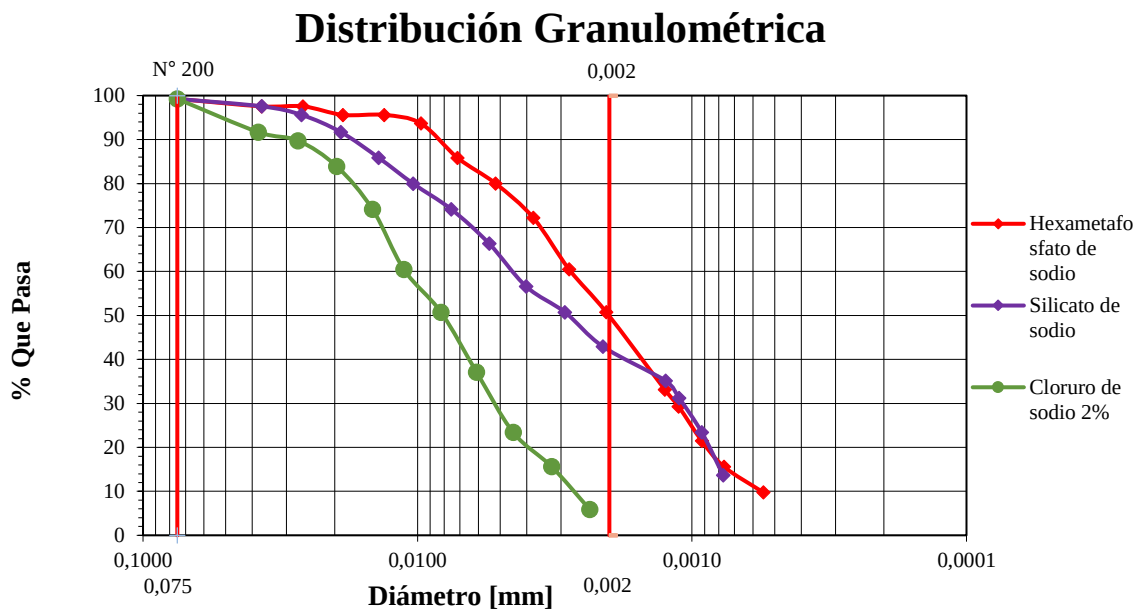
4.2.4.2 Comparación en suelos arcillosos de alta plasticidad (CH)

Gráfica 18: Distribución granulométrica de la zona de El Constructor



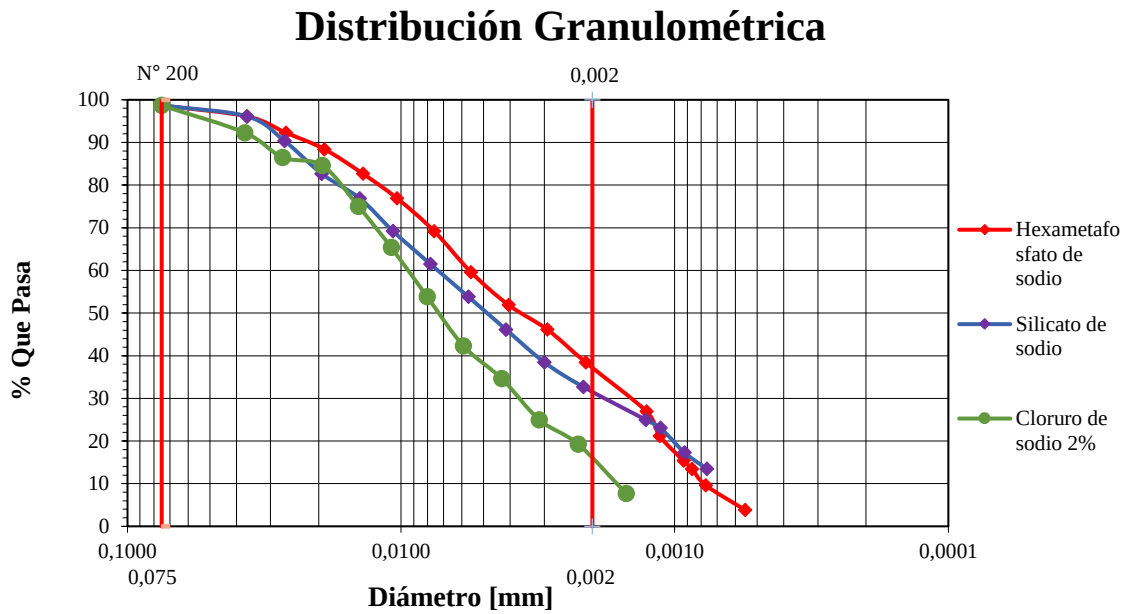
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 19: Distribución granulométrica de la zona de Aranjuez



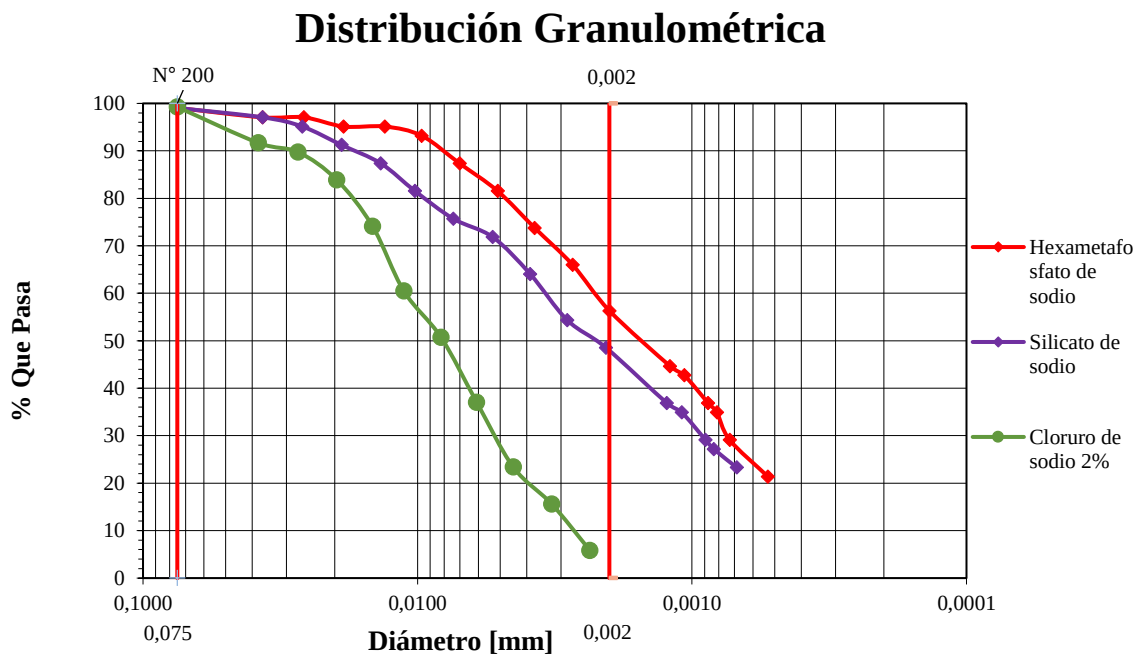
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 20: Distribución granulométrica de la zona de San Blas



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 21: Distribución granulométrica de la zona de Tablada Grande



Fuente: Elaboración propia

En las gráficas de curva granulométrica de todos los suelos estudiados, se puede observar la distribución granulométrica de los suelos arcillosos, tanto de baja plasticidad (CL) como de alta plasticidad (CH), mediante el ensayo del densímetro 152H con los dispersantes de hexametafosfato de sodio, silicato de sodio y cloruro de sodio al 2%. La curva de distribución granulométrica para el dispersante de hexametafosfato de sodio muestra una mayor pendiente en el rango de partículas finas, entre 0.075 mm y 0.002 mm, lo que indica una mayor dispersión de partículas pequeñas. Este dispersante es capaz de romper las fuerzas cohesivas entre las partículas arcillosas, separándolas con mayor facilidad. Su curva presenta un cambio gradual de pendiente a medida que se aproxima a las partículas más finas, y se observa una mayor acumulación en el extremo derecho (tamaño de partículas más finas), lo que evidencia su capacidad para disgregar las partículas finas de manera más uniforme en comparación con los otros dispersantes.

El agente dispersante de silicato de sodio también muestra una buena dispersión, aunque inferior a la del hexametafosfato de sodio. En el rango cercano a 0.075 mm, las curvas son menos pronunciadas, lo que sugiere que el silicato de sodio no es tan efectivo para romper las uniones entre partículas finas como el hexametafosfato de sodio. Aunque se observa que el silicato de sodio dispersa bien las partículas, su curva tiende a estabilizarse más rápidamente, lo que indica que su capacidad para disgregar partículas más pequeñas es menor. Esto limita su efectividad en suelos con alto contenido de arcilla, como los suelos arcillosos, reduciendo su capacidad para separar partículas de tamaños muy finos.

El agente dispersante de cloruro de sodio al 2% muestra la menor dispersión de partículas en el rango de partículas finas. La pendiente de su curva es significativamente menor en comparación con las curvas de los otros agentes dispersantes, lo que indica que el cloruro de sodio al 2% tiene una capacidad muy limitada para disgregar las partículas más pequeñas de suelos arcillosos. Con este dispersante, la curva se estabiliza rápidamente, lo que sugiere que no logra romper los agregados de las partículas arcillosas con la misma eficiencia que los otros dispersantes. Esta limitación es aún más evidente, resultando en una menor separación de partículas de tamaños pequeños.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se realizó una búsqueda de suelos arcillosos en diferentes barrios de la zona urbana de Tarija-Cercado y se optó por 8 barrios para la extracción de muestras inalteradas.
- Se realizó la caracterización geotécnica de los suelos arcillosos extraídos, mediante ensayos de laboratorio que permitieron clasificar los materiales, identificando suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) y suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS.
- El uso del cloruro de sodio al 2% demostró ser más efectivo para la dispersión de partículas finas en suelos arcillosos en comparación con los porcentajes de 4% y 6% de cloruro de sodio. Demostrando que mientras más porcentaje de cloruro de sodio mayor es la floculación de partículas.
- La duración de los tiempos de sedimentación, se observa diferencias notables entre los dispersantes. El hexametáfosfato de sodio, aunque con tiempos más largos, demostró ser efectivo en disgregar las partículas de arcilla, lo que sugiere que el tiempo de sedimentación está relacionado con su capacidad de dispersión. El silicato de sodio presentó tiempos intermedios, lo que lo convierte en una opción viable. En cambio, los tiempos más cortos del cloruro de sodio al 2% indican una menor dispersión, reduciendo el tiempo de sedimentación, pero también su efectividad.
- De la determinación del porcentaje de arcilla en los suelos mediante el método del densímetro 152H. El hexametáfosfato de sodio resultó ser el dispersante más efectivo, mostrando los mayores porcentajes de arcilla en todos los suelos. El silicato de sodio presentó valores ligeramente inferiores, mientras que el cloruro de sodio al 2% mostró los porcentajes de arcilla más bajos, evidenciando su menor capacidad de dispersión.

- El hexametafosfato de sodio produjo partículas de diámetro consistentemente pequeño, garantizando una suspensión homogénea. El silicato de sodio presentó mayor variación en los diámetros, mientras que el cloruro de sodio al 2% generó partículas de mayor tamaño, lo que afecta la uniformidad en la distribución de partículas en suspensión y podría influir en la precisión de los resultados de otros análisis.
- El hexametafosfato de sodio mostró una curva de distribución granulométrica con una pendiente pronunciada, indicando su alta efectividad para disgregar y mantener las partículas pequeñas en suspensión, siendo ideal para suelos arcillosos. El silicato de sodio presentó una pendiente más suave, lo que refleja su menor capacidad para separar partículas finas. El cloruro de sodio al 2% tuvo la pendiente menos pronunciada, evidenciando su limitada efectividad en la disgregación de partículas, lo que lleva a una rápida estabilización y menor acumulación de partículas finas.
- Las comparaciones entre los tres dispersantes muestran que el hexametafosfato de sodio es el más eficaz para suelos arcillosos. Logra los mayores porcentajes de arcilla, presenta los diámetros más pequeños y tiene una curva granulométrica pronunciada, lo que indica su capacidad superior para separar partículas. El silicato de sodio es efectivo, pero menos eficiente, mientras que el cloruro de sodio al 2% presentó el menor rendimiento con bajos porcentajes de arcilla, diámetros mayores y tiempos de sedimentación más cortos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar con el agente dispersante del Hexametafosfato de sodio para ensayos del densímetro 152H en suelos arcillosos cuando se requiera de valores más precisos y exactos en la dispersión de partículas.
- Se recomienda no usar el cloruro de sodio como un agente dispersante para el ensayo por método del densímetro 152H debido a que presenta una dispersión de partículas de suelo fino muy limitada el cual presenta una acción contraria a la dispersión haciendo que las partículas de arcilla lleguen a flocular y tenga una

sedimentación más rápida lo que afecta la precisión y confiabilidad de los resultados.

- Se recomienda considerar el tipo de suelos antes de elegir el dispersante ya que en suelos arcillosos de alta plasticidad el hexametáfosfato de sodio es claramente superior mientras que en suelos de baja plasticidad podría utilizarse el silicato de sodio como una alternativa aceptable.
- Se recomienda promover estudios similares en otras regiones y tipos de suelos, para validar los resultados.