

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Durante años, se han realizado diversos estudios enfocados en la reducción de la plasticidad de suelos arcillosos mediante la incorporación de cenizas de residuos agrícolas e industriales, con la finalidad de reusarlos como aditivos estabilizadores, que ofrezcan soluciones tanto económicas como ambientales.

En países como Sudáfrica, donde se genera una gran cantidad de residuos de papel cada año, se realizaron estudios sobre el uso de ceniza de papel como estabilizador de suelos, obteniéndose resultados prometedores. De manera similar, en Indonesia, estudios recientes han demostrado que la incorporación de ceniza de papel usado reduce significativamente el índice de plasticidad en suelos arcillosos. Este efecto se atribuye a la composición química de la ceniza de papel, rica en cal, sílice y aluminio, que la hace comparable al cemento y le confiere propiedades puzolánicas favorables para la estabilización y disminución de la plasticidad del suelo.

Según (Byiringiro, 2014), en su análisis sobre el efecto de las cenizas de fábricas de papel en las propiedades de suelos expansivos, se establece que la adición de ceniza de papel tiene un impacto positivo en suelos arcillosos, logrando reducir el índice de plasticidad y mejorando su trabajabilidad en comparación con las arcillas no tratadas. Además, al igual que la estabilización con cal, la ceniza de papel provoca un intercambio catiónico inmediato, así como la floculación y aglomeración del suelo.

(Putra, 2022), por su parte, en su estudio sobre la eficacia de la ceniza de papel usado para la estabilización de suelos arcillosos, demostró que el índice de plasticidad disminuye al incrementarse el porcentaje de ceniza de papel, atribuyendo esta reducción a la interacción química entre los componentes de la ceniza y las partículas del suelo, que mejora sus propiedades físicas.

En Bolivia aún no se vio estudios de uso de ceniza de papel en suelos, a pesar de que diariamente se produce una gran cantidad de papel usado. Si bien la mayor parte es enviada a recicladoras para su reutilización, este proceso consume grandes volúmenes de agua, un recurso cada vez más escaso, además genera lodos residuales que suelen ser desechados en vertederos o incinerados, contribuyendo a la contaminación ambiental sin un aprovechamiento.

Con el objetivo de reducir la plasticidad de las arcillas y de darle un nuevo uso al papel usado, en esta investigación se pretende estudiar el comportamiento del índice de plasticidad de las arcillas de baja compresibilidad con la adición de cenizas de papel usado, a través de ensayos de laboratorio y asimismo poder encontrar un nuevo material alternativo que pueda ser utilizado en aplicaciones geotécnicas.

1.2 Situación problemática.

En geotécnica vial, uno de los mayores desafíos es el comportamiento impredecible de los suelos arcillosos debido a sus características plásticas que, si bien pueden ser útiles en ciertas condiciones, resultan problemáticas en aplicaciones viales. La plasticidad, entendida como la capacidad del suelo para deformarse sin fracturarse en presencia de humedad, se convierte en un factor crítico en el diseño y construcción de caminos pavimentados y no pavimentados.

Un índice de plasticidad elevado en las arcillas indica una mayor sensibilidad a las variaciones de humedad, lo que genera deformaciones que afectan directamente la estabilidad y funcionalidad de las estructuras viales. Entre las consecuencias más comunes se encuentra la aparición de grietas, asentamientos diferenciales, pérdida de capacidad portante y fallas prematuras del pavimento. Estas condiciones incrementan los costos de mantenimiento y comprometen la seguridad y durabilidad de las obras.

El problema se agrava en regiones donde los caminos están expuestos directamente a los efectos del clima y en zonas donde las arcillas son frecuentes. En épocas de lluvia, estos

suelos absorben agua y se ablandan; durante la sequía, se endurecen y se agrietan. Este comportamiento compromete seriamente la calidad y la vida útil de las carreteras.

Ante esta problemática surge la necesidad de estabilizar las arcillas en función de la plasticidad y la ceniza de papel, por su origen reciclado y sostenible, ha sido propuesta como aditivo estabilizante. Sin embargo, existe escasa evidencia sobre su efectividad específica en suelos locales. Por ello, esta investigación busca analizar cómo influye la adición de ceniza de papel en el índice de plasticidad de arcillas de baja compresibilidad, con el fin de evaluar su viabilidad como solución sostenible en proyectos viales.

1.2.1 Problema

¿Cuál es el comportamiento del índice de plasticidad de arcillas de baja compresibilidad al mezclar con diferentes porcentajes de ceniza de papel?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Relevancia: La presente investigación propone una alternativa innovadora y sostenible para la mejora de suelos arcillosos mediante la incorporación de ceniza de papel usado como material estabilizador. Esta propuesta busca reducir el índice de plasticidad de las arcillas de baja compresibilidad, mejorando su comportamiento geotécnico y su aplicabilidad en proyectos de infraestructura vial. Además, promueve el aprovechamiento de residuos sólidos, contribuyendo así a la disminución del impacto ambiental.

Factibilidad: La investigación es viable debido a la abundancia de arcillas en el distrito 12 de la ciudad de Tarija. Además, el material necesario es fácilmente accesible, ya que la ceniza se obtendrá mediante la combustión de papel bond usado en el laboratorio de Ingeniería Química de la UAJMS con los equipos y condiciones necesarias. Esto facilita la obtención del estabilizador y, a su vez, contribuye a la reducción de residuos de papel y la contaminación ambiental.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial

Delimitación temporal: La recolección de muestras, preparación de mezclas y la realización de los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en el segundo semestre de 2023, en las instalaciones del Laboratorio de Suelos y del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS).

Delimitación espacial: La investigación se desarrolla en el distrito 12 de la ciudad de Tarija, Bolivia, en los barrios San Blas, Miraflores, Germán Buch, San Martín y Aranjuez, donde se han identificado gran cantidad de arcillas de baja compresibilidad, que serán utilizadas como muestras para el estudio.

1.3 Justificación

Garantizar la estabilidad y capacidad portante de la subrasante en obras viales es un reto crítico cuando se tiene suelo arcilloso con elevada plasticidad. Esta propiedad provoca que el suelo sea altamente sensible a los cambios de humedad, lo que se traduce en deformaciones, pérdida de soporte, asentamientos diferenciales y agrietamientos del pavimento. Estas fallas estructurales no solo comprometen la seguridad y funcionalidad de las vías, sino que incrementan significativamente los costos de mantenimiento y rehabilitación.

En este contexto, la reducción del índice de plasticidad (IP) de suelos arcillosos es una necesidad prioritaria en proyectos de construcción y conservación de carreteras. El IP es un parámetro clave en la clasificación de suelos y permite predecir su desempeño mecánico. Disminuirlo mejora su trabajabilidad, estabilidad volumétrica y capacidad de soporte, factores esenciales para garantizar la durabilidad de caminos pavimentados y no pavimentados.

El uso de materiales alternativos y sostenibles para la estabilización de suelos ha ganado interés en los últimos años. La ceniza de papel, por su contenido de cal, sílice y alúmina presenta un potencial de reactividad puzolánica que, según investigaciones previas, puede modificar la estructura interna del suelo y reducir su plasticidad. En estudios realizados

en países como Sudáfrica e Indonesia, la ceniza de papel se ha considerado un aditivo de bajo costo y fácil obtención, mostrando resultados favorables en la estabilización de suelos problemáticos.

Además de su posible beneficio técnico, la utilización de ceniza de papel fomenta la reutilización de residuos industriales, promoviendo prácticas de construcción sostenibles. Este enfoque permite aprovechar recursos disponibles y ofrecer una alternativa económicamente competitiva frente a estabilizantes comerciales convencionales.

Esta investigación se centra en evaluar el efecto de la adición de ceniza de papel sobre el índice de plasticidad de arcillas de baja compresibilidad provenientes del distrito 12 de la ciudad de Tarija, donde este tipo de suelos es común. Al analizar cómo varía el IP con diferentes porcentajes de ceniza, se busca establecer su viabilidad como agente estabilizante en el contexto local.

De esta manera, el estudio pretende aportar soluciones técnicas sustentables para el control de la plasticidad del suelo, fomentar el aprovechamiento eficiente de residuos y, potencialmente, contribuir a la reducción de los costos de construcción y mantenimiento en obras viales, favoreciendo el desarrollo técnico, social y ambiental de la región.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento del índice de plasticidad de arcillas de baja compresibilidad, a través de mezclas con diferentes porcentajes de ceniza de papel, para mejorar sus propiedades físicas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar las arcillas de baja compresibilidad y la ceniza de papel reciclado
- Realizar la caracterización de las arcillas
- Determinar las propiedades físicas y químicas de la ceniza

- Determinar el comportamiento del índice de plasticidad de las arcillas de baja compresibilidad, mezclando con porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de ceniza de papel.

1.5 Hipótesis

La adición de ceniza de papel a arcillas de baja compresibilidad reduce su índice de plasticidad, mejorando su comportamiento para aplicaciones en obras de infraestructura vial.

1.6 Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.1 Conceptualización y operacionalización de las variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR/ACCIÓN
Cantidad de Ceniza de papel en arcillas	Se refiere a un incremento gradual de la ceniza de papel a la masa seca de arcilla de baja compresibilidad	Masa de arcilla seca	Gramos (g)	Preparación previa de la muestra según norma
		Ceniza de papel	Porcentaje (%)	Calculada respecto del peso total de la muestra seca. Se usará por lo menos 5 valores
		Mezcla arcilla-Ceniza de papel	Gramos (g)	Realizada por separado en función a los valores determinados, por lo menos tres por valor o porcentaje.
VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR/ACCIÓN
Valor del Índice de plasticidad	Es el cumplimiento de la combinación de la ceniza de papel con arcilla de baja compresibilidad en los valores obtenidos del índice de plasticidad verificados contra parámetros de especificaciones técnicas normalizadas	Límite Líquido	Porcentaje (%)	Uso de la copa de casa grande
		Límite Plástico	Porcentaje (%)	Rajadura de los rollitos de 3 milímetros de suelo

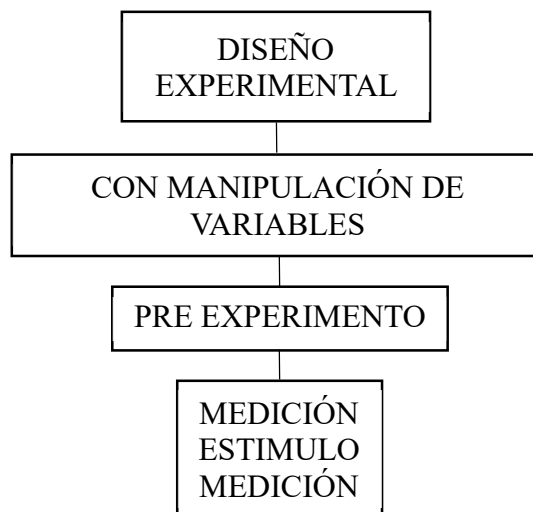
Fuente: Elaboración propia

1.7 Identificación del tipo de investigación

La presente investigación es de tipo explicativa o causal, ya que busca determinar el efecto que produce la adición de diferentes porcentajes de ceniza de papel (variable independiente) sobre el índice de plasticidad de arcillas de baja compresibilidad (variable dependiente). Existe una relación de causa-efecto entre ambas variables, ya que se espera que el índice de plasticidad varíe en función del contenido de ceniza incorporado al suelo.

Debido a que el porcentaje de ceniza de papel es una variable manipulada intencionalmente por el investigador, se utiliza un diseño experimental. En particular, se aplica un diseño pre experimental con medición antes y después del estímulo, que consiste en la adición de distintos porcentajes del aditivo al suelo arcilloso.

Figura 1.1 Diseño experimental



Fuente: Elaboración propia

Este enfoque metodológico permitirá evaluar cuantitativamente la eficacia de la ceniza de papel como estabilizante geotécnico en suelos arcillosos.

1.8 Unidad de estudio y decisión muestral

Unidad de muestra: Está conformada por las arcillas de baja compresibilidad.

Población: Corresponde a todos los suelos arcillosos.

Muestra: Corresponde a arcillas clasificadas como “CL” (baja compresibilidad), obtenidas de manera intencional en puntos representativos del distrito 12, con base en la observación directa y criterios geotécnicos establecidos en campo.

Selección de la muestra: Se realizará mediante un muestreo no probabilístico intencional, ya que se buscó exclusivamente suelos que cumplan con los criterios de baja compresibilidad, con el fin de garantizar la validez del experimento en función del objetivo planteado.

1.9 Métodos y técnicas empleadas

1.9.1 Métodos

Empíricos: Se aplicó el método empírico mediante la realización de ensayos de laboratorio, donde se manipularon las variables establecidas (porcentaje de ceniza de papel) y se midieron sus efectos sobre el índice de plasticidad de las arcillas.

Teóricos: Se utilizó el método teórico mediante la revisión documental de libros, artículos científicos, tesis y normativas técnicas relacionadas con la estabilización de suelos y el uso de materiales alternativos. A partir de esta revisión se realizó un análisis, síntesis y comparación de la información, que sirvió como sustento teórico para el desarrollo de la investigación.

1.9.2 Técnicas

Investigación bibliográfica: Se recopilaron y analizaron antecedentes relevantes sobre la estabilización de suelos con residuos sólidos, particularmente ceniza de papel, para contextualizar la investigación y contrastar los resultados obtenidos.

Observación directa en campo: Se empleó esta técnica para identificar y seleccionar las zonas de muestreo más representativas, priorizando suelos arcillosos de baja compresibilidad en subrasantes del distrito 12 de Tarija.

Ensayos de laboratorio: Se aplicaron ensayos normalizados (según ASTM D4318) para determinar los límites de Atterberg y calcular el índice de plasticidad antes y después de la incorporación del aditivo.

1.10 Procesamiento de la información

Los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio serán procesados mediante análisis estadístico descriptivo, utilizando medidas como la media, el rango y la desviación estándar para cada porcentaje de ceniza de papel aplicado. Además, se aplicará un análisis comparativo para observar la tendencia de variación del índice de plasticidad entre las distintas mezclas. La información será organizada en tablas y gráficos para facilitar su interpretación y evaluación. Todo el procesamiento se realizará utilizando hojas de cálculo y herramientas estadísticas básicas.

1.11 Alcance

La presente investigación se centra en el análisis del comportamiento del índice de plasticidad a través de ensayos con arcillas de baja compresibilidad del distrito 12 de la ciudad de Tarija, utilizando como aditivo estabilizante la ceniza de papel reciclado.

Para ello, se seleccionaron 30 muestras de suelos clasificados como tipo “CL” (arcillas de baja compresibilidad), las cuales fueron caracterizadas y clasificadas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), utilizando la carta de plasticidad.

El proceso de estabilización consistió en la adición de ceniza obtenida de papel bond usado, proveniente de material de escritorio (impresiones y manuscritos), incinerado en una mufla a una temperatura de 650 °C durante una hora, con el fin de obtener un material fino con potencial puzolánico.

Una vez caracterizados tanto los suelos como la ceniza, se prepararon mezclas de suelo con porcentajes de 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de ceniza, con el objetivo de determinar el porcentaje óptimo que permita reducir el índice de plasticidad de las arcillas analizadas.

Cabe destacar que el alcance de esta investigación se limita exclusivamente a la evaluación del índice de plasticidad como parámetro principal y todo esto será controlado haciendo los respectivos ensayos en laboratorio de mecánica de suelos.

Los resultados obtenidos permitirán identificar el porcentaje óptimo de ceniza que contribuya a disminuir la plasticidad del suelo, proponiendo una alternativa viable para su aplicación en obras de infraestructura vial.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES DE LAS
ARCILLAS, PLASTICIDAD Y
CENIZA DE PAPEL

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE SUELOS ARCILLOSOS, PLASTICIDAD Y ESTABILIZACIÓN CON CENIZA DE PAPEL

2.1 Definición de arcilla

Las arcillas son un tipo de roca sedimentaria descompuesta que se compone de agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Se caracterizan por adquirir plasticidad al mezclarlas con agua, así como sonoridad y dureza al calentarlas por encima de 800°C.

Las arcillas presentan diversas coloraciones, desde el rojo anaranjado hasta el blanco, dependiendo de las impurezas que contienen. Físicamente, se consideran un coloide con partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa (Ladrillera, 2018).

Figura 2.1: Colores de arcillas



Fuente: (Angelone, Silvia, 2020)

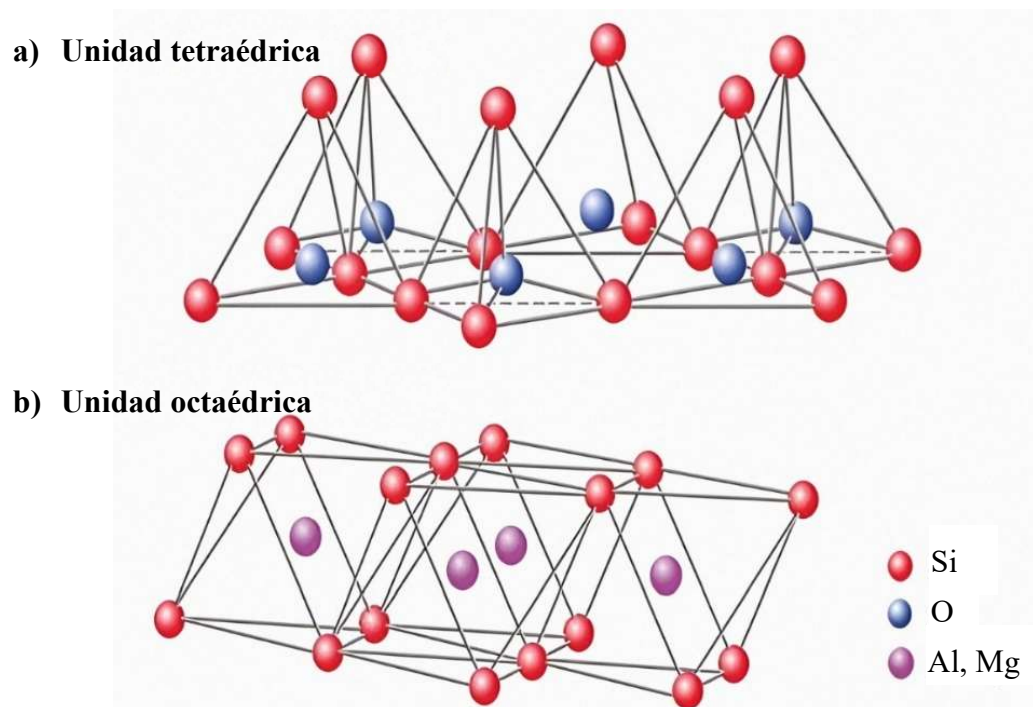
La arcilla es un suelo de granos finos (compuesto por partículas menores a 5 micrones), que posee alta plasticidad dentro de ciertos límites de contenido de humedad y que, secado al aire, adquiere una resistencia importante. (Ing. Laura Karina Soto Salgado, 2015).

2.1.1 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 alumínica (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.

La segunda forma (octaédrica), está conformada por octaedros de magnesio o alúmina, cuyos vértices están constituidos por oxígenos. Al igual que los tetraedros, los octaedros se encuentran eléctricamente descompensados, ya que se tienen dos cargas positivas (si el catión es Mg^{2+}) o bien, tres cargas positivas (si el catión es Al^{3+}) frente a las doce cargas negativas aportadas por sus seis vértices. Los octaedros se disponen apoyados en una de sus caras, la cual representa al plano basal octaédrico. (Estructura de Las Arcillas, 2024).

Figura 2.2: Estructura de la arcilla



Fuente: (Estructura de Las Arcillas, 2024)

2.1.2 Características típicas de la arcilla

Algunas características típicas de las partículas de arcilla son sus propiedades, incluida la cohesión, adherencia, plasticidad, consistencia y actividad. (Hunt, 2007) describe esas propiedades como sigue:

- La cohesión de la arcilla se define como su capacidad para adherirse a sí misma. Resulta de un vínculo desarrollándose en las superficies de contacto de las partículas de arcilla, causadas por electroquímica fuerzas de atracción. Dos elementos son responsables de la cohesión de las partículas de arcilla. es decir, la alta superficie específica de las partículas (área superficial por unidad de peso), y la carga eléctrica en la estructura básica del silicato resultante de las sustituciones iónicas en la estructura cristalina.
- La adherencia de la arcilla es su capacidad para adherirse a otro material al que entra contacto.
- La plasticidad es la capacidad de un material para sufrir un cambio de forma sin sufrir un cambio en el volumen, con su contenido de humedad constante.
- La consistencia se define como la relativa facilidad con la que un suelo puede deformarse. Él implica cohesión y adhesión, así como su capacidad para resistir la deformación y la ruptura. En otras palabras, la consistencia del suelo se refiere a la descripción de la resistencia de un suelo en diversos contenidos de humedad a tensiones mecánicas o manipulaciones. La consistencia de los suelos se describe generalmente en tres niveles de humedad del suelo: mojado, húmedo y seco. Con al disminuir el contenido de humedad, las arcillas pasan del estado fluido (muy blando) a través de un estado plástico (firme), a un estado semisólido, y finalmente a un estado de ladrillo duro. El Los contenidos de humedad en las transiciones entre estos diversos estados están definidos por el límite de Atterberg, que varían con el tipo de arcilla y su pureza.
- La actividad se define como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje en peso más fino de 2 micras.

2.1.3 Diferencia entre limos y arcillas

Para extraer muestras de campo es necesario conocer las diferencias entre limos y arcillas.

Tabla 2.1 Diferencia entre limos y arcillas

Limos (entre 0,002 y 0,06 mm)	Arcillas (< 0,002 mm)
No suelen tener propiedades coloidales.	Suelen tener propiedades coloidales.
A partir de 0,002 mm, y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos.	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos.
Tacto áspero.	Tacto suave.
Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos.	Se secan lentamente y se pegan a los dedos.
Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.	Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.

Fuente: (Juan Libros, 2023).

2.2 Muestreo de suelos finos

Para la identificación de suelos finos del suelo en campo se utiliza muestra de suelo con fracciones que pasen el tamiz de 0,425 mm (N°40), según las especificaciones de la Norma DIN 4022 (Ing. Laura Karina Soto Salgado, 2015).

2.3 Contenido de Humedad de suelos

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, 2022).

La relación que expresa la humedad de un suelo es la siguiente.

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

$w\% = \text{Contenido de agua (\%)}$

$W_w = \text{Peso del agua (g)}$

$W_s = \text{Peso del suelo seco (g)}$

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. (Franch, 2012).

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

2.3.1 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. (Miranda, 2018).

Figura 2.3: Horno de secado



Fuente: Elaboración propia

Este método se basa en el principio de que el agua del suelo se evapora cuando el suelo se calienta en un ambiente de temperatura controlada. El procedimiento consiste en pesar una muestra de suelo, secarla en un horno de laboratorio a una temperatura de 110°C durante 24 horas y luego pesarla nuevamente para determinar la diferencia de peso, que representa la cantidad de agua en el suelo (COTECNO, 2019a).

2.4 Peso específico de la partícula

El peso específico (G_s) es un factor auxiliar que se emplea para determinar otras propiedades del suelo como son: porosidad, relación de vacíos, la velocidad de una partícula en el seno de un fluido viscoso (método del hidrómetro basado en la ley de Stokes).

También se utiliza en: estudios de consolidación del suelo, cálculo del grado de saturación, estudios de gradiente hidráulico crítico, y en otros cálculos («Peso Específico Relativo de los Sólidos», 2017).

El peso específico de los sólidos varía comúnmente entre los valores de 2,5 a 2,8. Los suelos orgánicos tienen valores bajos (Humus: $G_s = 1,37$).

Tabla 2.2 Peso específico de las partículas

PESO ESPECÍFICO RELATIVO PARA ALGUNOS SUELOS		
Tipo de SUELO		Gs
INORGANICO	Gravas	2.65
	Arena gruesa a media	2.65-2.67
	Arena fina (limosa)	2.67-2.70
	Arena arcillosa	2.67
	Limo	2.65-2.70
	Limo arenoso	2.66
	Limo arcillo arenoso	2.67
	Arcilla	2.70-2.80
	Arcilla arenosa	2.70
	Arcilla limosa	2.75
	Loes, polvo de piedra	2.67
	Suelos con micas o minerales de Hierro	2.75-3.00
ORGANICO * Variable, puede ser inferior a 2.0	Limo con trazos de materia orgánica	2.30
	Arcilla	2.60
	Lodos aluviales orgánicos	2.13-2.60
	Turba	1.20-2.15

Fuente: (ASTM D-854-92, 2018)

Para arenas y suelos finos se determina con la siguiente formula.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

γ_s = *Peso específico relativo de un suelo*

W_s = *Peso del suelo seco*

W_{fw} = *Peso del frasco lleno de agua*

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

Luego de calculados los pesos específicos se debe de ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20°C, cuya densidad son:

Tabla 2.3: Factor de corrección “K”

Temperatura	Densidad	K
(°C)	(g/cm³) (Kg/l)	(adimensional)
16	0,99909	1,0009
18	0,99859	1,0004
19	0,99849	1,0002
20	0,9982	1
21	0,99808	0,9998
22	0,99786	0,9996
23	0,99754	0,9993
24	0,99738	0,9991
25	0,99713	0,9989
26	0,99678	0,9986
27	0,99659	0,9983
28	0,99631	0,998
29	0,99594	0,9977
30	0,99573	0,9974

Fuente: (Ing. Laura Karina Soto Salgado, 2015)

2.5 Análisis granulométrico

También conocido como granulometría, el análisis granulométrico es uno de los ensayos más básicos que permiten caracterizar un tipo de suelo en específico, lo que lo hace uno de los más utilizados, ya que ofrece una muy buena aproximación a las características del suelo, por ejemplo, su capacidad portante, su deformabilidad, o su permeabilidad.

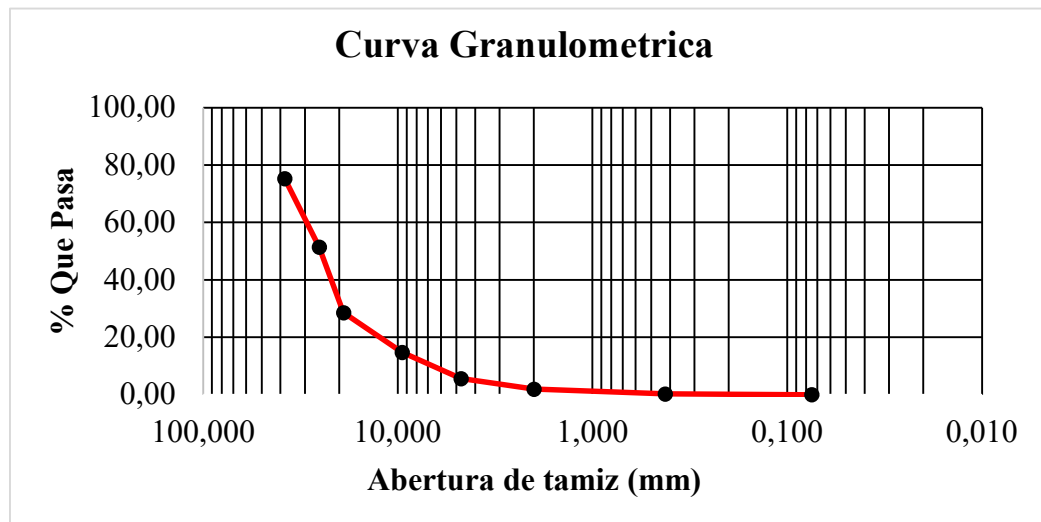
Es un tipo de estudio busca conocer las dimensiones de los granos y partículas que conforman el terreno, a través de la obtención de una muestra representativa del mismo. Existen dos tipos de ensayos comúnmente usados para este propósito, la granulometría

por tamiz para partículas de entre 125 mm hasta 0,075mm, y la granulometría por sedimentación (utilizando un higrómetro) para partículas inferiores a los 0,075 mm (Structuralia, 2022).

2.5.1 Granulometría por tamizado

La forma más fácil de representar los diferentes tamaños de un suelo es el método gráfico, el cual consiste en un dibujo en porcentajes de los tamaños en las ordenadas mismos que están representados en escala tradicional y de tamaños de las partículas en las abscisas las cuales se representan en escala logarítmica (Pilatasig Murillo, 2021).

Figura 2.4: Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

2.5.1.1 Lavado por el tamiz 200

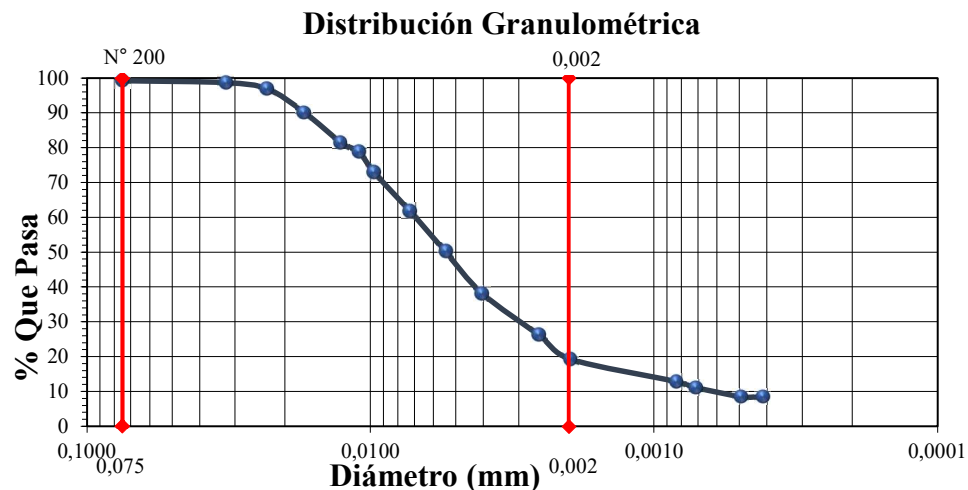
Es un procedimiento de prueba utilizado en ingeniería geotécnica para determinar la cantidad de material más fino que el tamaño del tamiz No. 200 (75 μ m) mediante lavado. Este método implica lavar una muestra de agregado seco en un recipiente mediante agitación con agua, ya sea usando agua del grifo o agua que contenga un agente humectante disuelto si es necesario. El material suspendido y disuelto en el agua de lavado se decanta y se pasa a través del tamiz No. 200 hasta que el agua que pasa por el tamiz se vuelve clara. La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como un

porcentaje de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje de material más fino que el tamaño del tamiz No. 200 por lavado. Este procedimiento es crucial para determinar con precisión el contenido de material fino en agregados finos o gruesos antes del tamizado en seco (análisis del tamaño de partículas (Jimenez Chanca, 2020).

2.5.2 Granulometría por sedimentación

Se lleva a cabo, sobre todo en arenas finas, limos, y arcillas. El estudio se basa sobre la “ley de Stokes”, que relaciona la velocidad de sedimentación de una partícula en el seno de un fluido con el tamaño de dicha partícula. Se ejecuta colocando una muestra en agua destilada dentro de un cilindro de sedimentación y, a la que se le agrega un dispersor para evitar la floculación, para finalmente introducir el hidrómetro dentro del recipiente con la muestra (Structuralia, 2022).

Figura 2.5: Granulometría por sedimentación



Fuente: Elaboración propia

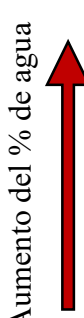
2.6 Plasticidad de los suelos

Existe una correspondencia entre la plasticidad de un suelo y su cohesión. La plasticidad es una propiedad exclusiva de los suelos finos (arcillas y limos), siendo producto de las relaciones electroquímicas que se establecen entre las superficies de los elementos que forman el agregado que compone el suelo (partículas elementales de limo o arcilla). Los

suelos granulares, formados exclusivamente por elementos de granulometría gruesa (arena, gravilla, grava o cantos) no presentan plasticidad (Frankie, 2014).

2.6.1 Límites de Atterberg

Tabla 2.4: Límites de Atterberg

Límites de Atterberg			
Estado		Aspecto y comportamiento	
 Aumento del % de agua	Líquido	Líquido viscoso	Límite líquido
	Plástico	Se deforma sin agrietarse	Límite plástico
	Semisólido	Se deforma, pero se agrieta	Límite de contracción
	Sólido	Se resquebraja al deformarse	Límite de retracción

Fuente: (COTECNO, 2019b)

Los límites de Atterberg son parámetros fundamentales para predecir el comportamiento ingenieril de suelos de grano fino. Estos límites fueron propuestos por el científico sueco Albert Mauritz Atterberg. Son un conjunto de valores de contenido de humedad que definen los diferentes estados de consistencia de un suelo de grano fino, como sólido, semisólido, plástico y semilíquido. Estos límites incluyen el límite de retracción, límite plástico y límite líquido.

Se utilizan para clasificar los suelos y son fundamentales en la ingeniería geotécnica para predecir el comportamiento de los suelos, especialmente en las primeras etapas del diseño estructural. Los límites de Atterberg permiten entender cómo cambia la consistencia del suelo con la variación de la humedad, lo que es crucial para determinar propiedades como la plasticidad y la contracción del suelo.

Estos límites se determinan mediante ensayos de laboratorio específicos y proporcionan información útil para la clasificación de los suelos (COTECNO, 2019b).

2.6.1.1 Límite líquido (LL)

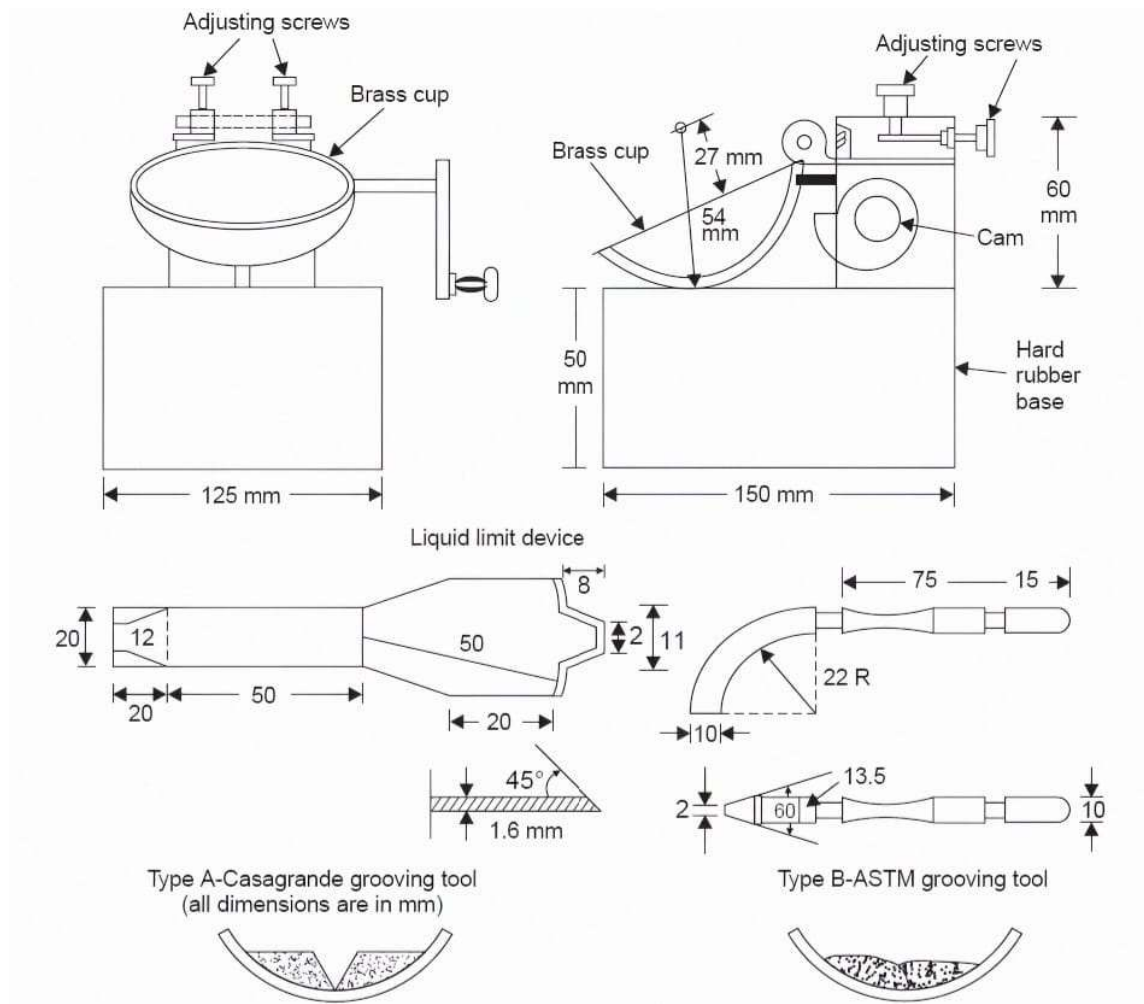
Se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia de una condición plástica a una condición semilíquida. De acuerdo a esto los suelos plásticos en el límite líquido tienen una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, la cual según Atterberg es de 25 g/cm² y la cohesión es prácticamente nula (FAO, 2024).

2.6.1.1.1 Límite líquido por Copa de Casagrande

Para determinar el límite líquido Terzaghi le sugirió a Casagrande en 1927, que diseñará un dispositivo mecánico que pudiera eliminar en lo posible los errores del operador en la determinación del mismo.

Este dispositivo consiste en una copa de latón y una base de goma dura. La copa es esférica, con radio interior de 54 mm, espesor 2 mm y peso 200 ± 20 gr incluyendo el tacón. La copa de latón se puede soltar sobre la base por una leva operada por una manivela (Osorio, Santiago, 2010).

Figura 2.6: Copa de Casagrande para determinar el límite líquido



Fuente: (CIVILSTAGRAM, 2016)

El límite líquido se determina mezclando aproximadamente 100 gr de tierra con agua hasta obtener una pasta homogénea, se extiende una porción de la pasta sobre un molde denominado Copa de Casagrande y se nivela a una profundidad máxima de 10 milímetros. Se abre, en el centro de la pasta extendida, un surco con un acanalador, cuyas dimensiones son de 11 mm de ancho en la parte superior, 2 mm de ancho en su parte baja y 8 mm de profundidad este corte se realiza a lo largo del eje simétrico de la copa. El molde se coloca sobre una base y se somete a golpes controlados. El mango se gira a una velocidad de aproximadamente dos revoluciones por segundo y se cuenta el número de golpes necesarios para cerrar la ranura a lo largo del fondo durante una distancia de 12,7 mm (Pilatasig Murillo, 2021).

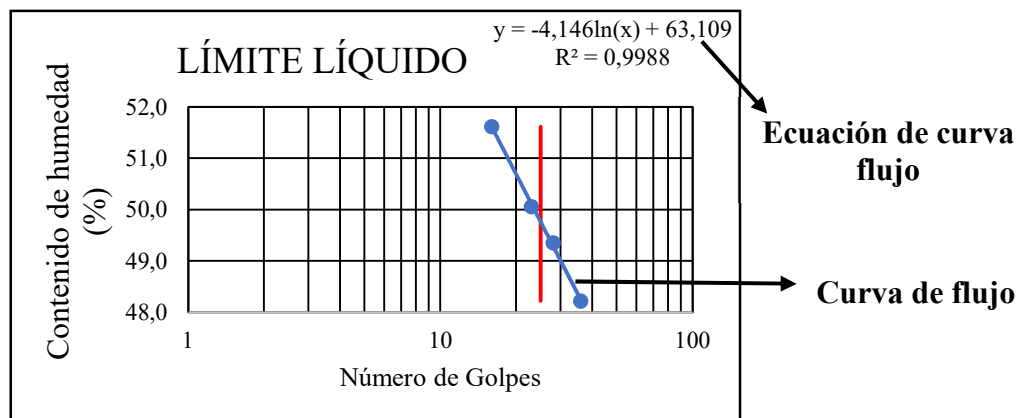
Figura 2.7: Determinación del líquido



Fuente: Elaboración propia

El contenido de humedad del suelo en porcentaje y el correspondiente número de golpes se representan gráficamente en papel cuadriculado donde el eje de la humedad es aritmético y el eje del número de golpes es logarítmico. Dentro del rango de 15 a 35 golpes, los puntos trazados se encuentran casi en línea recta. El contenido de humedad correspondiente a $N=25$, determinado a partir de la curva de flujo, da el límite líquido del suelo (ASTM D-4318, 2006).

Figura 2.8: Curva de flujo para determinación de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

La ecuación de la curva de flujo se puede escribir como:

$$w = I_f * \log N + C \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

w = contenido de agua

I_f = pendiente de la curva de flujo, denominada índice de flujo

N = número de golpes

C = una constante

El método de copa de Casagrande para determinar el límite líquido presenta deficiencias las principales son:

- Los suelos de baja plasticidad tienden a deslizarse y licuarse con los golpes en lugar de fluir plásticamente.
- Sensibilidad a la técnica del operador (Pilatasig Murillo, 2021).

2.6.1.2 Límite plástico (LP)

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

El procedimiento para la prueba de límite plástico está establecido en la norma ASTM, designación ASTM D-4318. Este ensayo se realiza con la fracción de suelo que pasa por el tamiz N°40. En primer lugar, se toman unos 8 g de suelo, y se procede a enrollar las muestras, disminuyendo contenido de agua muy despacio hasta obtener un cordón de aproximadamente 3mm el cual debe empezar a desmoronarse debido a su bajo contenido de agua. Si al llegar a este diámetro no se ha cuarteado el cilindro de modo que quede dividido en trozos de unos 6 mm de longitud como media se dice que el contenido de agua es mayor que el límite plástico, y se vuelve a formar el elipsoide, y a rodar hasta llegar a este tipo de resquebrajamiento («Límites de Atterberg», 2023).

Figura 2.9: Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Por tanto, para el cálculo del límite plástico se emplea la siguiente fórmula:

$$LP = \frac{PH - PS}{PS} * 100 = \frac{PW}{PS} * 100 \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

LP = límite plástico en %.

PH = Peso húmedo de los bastoncillos g. PS = Peso seco de los bastoncillos en g.

PW = Peso del agua contenida en los bastoncillos en g.

2.6.1.3 Índice de plasticidad

Atterberg demostró que la plasticidad de un suelo fino quedaba definida por el límite líquido y el límite plástico. El parámetro que define a la plasticidad es el índice de plasticidad, el cual se lo obtiene mediante la resta aritmética entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

IP = índice de plasticidad en %

LP = límite plástico en %.

LL = límite líquido en %

El índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Así a las arenas limpias se les atribuye un índice de plasticidad nulo, aunque en realidad su valor no se puede determinar con exactitud.

Acorde al valor del índice de plasticidad Atterberg distinguió los siguientes materiales:

- Suelos desmenuzables ($IP < 1$)
- Suelos débilmente plásticos ($1 < IP < 7$)
- Suelos medianamente plásticos ($7 < IP < 15$)
- Suelos altamente plásticos ($IP > 15$) (Pilatasig Murillo, 2021).

Según la clasificación (AASHTO M 145, s. f.) y criterios comúnmente adoptados en normativas viales, para un comportamiento aceptable en climas húmedos el índice de plasticidad (IP) de la subrasante debería ser ≤ 12 , mientras que valores entre 12 y 20 se consideran aceptables únicamente en climas secos y con medidas de control de humedad. Valores superiores a 20 se asocian con alto riesgo de deformaciones y pérdida de soporte bajo condiciones de saturación.

2.7 Clasificación de los suelos

Los sistemas de clasificación de suelos dividen a estos en grupos y subgrupos en base a propiedades ingenieriles comunes tales como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. Los dos sistemas principales de clasificación actualmente en uso son (1) el Sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y (2) el Unified Soil Classification System (también ASTM). El sistema de clasificación AASHTO se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones (Ingeniería Civil, 2010).

Sin embargo, para los trabajos de campo los suelos se clasifican en cinco grupos que son los que frecuentemente se emplean para describir el material, estos son rocas, gravas, arenas, limos y arcillas.

2.7.1 Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (S.U.C.S.)

El SUCS, también conocido como el Unified Soil Classification System (USCS), es ampliamente utilizado en ingeniería geotécnica para clasificar los suelos. Esta clasificación organiza los suelos en cinco tipos principales:

- Gravas (G)
- Arenas (S)
- Arcillas (C)
- Limos (M)
- Orgánicos (O)

Los suelos deben ser clasificados inicialmente mediante un proceso de tamizado en el análisis granulométrico, donde serán clasificados como:

- Suelo Grueso: Retenido en el tamiz #200, incluye gravas y arenas.
- Suelo Fino: Pasa a través del tamiz #200, compuesto por arcillas, limos y materia orgánica.

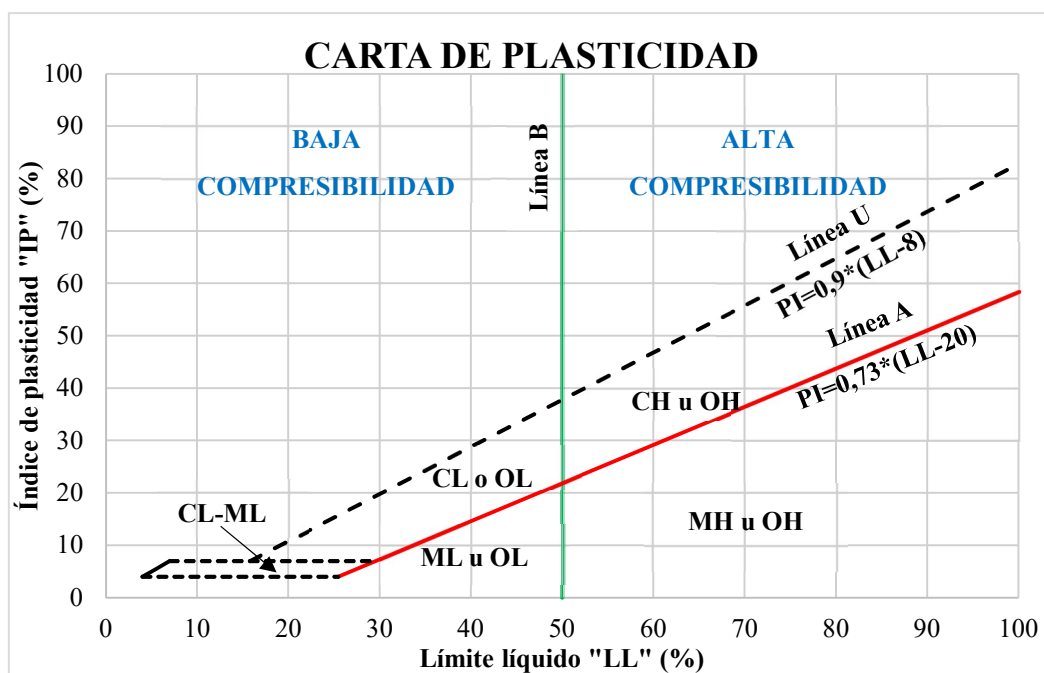
Aquí, se debe tener en consideración el porcentaje retenido por todos los tamices superiores al #200. Si este porcentaje es mayor al 50%, el suelo puede ser clasificado como suelo grueso y de lo contrario será clasificado como un suelo fino.

Para clasificar los suelos finos utilizando el S.U.C.S., observamos el porcentaje que pasa a través del tamiz #200. Si este porcentaje supera el 50%, se considera un suelo fino. Luego, se emplean los límites de consistencia del suelo (límite plástico y límite líquido) para determinar el Índice de Plasticidad (IP) y trabajar con la Carta de Plasticidad (¿Qué es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)?, 2023).

2.7.1.1 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 2.10: Carta de Plasticidad



Fuente: Elaboración propia

En la carta de plasticidad el límite líquido está en el eje de las abscisas y el índice de plasticidad en el eje de las ordenadas.

Existe una recta vertical cuando el límite líquido es igual a 50% (Línea B), esta recta permite diferenciar los suelos de baja compresibilidad (L) y alta compresibilidad (H).

Los suelos finos se diferencian entre limos (M) y arcillas (C), según la combinación que tenga el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP), respecto a su posicionamiento con la Línea A:

$$IP = 0,73 * (LL - 20) \quad \text{Ec. (6)}$$

Si el suelo se encuentra sobre la Línea A es considerado arcilla (C) y si está por debajo es considerado limo (M).

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

- CL: Arcillas de baja compresibilidad.
- ML: Limos de baja compresibilidad.

- CH: Arcillas de alta compresibilidad.
- MH: Limos de alta compresibilidad.

También existe un rango por encima de la Línea A con un índice de plasticidad entre (4 y 7) %, aquí el suelo es considerado como arcilloso o limoso de baja compresibilidad.

Es importante destacar que también en la carta de plasticidad se puede observar una Línea U por encima de la Línea A.

$$IP = 0,9 * (LL - 8) \quad \text{Ec. (7)}$$

La Línea U es una frontera o límite superior del índice de plasticidad en conjunto al límite líquido, debido a que no se encuentran suelos con esta combinación, por lo que se consideran “no factible práctico”.

Finalmente, hay que tomar en consideración que la carta de plasticidad es utilizada para clasificar el suelo fino, sin embargo, forma parte del proceso de clasificación de suelo que se lleva a cabo a través de la normativa ASTM D2487 (Gavidia, 2023).

2.8 Compresibilidad

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

Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles. Si se comprime una masa húmeda de estos materiales no se produce ningún cambio significativo en su volumen.

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

Los suelos de grano fino que contienen por lo menos 50% de limo + arcilla, pueden clasificarse con arreglo a tres clases de compresibilidad sobre la base de su límite líquido. Estas clases son las siguientes:

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

En general, la compresibilidad es aproximadamente proporcional al índice de plasticidad. Mientras mayor es el IP, mayor es la compresibilidad del suelo (FAO, 2023).

2.9 Estabilización de suelos

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos («¿Qué es la estabilización de Suelos?», 2015).

La estabilización de suelos para pavimentos o cualquier proyecto es una práctica muy beneficiosa tanto para el medio ambiente como para la economía, y algunos factores que determinan su importancia son:

- Reduce el riesgo de erosión, deslizamientos, hundimientos o asentamientos del suelo, que pueden provocar daños en las infraestructuras y en las personas.
- Aumenta la capacidad de carga y la resistencia del suelo, lo cual permite construir estructuras más seguras y duraderas.
- Disminuye la necesidad de transportar y utilizar materiales de relleno o de sustitución del suelo. Esto supone un ahorro de costos y de recursos naturales.
- Mejora las condiciones de drenaje y de permeabilidad del suelo con el propósito de evitar problemas de humedad, filtraciones o inundaciones.
- Favorece el desarrollo de la vegetación y la biodiversidad (¿Qué es la estabilización de suelo y cómo se hace?, 2023).

Entre los métodos de estabilización más comunes son la estabilización física, mecánica, y la estabilización química.

2.9.1 Estabilización física

Este tipo de estabilización se utiliza para mejorar las características de un suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como son:

Mezclas de Suelos: Necesitándose siempre de la compactación como complemento. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del para que las partículas se mantengan unidas.

Vibro flotación (Mecánica de Suelos): La vibro flotación es de aplicación en suelos de naturaleza granular, en los cuales se compensa la pérdida de volumen mediante la aportación de material externo, que en muchas ocasiones puede ser el mismo que constituye el terreno que tiene que ser mejorado. Además de aumentar la capacidad portante del terreno aumenta la resistencia del mismo a la licuefacción (Quispe, 2020).

2.9.2 Estabilización mecaniza

Consiste en mezclar diversos materiales con propiedades complementarias, de manera que se obtenga un nuevo material de mayor calidad que cumpla las exigencias deseadas. Es decir, tenemos un suelo con unas determinadas características, y queremos saber con qué otros suelos y en que proporciones debemos mezclarlos para conseguir un suelo final de unas determinadas características.

En la gran mayoría de los casos las propiedades que vamos a mejorar con esta mezcla son la plasticidad o la granulometría, y en algunos casos podemos mejorar notablemente ambas propiedades.(Aldana, 2021).

2.9.3 Estabilización química

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual, mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia. La estabilización de suelos produce las siguientes ventajas:

- Mejora materiales marginales
- Mejora la resistencia
- Mejora la durabilidad
- Controla el cambio de volumen del suelo

- Mejora la trabajabilidad del suelo
- Reduce los requerimientos de espesor de los pavimentos
- Provee un suelo impermeable - reduce el polvo (Guadamur, 2018).

La estabilización química de suelos arcillosos se realiza mediante la adición de aditivos como cal, cemento y puzolanas, que mejoran las propiedades mecánicas del suelo al reducir su plasticidad, aumentar la resistencia y disminuir la capacidad de expansión, logrando una mejor compactación y estabilidad para usos en pavimentos y cimentaciones.

2.9.3.1 Estabilización de suelos con cal

La estabilización del suelo con cal, cambia considerablemente las características del mismo, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua.

La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán. En general, los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz 200 -75µm- y un Índice de Plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para la estabilización. Los suelos que contienen cantidades significativas de material orgánico (mayor que 1 por ciento) o sulfatos (mayor que el 0.3 por ciento) pueden requerir cal adicional y/o procedimientos de construcción especiales.

Los porcentajes en peso seco que se suelen emplear son reducidos: entre un 2 y un 5% si se trata de cal viva, y entre un 4 y un 7% en el caso de cal apagada.

Entre los principales beneficios que podemos obtener al mezclar un suelo con cal están: un aumento de la resistencia a compresión, una reducción/aumento de la plasticidad (según las necesidades), y un aumento de la trabajabilidad del material.

La estabilización con cal suele llevarse a cabo en suelos arcillosos (elevado contenido en finos y plasticidad media-alta) y en suelos de elevada humedad natural (Aldana 2021).

2.9.3.2 Mezclas de Cal-Puzolanas para suelos con cantidades bajas de arcilla

La cal por sí misma puede reaccionar con suelos que contienen tan poca arcilla como 7% e Índices de Plasticidad tan bajos como 10. Si el suelo no es suficientemente reactivo, la cal puede ser combinada con una fuente adicional de sílice y alúmina. Tales puzolanas incluyen la ceniza volante y la escoria de alto horno. El sílice y alúmina adicional de las puzolanas reaccionan con la cal para formar el fuerte matriz cementante que caracteriza a una capa estabilizada con cal. Las mezclas correctamente proporcionadas de cal y puzolanas pueden modificar o estabilizar casi cualquier suelo, pero comúnmente se usan para suelos con plasticidad de baja a media. La ceniza volante es la puzolana más comúnmente usada. Esta es el residuo fino que es resultado de la combustión de carbón pulverizado en calderas de centrales eléctricas, que es transportado de la cámara de combustión a la chimenea de los gases (Manual de estabilización de suelo tratado con cal estabilización y modificación con cal, 2004).

Tabla 2.5: Requisitos químicos para puzolanas

Químicos	Clase		
	F	C	N
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (mín %)	50	50	70
CaO (%)	<18%	>18%	Solo reportar
SO₃ (máx %)	5	5	4
Contenido de humedad (máx %)	3	3	3
Pérdida por ignición (máx %)	6	6	10

Fuente: (ASTM C618-19, 2020)

La norma (ASTM C618-19, 2020) también establece que para la puzolana de clase F, C, o N tiene que cumplir con una finura de un máximo de 34% de material retenido luego de ser tamizado en húmedo en un tamiz No.

Sus usos principales de estas clases de puzolanas son:

Clase N: Para concreto, estabilización de suelos arcillosos, mejora de durabilidad. Requiere cal o cemento adicional.

Clase F: Para concreto y estabilización de suelos con cal, mejora de resistencia y durabilidad.

Clase C: Uso directo como estabilizante (puede actuar sin cal), útil en caminos, terraplenes, suelos expansivos. Aporta resistencia más rápido (ASTM C618-19, 2020).

2.9.3.3 Estabilización de suelos con ceniza de papel

2.9.3.3.1 Producción de papel

El papel, material tan utilizado en nuestro día a día, consiste en un entramado de fibras vegetales con un elevado contenido de celulosa que han sido tratadas mediante diferentes procesos basados en el uso del agua, dispuestas sobre un tamiz y finalmente secadas. Un tercio de toda la madera procesada en el mundo tiene como finalidad la producción de papel y de pulpa.

La fabricación de papel consume una gran cantidad de recursos:

- Agua y Energía
- Materia Prima
- Productos Químicos

El agua es un elemento imprescindible en diferentes momentos del proceso de producción:

“Aproximadamente se necesitan entre 2 – 18 m³ de agua (depende del sistema de gestión de los efluentes y de si se recupera el agua) y entre 2 y 2,5 toneladas de madera para producir una tonelada de papel” (Tratamiento de aguas residuales en la industria papelera, 2015).

Figura 2.11: Elaboración del papel



Fuente: (Flechas, 2017)

En 2022, se produjeron un total de 419,1 millones de toneladas métricas de papel y cartón a nivel mundial (Papel y cartón, 2024). El consumo anual promedio de papel es de 48 kg por persona, a nivel mundial. Esta demanda de papel aumenta cada año debido a las políticas de expansión de la educación y al desarrollo económico general del país (Cruz, 2016).

El papel es un material 100% reciclable. El residuo de papel es un material que puede volver a utilizarse para la fabricación de papel nuevo. Pero el número de veces que se puede reciclar tiene un límite ya que se van perdiendo parte de las fibras que constituyen la pasta, por lo que se añade una pequeña proporción de fibras vírgenes (MPTERD, 2022).

La eliminación de residuos de papel en vertederos tiene un impacto significativo en la contaminación del suelo y la degradación de la tierra. Los residuos de papel en los vertederos pueden descomponerse y liberar metano tóxico y tintas de impresión en el suelo y fuentes de agua, causando daño ambiental. Además, la fabricación de papel contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que agravaría el cambio climático (Vertederos, un serio problema para el medio ambiente, 2016).

Figura 2.12: Papel usado



Fuente:(RETEMA, 2018)

Para disminuir el impacto ambiental de la fabricación de papel, el reciclaje de papel ha ido en aumento y algunas empresas utilizan únicamente papel reciclado como fuente de materia prima. Durante la fabricación de papel, se producen lodos residuales que han demostrado ser una valiosa fuente de energía si se utilizan en plantas de conversión de residuos en energía. La ceniza resultante, que se denomina ceniza de lodo de papel de desecho o ceniza de papel de desecho, ha ido a parar a los vertederos.

2.9.3.3.2 Utilización de la ceniza de papel

En los últimos años, los investigadores han realizado muchos estudios para encontrar una solución a los problemas ambientales mediante la utilización de cenizas de papel usado en el campo de la ingeniería civil, como su uso en morteros y hormigones, material de cementación suplementario, y ladrillos, además de usarlo como ligante para estabilizar suelos arcillosos (Baloochi, 2020).

El papel se puede reciclar varias veces hasta que las fibras de celulosa son demasiado cortas. Las fibras de celulosa gastadas, los lodos y demás residuos de papel se queman para producir energía. Las cenizas resultantes de este proceso se envían a vertedero. Sin embargo, las investigaciones realizadas por Acciona y varias instituciones han demostrado que las cenizas de papel tienen propiedades similares a las del cemento (Acciona, 2021).

Según (Induambiente, 2025), una planta papelera genera entre 800 y 900 ton/mes de cenizas y lodos, lo que representa costos de disposición de 20 a 60 USD/ton de residuo, esto es 18.000 a 54.000 USD/mes, sólo por concepto de disposición.

Tabla 2.6: Composición química de cenizas volantes de papel usado a 600 °C

Material	Composición Química (%)
CaO	48,86
SiO ₂	12,58
Al ₂ O ₃	12,55
Fe ₂ O ₃	1,01
SO ₃	0,97
MgO	1,82
MnO	0,03
K ₂ O	0,36
TiO ₂	1,25
Cl	2,33
Σ Otros	2,63

Fuente: (Putra, 2022)

Tabla 2.7: Composición química de cenizas volantes de papel usado a 850 °C

Constituyentes Químicos	Composición Química (%)
Óxido de calcio (cal) - CaO	62,39
Dióxido de silicio (sílice) - SiO ₂	23,25
Trióxido de aluminio - Al ₂ O ₃	5,26
Óxido de magnesio - MgO	2,46
Óxido de hierro - Fe ₂ O ₃	0,77
Sulfato - SO ₃	0,58
Óxido de sodio - Na ₂ O	0,42
Óxido de potasio - K ₂ O	0,35
Pérdida por ignición (L.O.I)	4,5

Fuente: (Byiringiro, 2014)

La ceniza de papel y otras cenizas similares de desechos de pulpa y papel han demostrado tener pocas propiedades cementantes. Los principales elementos presentes en su composición química normalmente consisten en calcio, silicio y aluminio, así como algo de hierro y magnesio.

Figura 2.13: Cenizas de papel usado



Fuente: (Euronews, 2021a)

La ceniza de papel tiene efectos negativos y positivos en su uso como aglutinante. El primer efecto negativo es que cuando la ceniza de papel se mezcla con agua, se expande debido a la hidratación de CaO para formar Ca(OH)_2 . El segundo efecto negativo es que la ceniza de papel tiene una alta porosidad que conduce a una mayor relación agua/ligante, lo que penaliza la resistencia a la compresión de los morteros. A pesar de sus efectos negativos, la ceniza de papel tiene un efecto positivo cuando se mezcla con agua, ya que proporciona una solución altamente alcalina. La solución altamente alcalina conduce a la liberación de fases más reactivas como Al_2O_3 y SiO_2 , que pertenecen a la ceniza de papel o de otros materiales cementosos o puzolánicos en el sistema (Baloochi, 2020).

- **Compuestos útiles en estabilización:**

Óxido de calcio (CaO): Es el agente estabilizante más potente; reemplaza cationes (Na^+ , Mg^{2+}), floclula arcillas y participa activamente en reacciones con sílice/alúmina para formar polímeros que reducen la plasticidad (Mohammed, 2023).

Sílice (SiO_2): Es fundamental en la reacción puzolánica, donde se combina con CaO en presencia de agua para formar cementos como C-S-H y C-A-H (J.jenvman, 2022).

Alúmina (Al_2O_3): Complementa la sílice en la reacción puzolánica, formando aluminatos de calcio. Aunque su efecto es menor que el de la sílice, sí aporta rigidez y mejora la estructura del suelo (Manual de cenizas volantes, 2022).

Óxido de magnesio (MgO): También incrementa el pH y puede reaccionar lentamente para formar MSH (gel silicato-hidróxido de magnesio). Su efecto es similar pero más lento que el del CaO (Seco et al., 2021).

- **Compuestos que no aportan o tienen efecto limitado**

Óxidos de hierro (Fe_2O_3) y aluminio (sesquióxidos): Aunque pueden ayudar ligeramente en la floculación del suelo, su impacto es menor comparado con CaO/SiO_2 (Kaya, 2025).

- **Compuestos perjudiciales o neutros**

Álcalis (Na_2O , K_2O): Aunque elevan el pH para favorecer reacciones, un exceso puede dispersar arcillas, incrementar expansión y plasticidad, siendo contraproducente (Hernández García, 2024).

2.9.3.3.3 Ceniza de papel en estabilización de suelos

En estabilización de suelos, al mezclar con cenizas de papel usado, el porcentaje de suelo que pasa el tamizado número 200 y el índice de plasticidad se reducen al aumentar el porcentaje de cenizas de papel usado, en porcentajes de 5%, 10% y 15%. Podría atribuirse a la unión del contenido químico de las cenizas de papel usado a las partículas del suelo. Además, el potencial de hinchamiento se reduce ligeramente al aumentar el porcentaje de cenizas de papel usado. Además, la resistencia a la compresión aumenta con la ceniza de papel usado al 5% y 10% (Putra, 2022).

Figura 2.14: Carretera en España construida con cenizas de papel



Fuente: (Euronews, 2021a)

En suelos expansivos se encontró la reducción en el índice de plasticidad con porcentajes de 8%, 20% y 24%, por lo tanto, una mayor trabajabilidad en comparación con las arcillas sin tratar, indica el intercambio catiónico inmediato, la floculación y la aglomeración como en el caso de estabilización con cal. Donde los resultados muestran que la fábrica de papel se puede utilizar de manera eficiente para reducir el potencial de hinchamiento, así como la presión de expansión de los suelos expansivos no solo eso, sino que el aumento inmediato de CBR corrobora la reacción entre las cenizas de las fábricas de papel y suelo como en el caso de la mezcla suelo-cal (Byiringiro, 2014).

Las cenizas de papel cumplen con los requisitos técnicos del cemento, pero son más respetuosas con el medio ambiente, ya que permiten reducir entre el 65% y 75% de las emisiones de CO₂ asociadas a la construcción. Acciona ya ha construido una carretera en España utilizando cenizas de residuos de papel en la cimentación, como parte de este proyecto.(Euronews, 2021b).

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

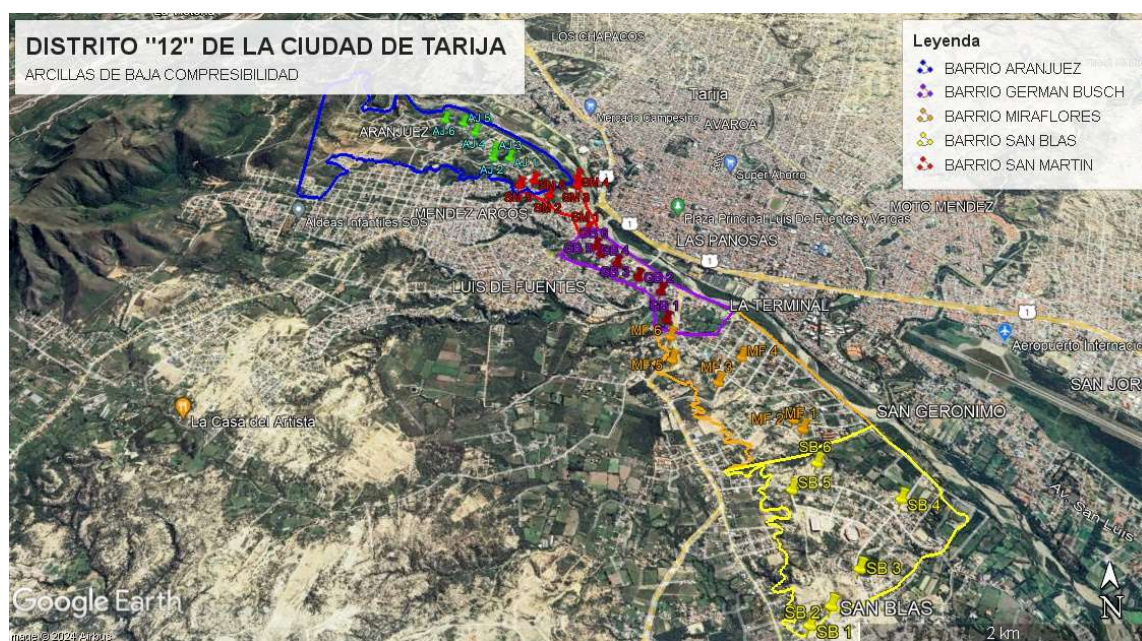
APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio para la extracción de las muestras está ubicada en el distrito 12 de la ciudad de Tarija, que se divide en 5 barrios (San Blas, Miraflores, German Buch, San Martin y Aranjuez).

Se selecciono esta parte de Tarija porque se vio gran cantidad de material en el área.

Figura 3.1: Distrito 12 de la ciudad de Tarija



Fuente: Elaboración propia

La muestra está referida a las arcillas de baja compresibilidad del distrito 12 de la ciudad de Tarija, las que se seleccionó en laboratorio después de su comprobación con una clasificación de suelos. De cada barrio se recolecto 6 puntos de muestra logrando un total de 30 puntos.

A continuación, se muestra las coordenadas geográficas de cada punto.

Tabla 3.1: Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo

UBICACIÓN DE MUESTRAS			
BARRIO	MUESTRA	LATITUD (-) SUR	LONGITUD (-) OESTE
SAN BLAS	SB 1	21,570617	64,727768
	SB 2	21,569360	64,726145
	SB 3	21,566839	64,723739
	SB 4	21,561793	64,719780
	SB 5	21,561261	64,727612
	SB 6	21,559119	64,725441
MIRAFLORES	MF 1	21,556321	64,726030
	MF 2	21,555519	64,726624
	MF 3	21,552353	64,732036
	MF 4	21,549921	64,729931
	MF 5	21,550327	64,735527
	MF 6	21,547962	64,735495
GERMAN BUCH	GB 1	21,546361	64,735723
	GB 2	21,543514	64,736047
	GB 3	21,542040	64,737895
	GB 4	21,540514	64,739674
	GB 5	21,539481	64,741028
	GB 6	21,538543	64,741463
SAN MARTIN	SM 1	21,536626	64,742191
	SM 2	21,532696	64,745647
	SM 3	21,531266	64,743059
	SM 4	21,530302	64,743075
	SM 5	21,531381	64,748387
	SM 6	21,530819	64,747118
ARANJUEZ	AJ 1	21,528021	64,749500
	AJ 2	21,528001	64,751041
	AJ 3	21,527072	64,751009
	AJ 4	21,524571	64,752995
	AJ 5	21,523290	64,754251
	AJ 6	21,522855	64,756043

Fuente: Elaboración propia

3.2 Muestreo de los materiales

3.2.1 Selección de las arcillas de baja compresibilidad

Para este estudio, se seleccionaron muestras de suelos arcillosos del distrito 12 de la ciudad de Tarija, zona que presenta una alta presencia de materiales finos. Se realizó primero un reconocimiento del área para identificar sectores con suelos arcillosos de baja compresibilidad, es decir, con límite líquido mayor a 20 % y menor a 50 %, clasificados como CL según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Las muestras se obtuvieron principalmente de subrasantes, pero en aquellos puntos donde no se encontró arcilla en la subrasante o resultó imposible excavar, se recurrió a la toma de muestras en taludes. Aunque la aplicación práctica de este estudio se enfoca exclusivamente en la mejora de la plasticidad de las subrasantes (ya que estas pueden ser estabilizadas directamente en obra), la inclusión de muestras provenientes de taludes permitió ampliar el muestreo y contar con una mayor variedad de suelos de baja compresibilidad. Esto aseguró que el análisis cubriera de forma más representativa todo el territorio del distrito 12.

Figura 3.2: Extracción de muestras



Fuente: Elaboración propia

Las extracciones se realizaron siguiendo las recomendaciones de las guías de laboratorio. Se excavó a una profundidad aproximada de 30 cm en taludes y 50 cm en subrasantes, descartando la capa superficial para evitar impurezas. Luego, se almacenaron las muestras en bolsas de nailon para conservar la humedad natural y en bolsas plásticas grandes para los ensayos de laboratorio.

3.2.2 Selección del papel y obtención de la ceniza de papel (CP)

El papel utilizado para esta investigación fue obtenido de una recicladora de papel de la ciudad de Tarija llamada “Reciclajes Tarija” ubicada en las coordenadas Lat. -21,516041 y Long. -64,745916 de donde se seleccionó solo papel bond usado en escritorios y manuscritos.

Figura 3.3: Reciclajes Tarija



Fuente: Elaboración propia

El proceso de incineración o quema del papel, se realizó mediante una mufla existente en laboratorio de Ingeniería Química de la universidad autónoma Juan Misael Saracho a una temperatura constante de 650°C por un periodo de una hora.

El proceso consistió, primero en picar el material para reducir su tamaño y así facilitar su incinerado, posteriormente se introdujo el papel en ollitas de barro previamente áridas y pesadas. Se volvió a pesar las ollas con el papel picado y se llevó a la mufla para su

calcinación. Una vez pasado el periodo de incinerado se hizo enfriar la muestra en un desecador y se volvió a pesar para calcular la reducción de peso por calcinación.

Después de pesar las muestras se almacenaron en bolsas herméticas para evitar la absorción de humedad del ambiente.

Se realizo varios quemados hasta lograr la cantidad de muestra necesaria.

Figura 3.4: Obtención de la ceniza de papel



Fuente: Elaboración propia

3.3 Caracterización de los materiales

Para conocer las características de las arcillas de baja compresibilidad y de la ceniza de papel se realizó ensayos de laboratorio los cuales fueron controlados por los encargados.

3.3.1 Caracterización de las arcillas naturales de baja compresibilidad “CL”

Se realizo laboratorio de contenido de humedad, peso específico, granulometría por lavado del tamiz #200, granulometría por sedimentación, límite líquido, límite plástico y clasificación de suelos.

3.3.1.1 Contenido de humedad (ASTM D2216)

Se realizo 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 3.5 Muestra natural pesada y llevada al horno



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Contenido de humedad de “MF 5”

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de Cápsula (g)	12,63	13,4	12,23
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	115,85	116,99	119,31
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	108,9	110,04	111,94
Peso de suelo seco (g)	96,27	96,64	99,71
Peso del agua (g)	6,95	6,95	7,37
Contenido de humedad (%)	7,22	7,19	7,39
Promedio (%)	7,27		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Resumen de contenido de humedad de las muestras

BARRIO	MUESTRA	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
SAN BLAS	SB 1	8,42
	SB 2	8,40
	SB 3	5,02
	SB 4	7,00
	SB 5	6,23
	SB 6	8,42
MIRAFLORES	MF 1	6,96
	MF 2	6,80
	MF 3	7,23
	MF 4	7,42
	MF 5	7,27
	MF 6	7,77
GERMAN BUCH	GB 1	5,72
	GB 2	6,91
	GB 3	8,26
	GB 4	4,73
	GB 5	6,83
	GB 6	6,44
SAN MARTIN	SM 1	7,15
	SM 2	3,91
	SM 3	7,09
	SM 4	5,54
	SM 5	6,67
	SM 6	5,41
ARANJUEZ	AJ 1	7,60
	AJ 2	5,38
	AJ 3	8,34
	AJ 4	5,63
	AJ 5	7,03
	AJ 6	8,09

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Peso específico (ASTM D854 - AASHTO T100)

Primeramente, 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 saco 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 frio 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 al pesar y enrazar al 100% del volumen con la pipeta en cada medición.

Figura 3.6: Calibración del frasco volumétrico



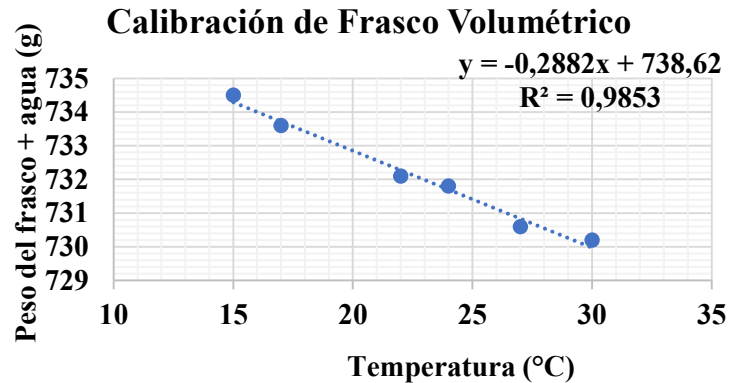
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Calibración del frasco volumétrico de “MF 5”

Peso del frasco limpio (vacío-seco) (g) =		255,7
Peso del frasco + agua: W_{fw} (g)=		731,5
Numero de ensayo	Temp. (°C)	Wfw (g)
1	30	730,2
2	27	730,6
3	24	731,8
4	22	732,1
5	17	733,6
6	15	734,5

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7: Calibración del frasco volumétrico de “MF 5”



Fuente: Elaboración propia

Para el peso específico para las arcillas de baja compresibilidad 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 enrazo 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 3.8: Peso específico de “MF 5”



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5: Peso específico de “MF 5”

PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO

Ensayo	1	2	3	4	5	Prom.
Temperatura ensayada: "T" (°C)	24	22	19	17	16	
Peso del suelo seco: "Ws" (g)	75,2	75,2	75,2	75,2	75,2	
Peso del frasco más agua: "Wfw" (g)	731,70	732,28	733,14	733,72	734,01	
Peso del frasco + agua + suelo: "Wfws" (g)	779,7	780,2	781	781,5	782	
Peso específico: " γ_s " (g/cm³)	2,7646	2,7569	2,7503	2,7427	2,7640	
Factor de corrección "K"	0,9991	0,9996	1,0002	1,0009	1,0009	
Peso específico corregido: " γ_{sc} " (g/cm³)	2,7621	2,7558	2,7509	2,7451	2,7665	2,7561

El peso específico relativo de la muestra es: **2,76 g/cm³**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Resumen de peso específico de las muestras

BARRIO	MUESTRA	PESO ESPECÍFICO " γ_s " (g/cm³)
SAN BLAS	SB 1	2,80
	SB 2	2,80
	SB 3	2,74
	SB 4	2,75
	SB 5	2,75
	SB 6	2,79
MIRAFLORES	MF 1	2,75
	MF 2	2,75
	MF 3	2,75
	MF 4	2,76
	MF 5	2,76
	MF 6	2,77
GERMAN BUCH	GB 1	2,75
	GB 2	2,75
	GB 3	2,79
	GB 4	2,72
	GB 5	2,75
	GB 6	2,75

SAN MARTIN	SM 1	2,76
	SM 2	2,74
	SM 3	2,75
	SM 4	2,72
	SM 5	2,75
	SM 6	2,74
ARANJUEZ	AJ 1	2,77
	AJ 2	2,72
	AJ 3	2,77
	AJ 4	2,74
	AJ 5	2,77
	AJ 6	2,77

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3 Granulometría (ASTM D854 - AASHTO T100)

Al tratarse de suelos finos se realizó un lavado por el tamiz #200, para luego con lo retenido en el tamiz, realizar la granulometría con sus respectivos tamices.

3.3.1.3.1 Lavado por el tamiz #200 para suelos finos

Se realizó la granulometría para suelos finos usando el lavado por el tamiz #200, donde se usó una muestra secada al horno de 1500 g para cada arcilla de baja compresibilidad las que se dejaron 24 horas antes saturando.

Figura 3.9: Lavado por el tamiz #200 de arcillas de baja compresibilidad



Fuente: Elaboración propia

Después de realizado el lavado se hizo secar todo el material retenido en el tamiz #200 en un horno a temperatura constante de 110 °C por 24 horas.

Una vez secado el material se pesó y se realizó el tamizado con los tamices N°4, N°10, N°40 y N°200, los cuales son usados para suelos finos.

Figura 3.10: Tamizado de las arcillas de baja compresibilidad



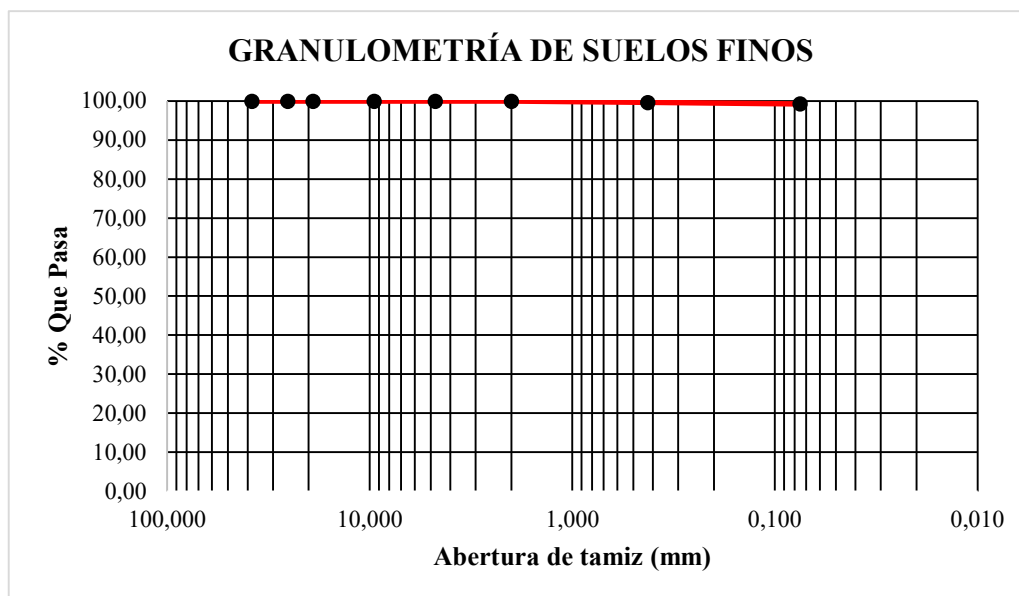
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7: Granulometría de “MF 5”

Peso inicial Seco		1500	g		
Peso fracción agregado fino		10,66	g		
Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
1 1/2	38,100	0	0,00	0,00	100,00
1	25,400	0	0,00	0,00	100,00
3/4	19,050	0	0,00	0,00	100,00
3/8	9,500	0	0,00	0,00	100,00
N°4	4,750	0	0,00	0,00	100,00
N°10	2,000	0,44	0,03	0,03	99,97
N°40	0,425	4,34	0,29	0,32	99,68
N°200	0,075	5,88	0,39	0,71	99,29
Base		1489,34	99,29	100,00	0,00
Total		1500	100		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11: Curva granulométrica de “MF 5”



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: Resumen granulometría de las muestras

BARRIO	MUESTRA	% PASA #200
SAN BLAS	SB 1	98,24
	SB 2	99,74
	SB 3	86,28
	SB 4	99,22
	SB 5	96,26
	SB 6	99,59
MIRAFLORES	MF 1	99,23
	MF 2	99,14
	MF 3	99,13
	MF 4	99,40
	MF 5	99,29
	MF 6	99,50

GERMAN BUCH	GB 1	96,27
	GB 2	99,24
	GB 3	99,64
	GB 4	83,85
	GB 5	96,25
	GB 6	96,24
SAN MARTIN	SM 1	99,39
	SM 2	86,13
	SM 3	99,19
	SM 4	83,75
	SM 5	99,72
	SM 6	86,18
ARANJUEZ	AJ 1	99,39
	AJ 2	83,86
	AJ 3	99,35
	AJ 4	86,12
	AJ 5	99,40
	AJ 6	99,51

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3.2 Granulometría por Sedimentación (ASTM D422)

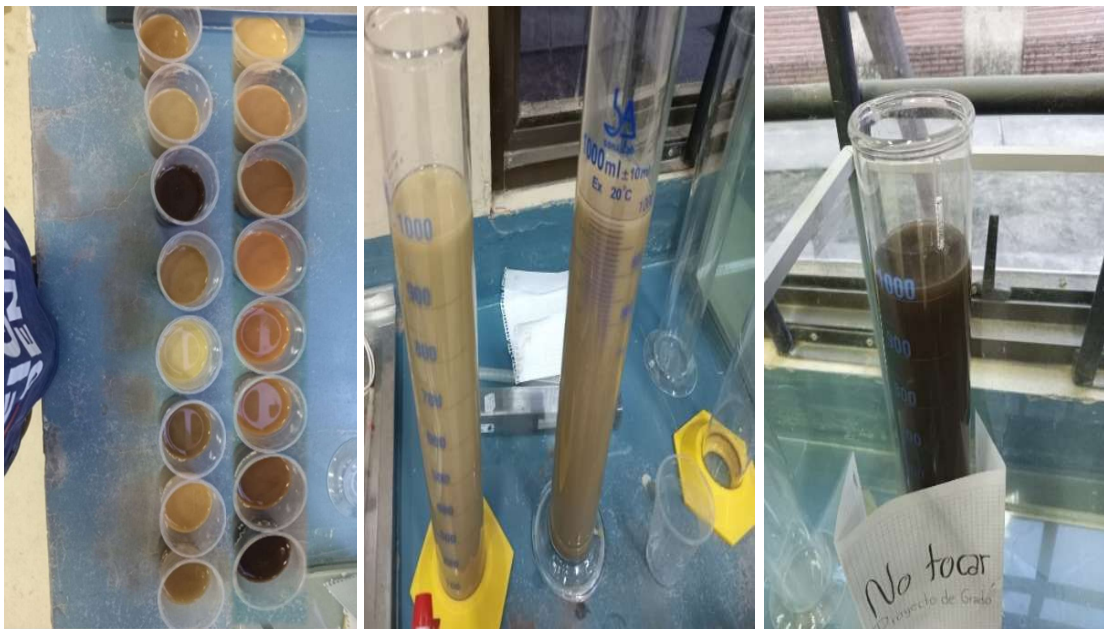
Primero se preparó 125 ml de solución de agua con defloculante (hexametafosfato de sodio) en vasos plásticos, luego se agregó 60 g de arcilla de baja compresibilidad se removió y se dejó reposar por el periodo de 24 horas. Después del reposo se batió la muestra durante 5 minutos y se introdujo a la probeta agregando agua hasta los 100 ml. Seguidamente se tapó la boca de la probeta con la palma de la mano y se agito durante 1 minuto, luego se puso la probeta en el mesón y se introdujo el hidrómetro tomando lecturas para tiempo de 1, 2, 4, 8, 10, 15, 30 minutos luego para 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72 horas hasta

que las lecturas del hidrómetro sean constantes. Para cada tiempo se debe medir la temperatura.

Paralelo al ensayo se hizo un recipiente de control con la solución el cual se encontraba a una temperatura que no varió en más de 1 °C del suelo y se tomó corrección de menisco en el hidrómetro.

Terminado el ensayo se secó la muestra en horno durante 24 horas para obtener el peso seco.

Figura 3.12: Método del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Hidrometría con 152 H para “MF 5”

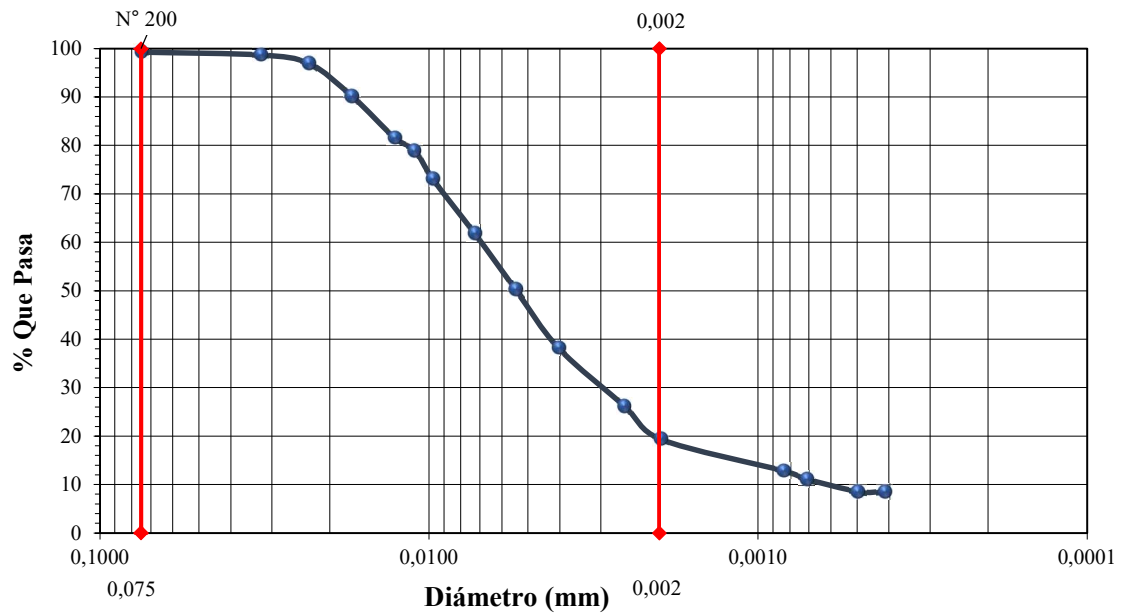
Modelo							
Hidrómetro:	152 H			Temperatura (°C):	24		
Peso suelo seco:	56,67	gr		Registro Hidrómetro (g/cm³):	3		
Peso específico:	2,76	gr/cm³		Ct (g/cm³):	1		
Agente							
Dispersante:				Cm (g/cm³):	1		
	Hexametafosfato de sodio (NaPO3)6			RCd (g/cm³):	5		
"a":	0,978			Cd (g/cm³):	-5,0000		

T (min)	T °C	Lect. Real Rh (g/cm³)	Lect. Corr. Menis. Rr (g/cm³)	Ct (g/cm³)	Const. K Tabla	Lect. Corr. Rc (g/cm³)	Prof. Efec. L (cm)	L/t (cm/min)	Diam. Part. (mm)	% Mas Fino Parc.	% Mas Fino Tot.
									0,075		99,29
1	26	60	61	1,6	0,0124	57,6	6,88	6,880	0,0324	99,40	98,70
2	26	59	60	1,6	0,0124	56,6	7,04	3,520	0,0232	97,68	96,99
4	26	55	56	1,6	0,0124	52,6	7,68	1,920	0,0171	90,78	90,13
8	26	50	51	1,6	0,0124	47,6	8,48	1,060	0,0127	82,15	81,56
11	26	48,5	49,5	1,6	0,0124	46,1	8,78	0,798	0,0110	79,56	78,99
15	26	45	46	1,6	0,0124	42,6	9,28	0,619	0,0097	73,52	73,00
30	26	38,5	39,5	1,6	0,0124	36,1	10,38	0,346	0,0073	62,30	61,86
60	25	32	33	1,3	0,0125	29,3	11,47	0,191	0,0054	50,57	50,21
120	25	25	26	1,3	0,0125	22,3	12,64	0,105	0,0040	38,48	38,21
330	25	18	19	1,3	0,0125	15,3	13,77	0,042	0,0025	26,40	26,22
575	25	14	15	1,3	0,0125	11,3	14,44	0,025	0,0020	19,50	19,36
3162	28	9	10	2,5	0,0121	7,5	15,10	0,005	0,0008	12,94	12,85
4376	28	8	9	2,5	0,0121	6,5	15,25	0,003	0,0007	11,22	11,14
9146	28	6,5	7,5	2,5	0,0121	5	15,50	0,002	0,0005	8,63	8,57
13136	28	6,5	7,5	2,5	0,0121	5	15,50	0,001	0,0004	8,63	8,57

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13: Hidrometría “MF 5”

Distribución Granulométrica



Fuente: Elaboración propia

Porcentaje más fino que: 0,002 mm = 19,46 % de arcilla

Porcentaje de limo= % (0,075 mm) - %(0,002mm) = 99,29 - 19,46 = 79,83 % de limo

Tabla 3.10: Resumen de hidrometría de las muestras

BARRIO	MUESTRA	% DE ARCILLA	% DE LIMO
SAN BLAS	SB 1	26,47	71,83
	SB 2	35,37	64,37
	SB 3	23,26	63,02
	SB 4	16,78	82,44
	SB 5	11,31	84,95
	SB 6	32,50	67,09
MIRAFLORES	MF 1	17,96	81,27
	MF 2	13,42	85,72
	MF 3	14,17	84,96
	MF 4	22,85	76,55
	MF 5	19,46	79,83
	MF 6	25,10	74,40

GERMAN BUCH	GB 1	12,21	84,06
	GB 2	22,49	76,75
	GB 3	36,84	62,80
	GB 4	23,35	60,50
	GB 5	12,92	83,33
	GB 6	12,13	84,12
SAN MARTIN	SM 1	24,26	75,13
	SM 2	14,56	71,57
	SM 3	15,86	83,33
	SM 4	18,97	64,78
	SM 5	9,56	90,16
	SM 6	17,14	69,04
ARANJUEZ	AJ 1	23,38	76,01
	AJ 2	24,53	59,33
	AJ 3	26,29	73,06
	AJ 4	13,12	73,00
	AJ 5	33,81	65,59
	AJ 6	31,14	68,37

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4 Límites de consistencia

Comprende el límite líquido, límite plástico y límite de contracción. Para la clasificación de las arcillas de baja compresibilidad solo se usa el límite líquido y límite plástico.

3.3.1.4.1 Límite líquido (ASTM D4318 - AASHTO T89)

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

Se usó 100 g de muestra que pasa el tamiz N°40 secada al horno previamente por 24 horas. Se agregó agua y se mezcló con la espátula hasta lograr una pasta homogénea.

Se pesó 4 capsulas luego se puso con la espátula un poco de muestra en la copa de Casagrande enrazando horizontalmente y presionando un poco para eliminar el aire de la muestra. Después con el ranurador hacer una ranura a lo largo de la copa y mover la manija de golpes con un ritmo de 2 golpes por segundo hasta que en la ranura se produzca una unión de 1.27 cm. Anotar los golpes y hacer dos cortes a la muestra perpendicular a

la ranura extrayendo toda la unión y depositando en una capsula. luego pesar en una balanza con precisión de 0.01 g y llevar al horno a 110 °C por 24 horas y se vuelve a pesar para así calcular el peso seco y el contenido de humedad.

Realizar el procedimiento para golpes entre 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35.

Figura 3.14: Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4.2 Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 - AASHTO T90)

Terminado el ensayo del límite líquido se recogió la muestra sobrante y se amasó hasta que pueda ser manipulado plásticamente. Luego se hace una pequeña pelotita con el material y se la lleva sobre la base de vidrio para rodarla con la palma de la mano y convertirla en rollitos de 3 mm de diámetro aproximadamente, si el rollito a este diámetro no presenta rajaduras volver a hacer el ensayo hasta que el rollito presente rajaduras a los 3 mm de diámetro ya que esa será la humedad de límite plástico. Una vez logrado la rajadura del rollito a los 3 mm de diámetro cortar la muestra con la espátula en trocitos en los que se encuentren las rajaduras y poner en la capsula a pesar. Luego se mete al horno por 24 horas a una temperatura de 110 °C y se vuelve a pesar para así calcular el peso seco y el contenido de humedad.

Se debe hacer por lo menos 2 ensayos para luego hacer un promedio y tener un valor considerable.

Figura 3.15: Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

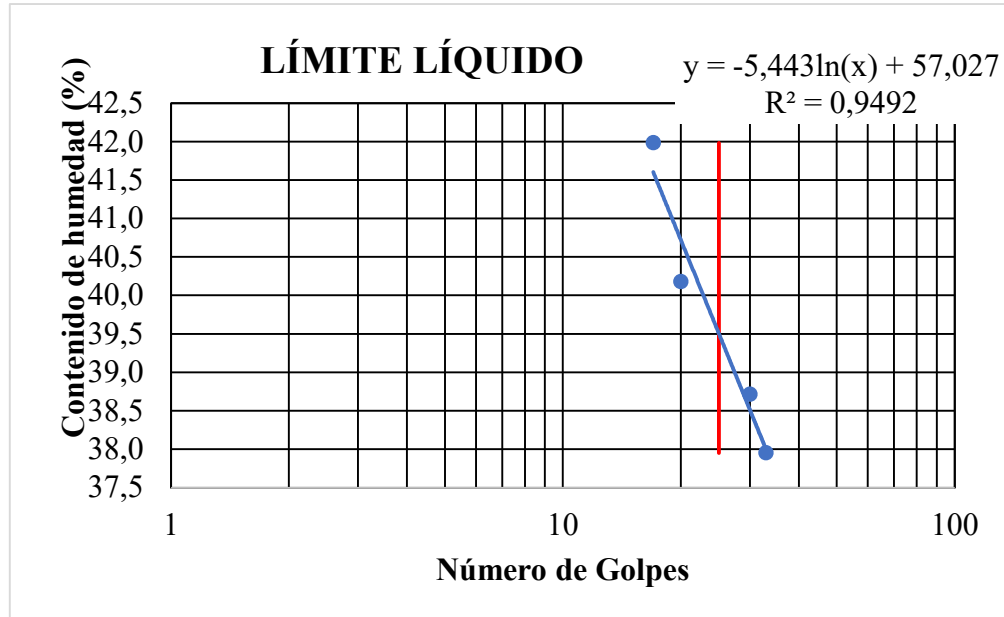
Una vez realizado el límite líquido y el límite plástico se calculó el índice de plasticidad el cual es la resta del límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$).

Tabla 3.11 Límite líquido y el límite plástico de “MF 5”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (gr)	12,54	12,98	13,93	14,92	13,95	13,4	12,72
Peso de Cápsula+ M. Húmeda (gr)	26,27	27,11	26,47	27,46	15,19	14,55	13,87
Peso de Cápsula+ M. Seca (gr)	22,21	23,06	22,97	24,01	14,96	14,34	13,66
Peso de Agua (gr)	4,06	4,05	3,5	3,45	0,23	0,21	0,21
Peso de Muestra Seca (gr)	9,67	10,08	9,04	9,09	1,01	0,94	0,94
Contenido de Húmeda (%)	42,0	40,2	38,7	38,0	22,8	22,3	22,3
N° de Golpes	17	20	30	33			
Promedio de C de humedad (%)					22,5		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16: Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido

$$LL = -5,443 * \ln(25) + 57,027 = 39,51 \% \approx 40 \%$$

Límite plástico

$$LP = (22,8 + 22,3 + 22,3) / 3 = 22,5 \% \approx 22 \%$$

Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP = 40 - 22 = 18 \%$$

Tabla 3.12 Resumen de límites de consistencia de las muestras

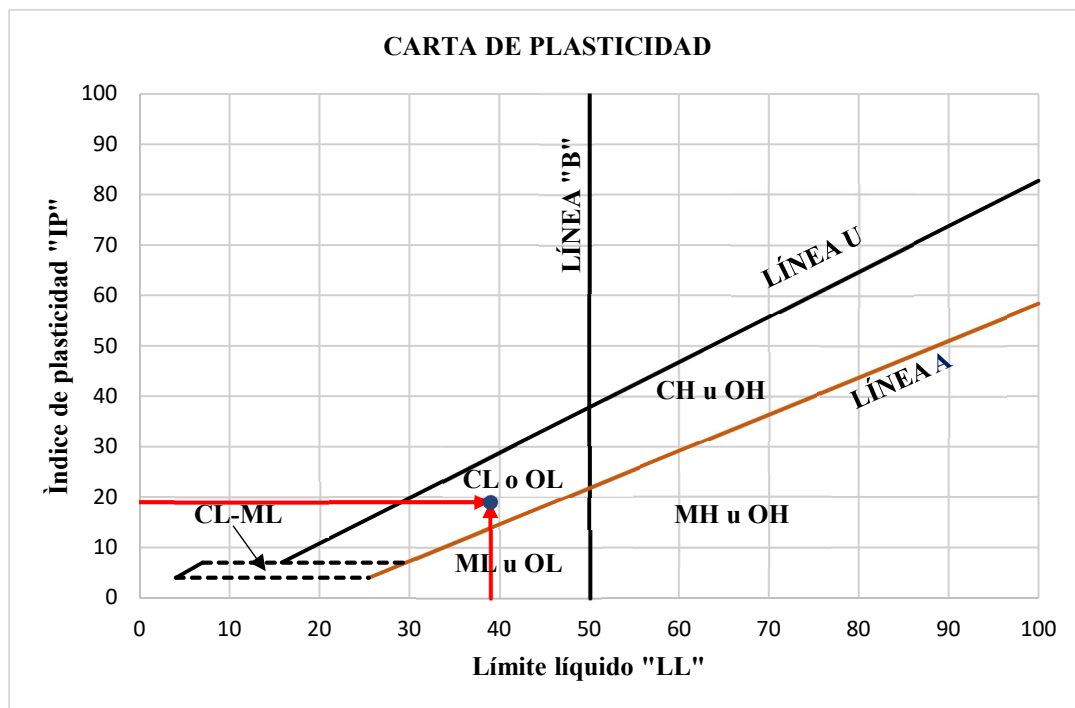
BARRIO	MUESTRA	LL	LP	IP
SAN BLAS	SB 1	50	28	22
	SB 2	50	27	23
	SB 3	32	22	10
	SB 4	39	20	19
	SB 5	35	23	12
	SB 6	47	25	22
MIRAFLORES	MF 1	39	24	15
	MF 2	37	23	14
	MF 3	37	21	16
	MF 4	42	23	19
	MF 5	40	22	18
	MF 6	46	26	20
GERMAN BUCH	GB 1	35	23	12
	GB 2	39	24	15
	GB 3	48	26	22
	GB 4	27	19	8
	GB 5	35	20	15
	GB 6	35	21	14
SAN MARTIN	SM 1	42	25	17
	SM 2	29	21	8
	SM 3	38	23	15
	SM 4	25	15	10
	SM 5	35	21	14
	SM 6	30	20	10
ARANJUEZ	AJ 1	44	24	20
	AJ 2	27	18	9
	AJ 3	43	22	21
	AJ 4	29	17	12
	AJ 5	44	24	20
	AJ 6	46	25	21

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5 Clasificación de suelos finos

Se realizó el sistema de clasificación S.U.C.S. para suelos finos utilizando la carta de plasticidad.

Figura 3.17 Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5”



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo según SUCS: CL -> Arcilla inorgánica de baja plasticidad

Tabla 3.13 Resumen de clasificación de las muestras

CLASIFICACIÓN DE SUELOS FINOS		
BARRIO	MUESTRA	CLASIFICACIÓN SUCS
SAN BLAS	SB 1	CL
	SB 2	CL
	SB 3	CL
	SB 4	CL
	SB 5	CL
	SB 6	CL

MIRAFLORES	MF 1	CL
	MF 2	CL
	MF 3	CL
	MF 4	CL
	MF 5	CL
	MF 6	CL
GERMAN BUCH	GB 1	CL
	GB 2	CL
	GB 3	CL
	GB 4	CL
	GB 5	CL
	GB 6	CL
SAN MARTIN	SM 1	CL
	SM 2	CL
	SM 3	CL
	SM 4	CL
	SM 5	CL
	SM 6	CL
ARANJUEZ	AJ 1	CL
	AJ 2	CL
	AJ 3	CL
	AJ 4	CL
	AJ 5	CL
	AJ 6	CL

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Caracterización de la ceniza

Se realizó el análisis físico de reducción por calcinación, peso específico, granulometría, color, olor, y el análisis químico de Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , y SiO_2 .

3.3.2.1 Reducción por calcinación (Rc)

Figura 3.18 Reducción por calcinación



Fuente: Elaboración propia

Peso de olla “Po” (g)= 156,971 g

Peso de olla + papel “Po+p” (g) = 179,178 g

Peso de olla + ceniza de papel “Po+cp” (g) = 160,474 g

$$CP\% = \frac{(Po + cp) - Po}{(Po + p) - Po} * 100$$

$$CP\% = \frac{156,474 - 159,971}{179,178 - 156,971} * 100 = 15.774 \%$$

Tabla 3.14: Reducción por calcinación

Ensayo	1	2	3
Peso de la olla "Po" (g)=	156.971	135.818	156.971
Peso de olla + papel "Po+p"=	179.178	151.127	189.189
Peso de olla + ceniza de papel "Po+cp"=	160.474	138.200	161.974
Papel "p" (g)=	22.207	15.309	32.218
Ceniza de papel "CP" (g) =	3.503	2.382	5.003
Ceniza de papel "CP" (%) =	15.774	15.559	15.529
Promedio (%)	15.621		

Fuente: Elaboración propia

$$R_c = 100\% - 15.621\% = 84.379 \%$$

3.2.2.2 Peso específico de la ceniza de papel (CP)

Figura 3.19: Peso específico de la ceniza de papel



Fuente: Elaboración propia

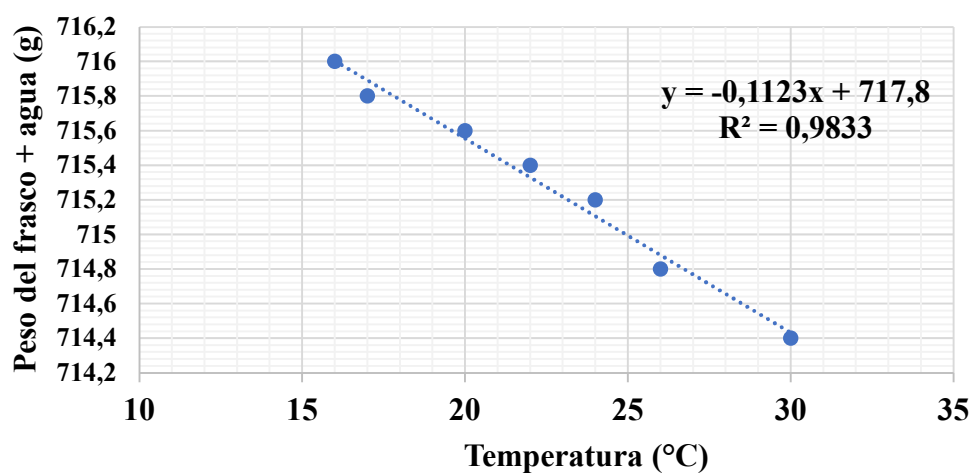
Tabla 3.15: Calibración del frasco volumétrico

Peso del frasco limpio (vacío-seco) (g) =		224,6
Peso del frasco + agua: Wfw (g)=		712,8
Numero de ensayo	Temp.	Wfw
	(°C)	(g)
1	30	714,4
2	26	714,8
3	24	715,2
4	22	715,4
5	20	715,6
6	17	715,8
7	16	716

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20: Calibración del frasco volumétrico

Calibración del Frasco Volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16: Peso específico de la ceniza de papel

PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO

Ensayo	1	2	3	4	5	Prom.
Temperatura ensayada: "T" (°C)	27	25	22	20	18	
Peso del suelo seco: "Ws" (g)	79,60	79,60	79,60	79,60	79,60	
Peso del frasco más agua: "Wfw" (g)	714,77	714,99	715,33	715,55	715,78	
Peso del frasco + agua + suelo: "Wfws" (g)	766,8	767	767,4	767,7	768	
Peso específico: " γ_s " (g/cm ³)	2,8873	2,8847	2,8914	2,8993	2,9073	
Factor de corrección "K"	0,9983	0,9989	0,9996	1,0000	1,0004	
Peso específico corregido: " γ_{sc} " (g/cm ³)	2,8824	2,8816	2,8902	2,8993	2,9085	2,8924

El peso específico relativo de la muestra es de: **2,89 g/cm³**

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Granulometría

Se realizó el tamizado donde el 100% de la muestra paso el tamiz #200.

Se realizó la granulometría por el método del hidrómetro.

Figura 3.21: Hidrometría con 152 H para "CP"



Fuente: Elaboración propia

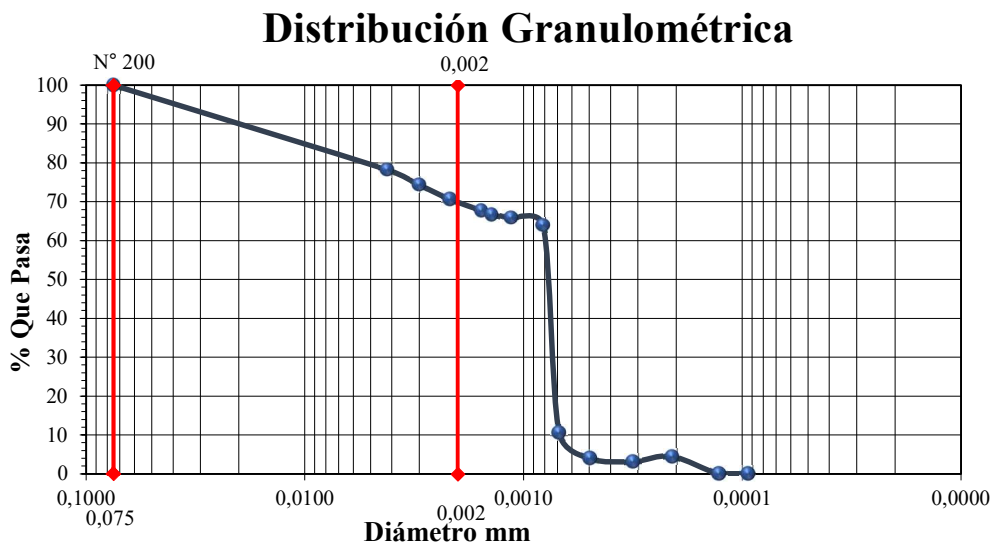
Tabla 3.17: Hidrometría con 152 H para “CP”

Modelo											
Hidrómetro:	152 H					Temperatura (°C):	24				
Peso suelo seco:	50	gr				Registro Hidrómetro (g/cm³):	3				
Peso específico:	2,89	gr/cm³				Ct (g/cm³):	1				
Agente Dispersante:						Cm (g/cm³):	1				
	Hexametafosfato de sodio (NaPO ₃) ₆					RCd (g/cm³):	5				
“a”:	0,952					Cd (g/cm³):	-5,0000				

Tiempo (min)	T °C	Lect. Real Rh (g/cm³)	Lect. Corr. Menis. Rr (g/cm³)	Ct (g/cm³)	Const. K Tabla	Lect. Corr. Rc (g/cm³)	Prof. Efec. L (cm)	L/t (cm/m in)	Diam. Part. (mm)	% Mas Fino Parc.	% Mas Fino Tot.
									0,075		100
1	16	46	47	-0,9	0,00136	41,1	9,58	9,58	0,0042	78,25	78,25
2	16	44	45	-0,9	0,00136	39,1	9,88	4,940	0,0030	74,45	74,45
4	16	42	43	-0,9	0,00136	37,1	10,19	2,548	0,0022	70,64	70,64
8	16	40,5	41,5	-0,9	0,00136	35,6	10,48	1,310	0,0016	67,78	67,78
10	16	40	41	-0,9	0,00136	35,1	10,58	1,058	0,0014	66,83	66,83
15	16	39,5	40,5	-0,9	0,00136	34,6	10,64	0,709	0,0011	65,88	65,88
30	16	38,5	39,5	-0,9	0,00136	33,6	10,78	0,359	0,0008	63,97	63,97
60	16	10,5	11,5	-0,9	0,00136	5,6	15,38	0,256	0,0007	10,66	10,66
120	16	7	8	-0,9	0,00136	2,1	15,98	0,133	0,0005	4,00	4,00
276	19	6	7	-0,3	0,00131	1,7	16,03	0,058	0,0003	3,24	3,24
566	22	6	7	0,4	0,00126	2,4	15,92	0,028	0,0002	4,57	4,57
1579	22	2,5	3,5	0,4	0,00126	0	16,30	0,010	0,0001	0,00	0,00
2880	22	0	1	0,4	0,00126	0	16,30	0,006	0,0001	0,00	0,00
1579	22	1	2	0,4	0,00126	0	16,30	0,010	0,0001	0,00	0,00
2880	22	0	1	0,4	0,00126	0	16,30	0,006	0,0001	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22: Hidrometría “CP”



Fuente: Elaboración propia

Porcentaje más fino que: 0,002 mm = 69,94 %

Porcentaje entre % (0.075 mm) - % (0.002mm) = $100 - 69,94 = 30,06$ %

3.2.2.4 Color y olor

- Se pudo observar un color blanco puro.
- La muestra tiene olor similar al yeso.

Figura 3.23: Color de la ceniza de papel



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.5 Análisis químico

Tabla 3.18: Análisis químico de la ceniza de papel

RESULTADOS:		Id Cliente		M-1
Parámetro	Unidades	Norma/Método	L.D.	
Aluminio [Al]	%	Gravimetría	0,001	2,993
Calcio [Ca]	%	AAS	0,01	43,28
Hierro [Fe]	%	AAS	0,01	3,09
Magnesio [Mg]	%	AAS	0,01	0,66
Potasio [K]	%	AAS	0,01	1,14
Sílice [SiO₂]	%	AAS	0,05	2,17
Sodio [Na]	%	AAS	0,01	3,92
Al₂O₃	%			5,653
CaO	%			60,59
MgO	%			1,10
Fe₂O₃	%			4,41
K₂O	%			2,75
Na₂O	%			10,57
SiO₂	%			2,17
L.D. = Límite de determinación				

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Caracterización de las “CL” mezcladas con “CP”

Para caracterizar las arcillas de baja compresibilidad mezcladas con ceniza de papel, se agruparon las 30 muestras disponibles según su afinidad en el límite líquido (LL). En la selección de muestras representativas, se establecieron seis intervalos específicos de LL (20–25%, 25–30%, 30–35%, 35–40%, 40–45% y 45–50%). De este modo, se identificaron 6 muestras distintivas, una por cada rango, las cuales se utilizaron posteriormente para preparar las mezclas con ceniza.

Tabla 3.19: Agrupación por afinidad según el límite líquido

AGRUPACIÓN POR AFINIDAD SEGUN EL LÍMITE LÍQUIDO				
MUESTRA	LL	LP	IP	CLASIFICACIÓN SUCS
SM 4	25	15	10	CL
AJ 2	27	18	9	CL
GB 4	27	19	8	CL
AJ 4	29	17	12	CL
SM 2	29	21	8	CL
SM 6	30	20	10	CL
SB 3	32	22	10	CL
SM 5	35	21	14	CL
GB 6	35	21	14	CL
GB 1	35	23	12	CL
GB 5	35	20	15	CL
SB 5	35	23	12	CL
MF 3	37	21	16	CL
MF 2	37	23	14	CL
SM 3	38	23	15	CL
GB 2	39	24	15	CL
MF 1	39	24	15	CL
SB 4	39	20	19	CL
MF 5	40	22	18	CL
SM 1	42	25	17	CL
MF 4	42	23	19	CL
AJ 3	43	22	21	CL
AJ 1	44	24	20	CL
AJ 5	44	24	20	CL
MF 6	46	26	20	CL
AJ 6	46	25	21	CL
SB 6	47	25	22	CL
GB 3	48	26	22	CL
SB 2	50	27	23	CL
SB 1	50	28	22	CL

Fuente: Elaboración propia

Para tener un estudio que abarque a todas las arcillas de baja compresibilidad del distrito 12 de la ciudad de Tarija se escogió:

Tabla 3.20: Arcillas de baja compresibilidad escogidas

MUESTRA	LL	LP	IP	CLASIFICACIÓN
SM 4	25	15	10	CL
SM 6	30	20	10	CL
GB 1	35	23	12	CL
MF 5	40	22	18	CL
AJ 5	44	24	20	CL
SB 2	50	27	23	CL

Fuente: Elaboración propia

Para escoger los porcentajes de ceniza de papel se procedió a hacer ensayos de plasticidad con los porcentajes 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40% y 50% de ceniza de papel combinando con diversas arcillas de baja compresibilidad con el objetivo de encontrar un porcentaje optimo que redujera el índice de plasticidad. Pero al no encontrar ningún porcentaje de ceniza que redujera la plasticidad como se mencionaba en los antecedentes y al ver que, seguir aumentando porcentajes arriba de 50%, ya no sería factible, se procedió a hacer los estudios con los porcentajes que fueron mencionados en los antecedentes donde:

(Putra, 2022) logro reducir el índice de plasticidad de suelos arcillosos con porcentajes de 5%, 10% y 15% de ceniza de papel.

Y (Byiringiro, 2014) logro reducir el índice de plasticidad de suelos expansivos con porcentajes de 8%, 20% y 24% de ceniza de papel.

Por lo tanto, queriendo abarcar ambos estudios se escogió los siguientes porcentajes para utilizarlos en nuestra investigación:

Tabla 3.21: Porcentajes de ceniza de papel escogidos

Porcentajes de ceniza de papel
5%
10%
15%
20%

Fuente: Elaboración propia

Se realizó ensayos de laboratorio de límite líquido por el método de Casagrande y límite plástico por el método de los rollitos, ambos ensayos con arcillas de baja compresibilidad adicionando porcentajes de ceniza de papel en un 5%, 10%, 15% y 20%; para así poder determinar el índice de plasticidad y su comportamiento.

3.2.3.1 Límites de consistencia y clasificación de las mezclas de CL con CP

El límite líquido se realizó por el método de Casagrande, donde se usó 100 gramos de arcilla de baja compresibilidad que pasa el tamiz N°40 secada al horno previamente por 24 horas, luego se agregó el porcentaje de ceniza y se mezcló con el uso de las manos hasta perder los grumos que se genera por ésta, y se vea una muestra uniforme. Luego se agregó agua y mezcló con la espátula hasta lograr una pasta homogénea y realizar el límite líquido.

Una vez acabado el límite líquido con las sobras de material se realizó el límite plástico por el método de los rollitos.

Este mismo procedimiento se realizó para las muestras SM 4, SM 6, GB 1, MF 5, AJ 5 y SB 2, con adiciones de 5%, 10%, 15% y 20% de ceniza de papel.

Figura 3.24: Preparación de la muestra y ensayos de límite líquido y plástico



Fuente: Elaboración propia

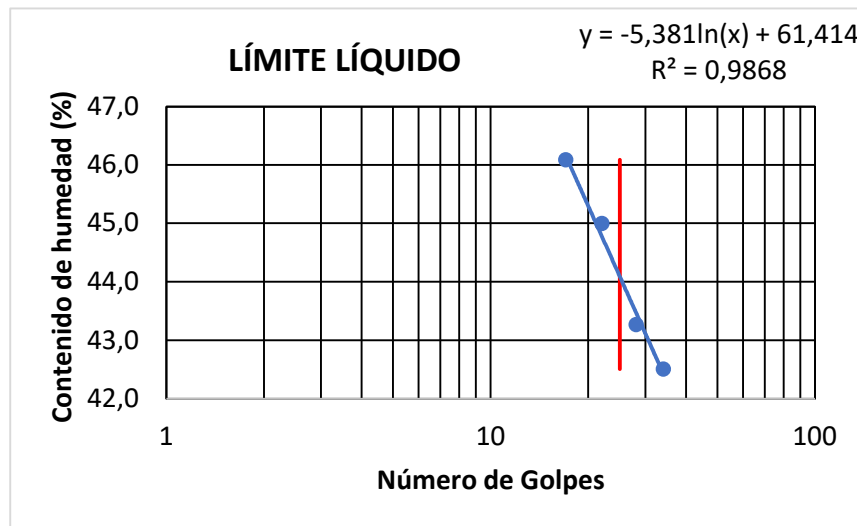
3.2.3.1.1 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 5 % CP”

Tabla 3.22: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 5 % CP”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (g)	13,06	12,43	12,95	13,57	13,62	13	12,68
Peso de Cápsula+ M. Húmeda (g)	25,39	28,09	29,34	27,65	15,26	14,06	13,62
Peso de Cápsula+ M. Seca (g)	21,5	23,23	24,39	23,45	14,94	13,85	13,43
Peso de Agua (g)	3,89	4,86	4,95	4,2	0,32	0,21	0,19
Peso de Muestra Seca (g)	8,44	10,8	11,44	9,88	1,32	0,85	0,75
Contenido de Húmeda (%)	46,1	45,0	43,3	42,5	24,2	24,7	25,3
N° de Golpes	17	22	28	34			
Promedio de C de humedad (%)					24,8		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25: Límite líquido de “MF 5 + 5 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido

$$LL = -5,381 \cdot \ln(25) + 61,414 = 44,09 \% \approx 44 \%$$

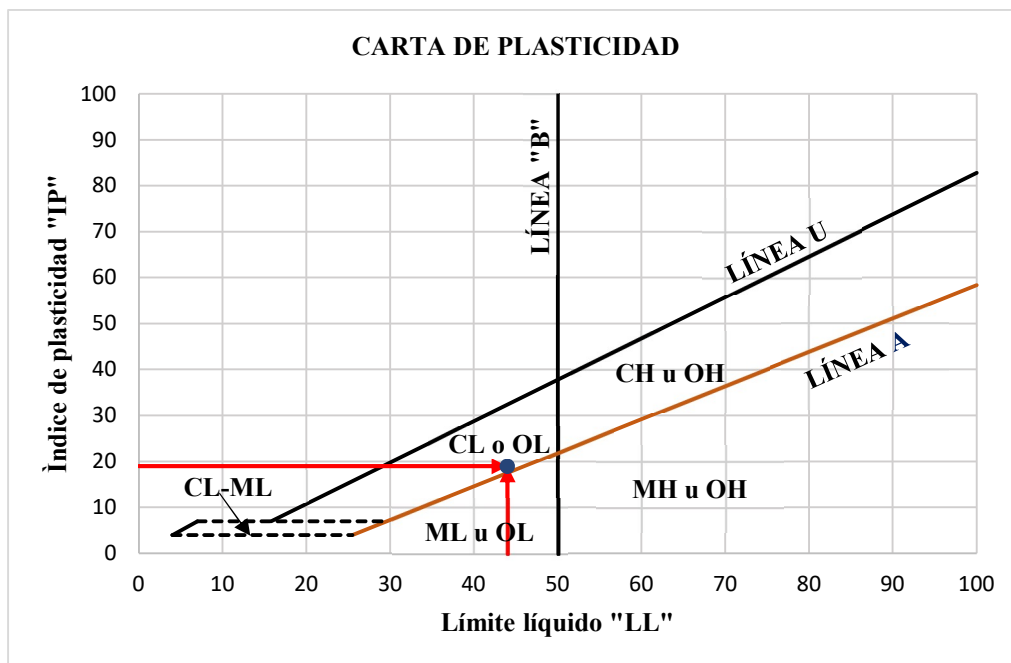
Límite plástico

$$LP = (24,2 + 24,7 + 25,3) / 3 = 24,8 \% \approx 25 \%$$

Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP = 44 - 25 = 19 \%$$

Figura 3.26: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 5 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo según SUCS: CL -> Arcilla inorgánica de baja plasticidad

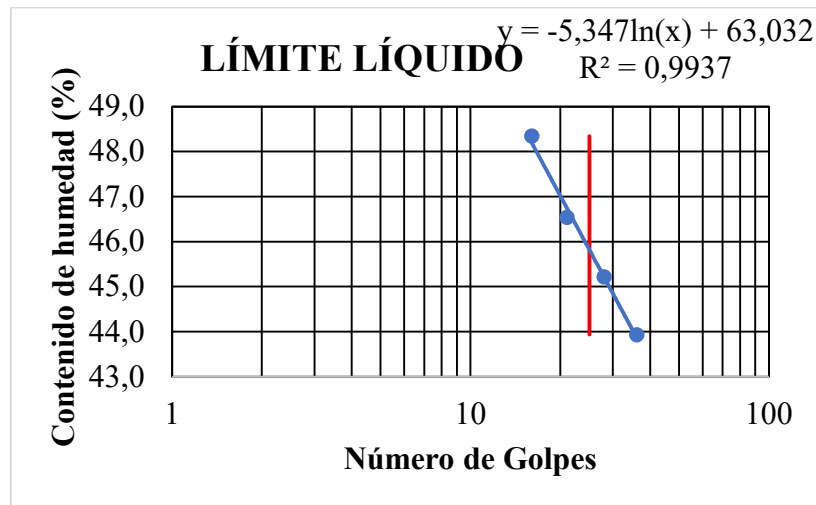
3.2.3.1.2 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 10 % CP”

Tabla 3.23: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 10 % CP”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Capsula							
Peso de Capsula (g)	16,81	15,99	15,74	14,81	17,19	14,83	13,32
Peso de Cápsula+ M. Húmeda (g)	31,6	29,56	29,42	26,8	18,46	16,03	14,48
Peso de Cápsula+ M. Seca (g)	26,78	25,25	25,16	23,14	18,22	15,8	14,26
Peso de Agua (gr)	4,82	4,31	4,26	3,66	0,24	0,23	0,22
Peso de Muestra Seca (gr)	9,97	9,26	9,42	8,33	1,03	0,97	0,94
Contenido de Húmeda (%)	48,3	46,5	45,2	43,9	23,3	23,7	23,4
N° de Golpes	16	21	28	36			
Promedio de C de humedad (%)					23,5		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27: Límite líquido de “MF 5 + 10 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido

$$LL = -5,347 \cdot \ln(25) + 63,032 = 45,82 \% \approx 46 \%$$

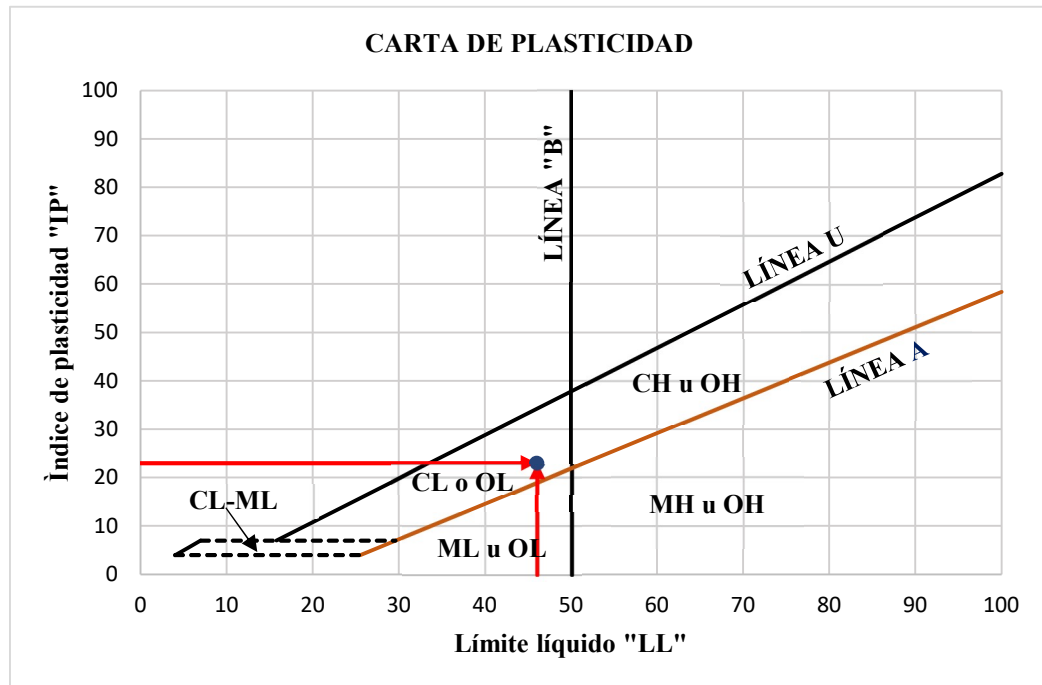
Límite plástico

$$LP = (23,3 + 23,7 + 23,4) / 3 = 23,5 \% \approx 23 \%$$

Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP = 46 - 23 = 23 \%$$

Figura 3.28: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 10 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo según SUCS: CL -> Arcilla inorgánica de baja plasticidad

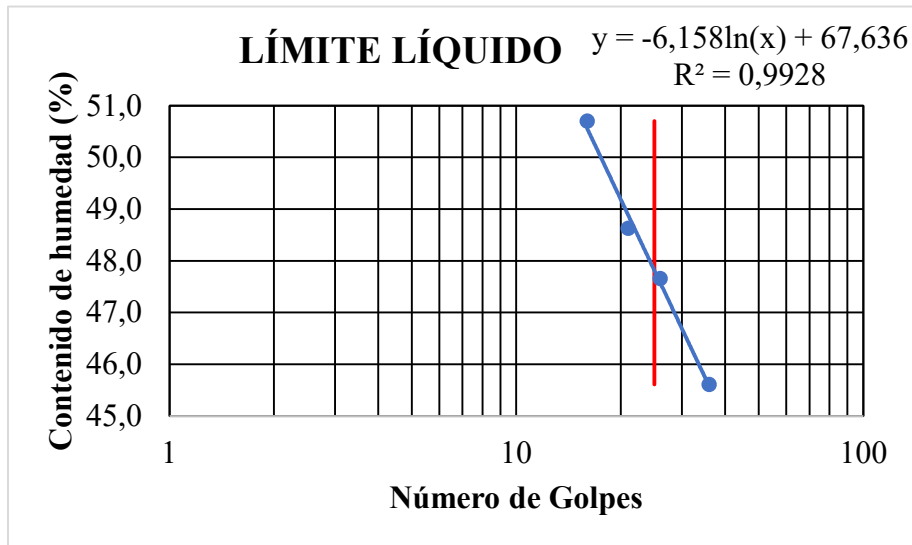
3.2.3.1.3 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 15 % CP”

Tabla 3.24: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 15 % CP”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (g)	14,94	13,6	13,89	15,24	15,03	15,07	20,12
Peso de Cápsula+ M. Húmeda (g)	25,64	26,59	27,43	29	15,77	15,83	21,19
Peso de Cápsula+ M. Seca (g)	22,04	22,34	23,06	24,69	15,63	15,68	20,98
Peso de Agua (g)	3,6	4,25	4,37	4,31	0,14	0,15	0,21
Peso de Muestra Seca (g)	7,1	8,74	9,17	9,45	0,6	0,61	0,86
Contenido de Húmeda (%)	50,7	48,6	47,7	45,6	23,3	24,6	24,4
N° de Golpes	16	21	26	36			
Promedio de C de humedad (%)					24,1		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.29: Límite líquido de “MF 5 + 15 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido

$$LL = -6,158 \cdot \ln(25) + 67,636 = 47,82 \% \approx 48 \%$$

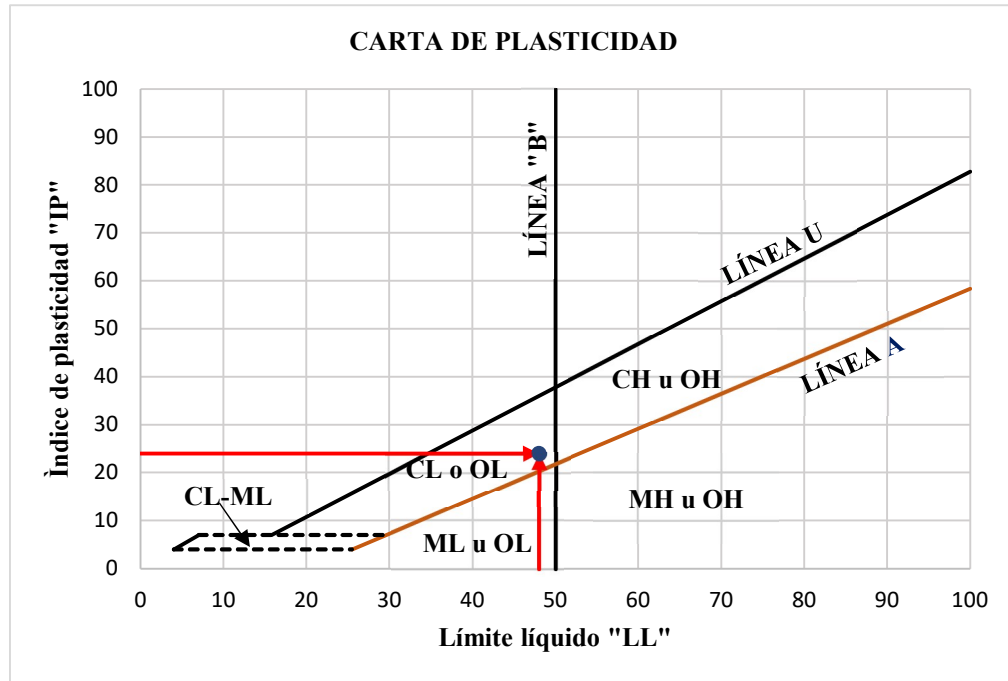
Límite plástico

$$LP = (23,3 + 24,6 + 24,4) / 3 = 24,1 \% \approx 24 \%$$

Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP = 48 - 24 = 24 \%$$

Figura 3.30: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 15 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo según SUCS: CL -> Arcilla inorgánica de baja plasticidad

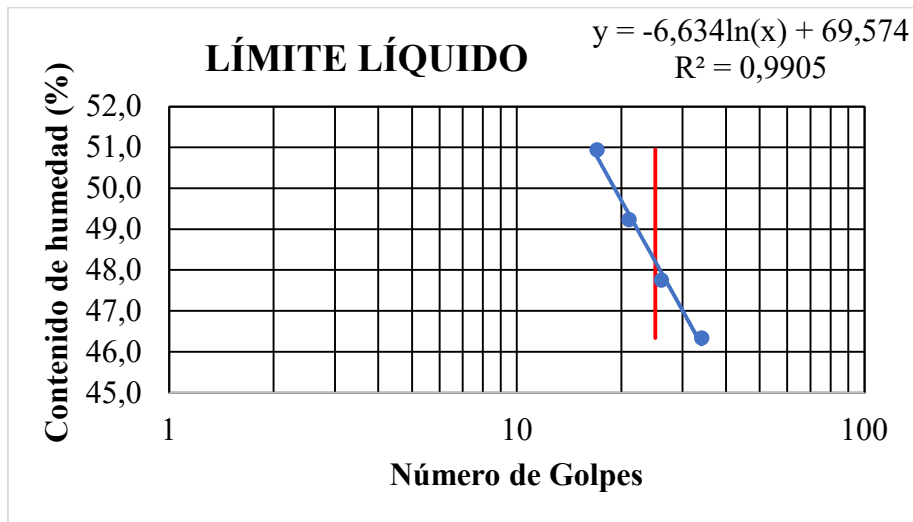
3.2.3.1.4 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 20 % CP”

Tabla 3.25: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 20 % CP”

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO		
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Cápsula							
Peso de Cápsula (g)	14,98	16,17	15,54	15,46	13,85	15,02	14,65
Peso de Cápsula+ M. Húmeda (g)	30,12	30,96	29,4	29,26	14,88	16,03	15,64
Peso de Cápsula+ M. Seca (g)	25,01	26,08	24,92	24,89	14,67	15,83	15,44
Peso de Agua (g)	5,11	4,88	4,48	4,37	0,21	0,2	0,2
Peso de Muestra Seca (g)	10,03	9,91	9,38	9,43	0,82	0,81	0,79
Contenido de Húmeda (%)	50,9	49,2	47,8	46,3	25,6	24,7	25,3
N° de Golpes	17	21	26	34			
Promedio de C de humedad (%)					25,2		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31: Límite líquido de “MF 5 + 20 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido

$$LL = -6,634 \cdot \ln(25) + 69,574 = 48,22 \% \approx 48 \%$$

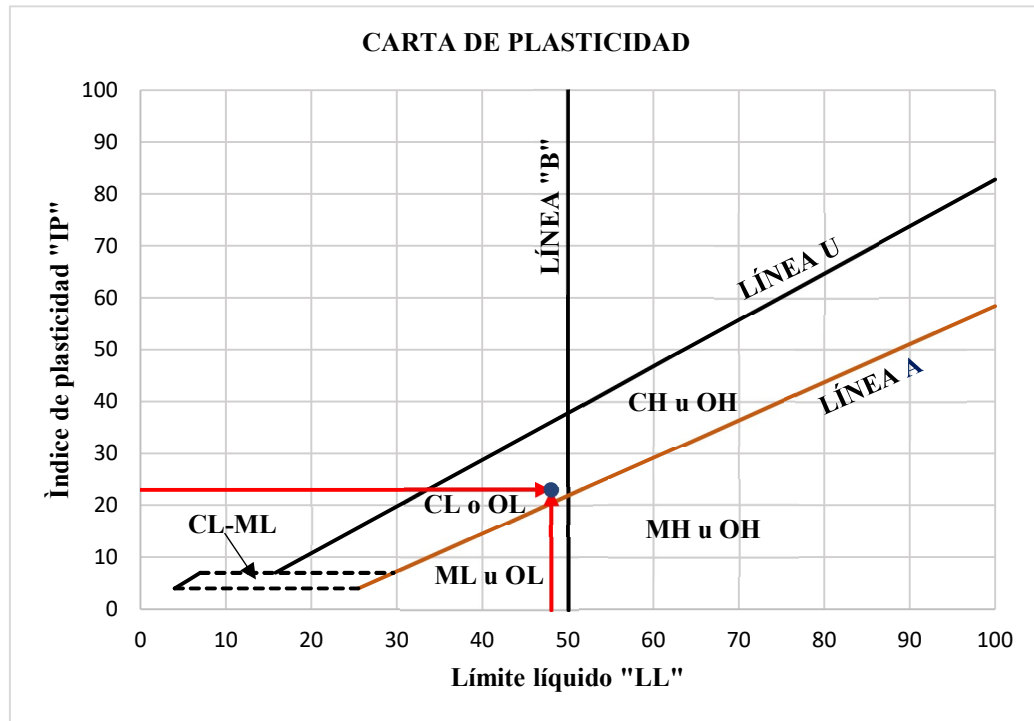
Límite plástico

$$LP = (25,6 + 24,7 + 25,3) / 3 = 25,2 \% \approx 25 \%$$

Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP = 48 - 25 = 23 \%$$

Figura 3.32: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 20 % CP”



Fuente: Elaboración propia

Clasificación del suelo según SUCS: CL -> Arcilla inorgánica de baja plasticidad

3.2.3.2 Comportamiento de los límites de consistencia de “MF 5” con 5 % CP

Tabla 3.26: Resumen del LL, LP, IP y clasificación de “MF 5” con 5 % CP

MUESTRA	CENIZA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASIFICACIÓN
MF 5	0%	40	23	17	CL
	5%	44	25	19	CL
	10%	46	23	23	CL
	15%	48	24	24	CL
	20%	48	25	23	CL

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3 Resumen de la caracterización de las “CL” mezcladas con “CP”

Tabla 3.27: Resumen de la caracterización de las “CL” mezcladas con “CP”

MUESTRA	CENIZA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASIFICACIÓN
SB 2	0%	50	27	23	CL
	5%	55	29	26	CH
	10%	56	29	27	CH
	15%	59	30	29	CH
	20%	57	30	27	MH
AJ 5	0%	44	24	20	CL
	5%	49	25	24	CL
	10%	51	25	26	CH
	15%	52	26	26	CH
	20%	51	26	25	CH
MF 5	0%	40	23	17	CL
	5%	44	25	19	CL
	10%	46	23	23	CL
	15%	48	24	24	CL
	20%	48	25	23	CL
GB 1	0%	35	22	13	CL
	5%	39	24	15	CL
	10%	40	22	18	CL
	15%	42	23	19	CL
	20%	42	24	18	CL
SM 6	0%	30	19	11	CL
	5%	34	19	15	CL
	10%	35	18	17	CL
	15%	36	20	16	CL
	20%	37	21	16	CL
SM 4	0%	25	15	10	CL
	5%	29	17	12	CL
	10%	31	16	15	CL
	15%	31	17	14	CL
	20%	33	19	14	CL

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA

INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

Se analizó el comportamiento del índice de plasticidad (IP) de seis muestras representativas de arcillas de baja compresibilidad, identificadas como SB2, AJ5, MF5, GB1, SM6 y SM4, mediante la incorporación de ceniza de papel (CP) en porcentajes del 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Para cada combinación se determinaron experimentalmente el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y, a partir de estos valores, se calculó el índice de plasticidad (IP), que es el parámetro principal de esta investigación. El propósito es identificar el comportamiento de las arcillas de baja compresibilidad ante la presencia del aditivo, evaluando si la ceniza de papel es capaz de mejorar (reducir) la plasticidad de los suelos.

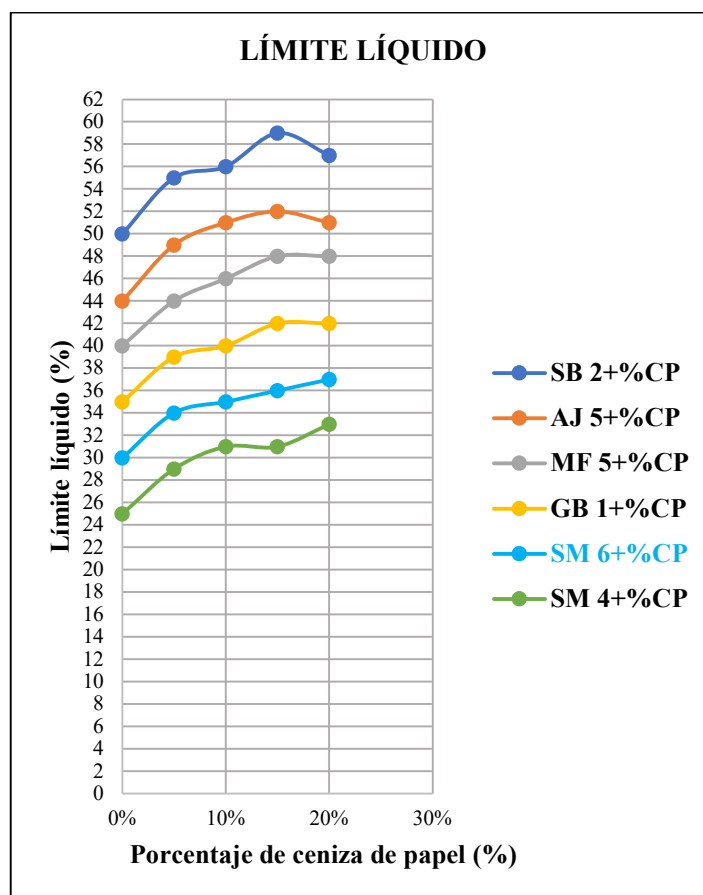
4.1 Análisis del comportamiento del límite líquido y límite plástico

Aunque el enfoque central de esta investigación es el índice de plasticidad, es fundamental analizar cómo se comportan sus dos componentes: el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Esto se debe a que el IP se obtiene a partir de la diferencia entre ambos, y cualquier variación significativa en uno u otro influye directamente en el resultado final. Por tanto, descomponer el análisis en estos dos parámetros es clave para comprender qué propiedad del suelo fue más sensible a la incorporación de la ceniza de papel y por qué se obtuvo el comportamiento observado.

4.1.1 Comportamiento del límite líquido

Las arcillas de baja compresibilidad del distrito 12 de la ciudad de Tarija, al ser mezcladas con porcentajes crecientes de ceniza de papel (5 %, 10 %, 15 % y 20 %), presentaron en todos los casos un incremento progresivo del LL. Este comportamiento tiene una tendencia similar entre todas las muestras, lo que sugiere que el efecto de la ceniza de papel sobre el LL es consistente independientemente del punto de muestreo, siempre y cuando esta sea arcilla baja compresibilidad.

Figura 4.1: Comportamiento del límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Este comportamiento indica que las mezclas requirieron mayor cantidad de agua para alcanzar la condición de fluidez definida por el LL. Una de las principales causas de este fenómeno es la alta proporción de partículas ultrafinas en la ceniza (69,94 % menores a 0,002 mm), lo que incrementa la superficie específica del material y, por tanto, su capacidad de retener humedad.

Además, la composición química de la ceniza de papel, con un contenido elevado de óxido de sodio (10,57 %) y óxido de potasio (2,75 %), favorece la absorción y retención de agua por su carácter higroscópico, aumentando la hidratación de las partículas finas. La presencia de materia inerte (12,757 %) también contribuye a retener humedad en la mezcla, prolongando el estado plástico-líquido del suelo. Estos factores, en conjunto, explican por qué el LL se incrementa significativamente tras la adición de ceniza de papel.

Después de ver las causas del aumento del LL, se analizó la diferencia del LL puro de cada suelo con el LL con ceniza, donde se pudo observar lo siguiente.

Tabla 4.1: Diferencia del LL puro con el LL con ceniza

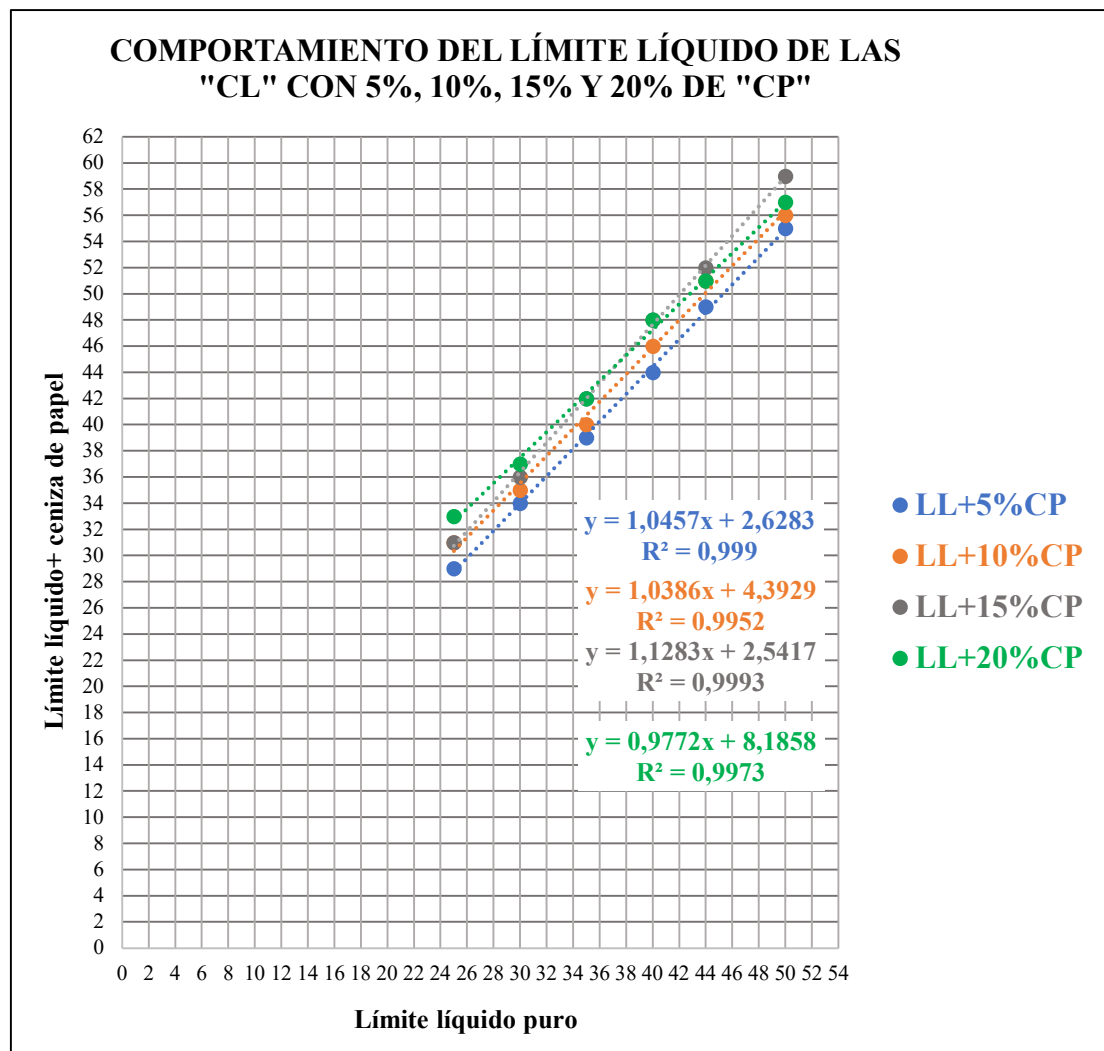
MUESTRA	LL PURO (%)	LL+5%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	25	29	4
SM 4	30	34	4
GB 1	35	39	4
MF 5	40	44	4
AJ 5	44	49	5
SB 2	50	55	5
Promedio=			4,33
MUESTRA	LL PURO (%)	LL+10%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	25	31	6
SM 4	30	35	5
GB 1	35	40	5
MF 5	40	46	6
AJ 5	44	51	7
SB 2	50	56	6
Promedio=			5,83
MUESTRA	LL PURO (%)	LL+15%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	25	31	6
SM 4	30	36	6
GB 1	35	42	7
MF 5	40	48	8
AJ 5	44	52	8
SB 2	50	59	9
Promedio=			7,33
MUESTRA	LL PURO (%)	LL+20%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	25	33	8
SM 4	30	37	7
GB 1	35	42	7
MF 5	40	48	8
AJ 5	44	51	7
SB 2	50	57	7
Promedio=			7,33

Fuente: Elaboración propia

En promedio, el aumento del LL respecto al suelo natural fue de 4,33 % para el 5 % de ceniza, 5,83 % para el 10 %, 7,33 % para el 15 % y 7,33 % para el 20 %, siendo todos incrementos desfavorables para aplicaciones viales. Un LL elevado implica menor resistencia al corte en estado saturado, mayor susceptibilidad a la deformación y mayor riesgo de pérdida de soporte bajo condiciones de humedad, especialmente en subrasantes de carreteras.

Con más precisión a continuación se representa el comportamiento que sufre el límite líquido del suelo natural al incrementar ceniza de papel.

Figura 4.2: Comportamiento del LL puro vs el LL con ceniza



Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el límite líquido (LL) de las arcillas aumenta de forma lineal al añadir ceniza de papel (CP) en porcentajes de 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Este comportamiento puede expresarse mediante ecuaciones de regresión lineal para cada porcentaje de adición.

- 5 % CP: $y = 1,0457x + 2,6283$ ($R^2 = 0,999$)
- 10 % CP: $y = 1,0386x + 4,3929$ ($R^2 = 0,9952$)
- 15 % CP: $y = 1,1283x + 2,5417$ ($R^2 = 0,9993$)
- 20 % CP: $y = 0,9772x + 8,1858$ ($R^2 = 0,9973$)

Donde:

- x = límite líquido puro
- y = límite líquido con ceniza

Las ecuaciones permiten visualizar y cuantificar la tendencia del LL frente al tratamiento con ceniza y los altos coeficientes de determinación (R^2), indican un excelente ajuste.

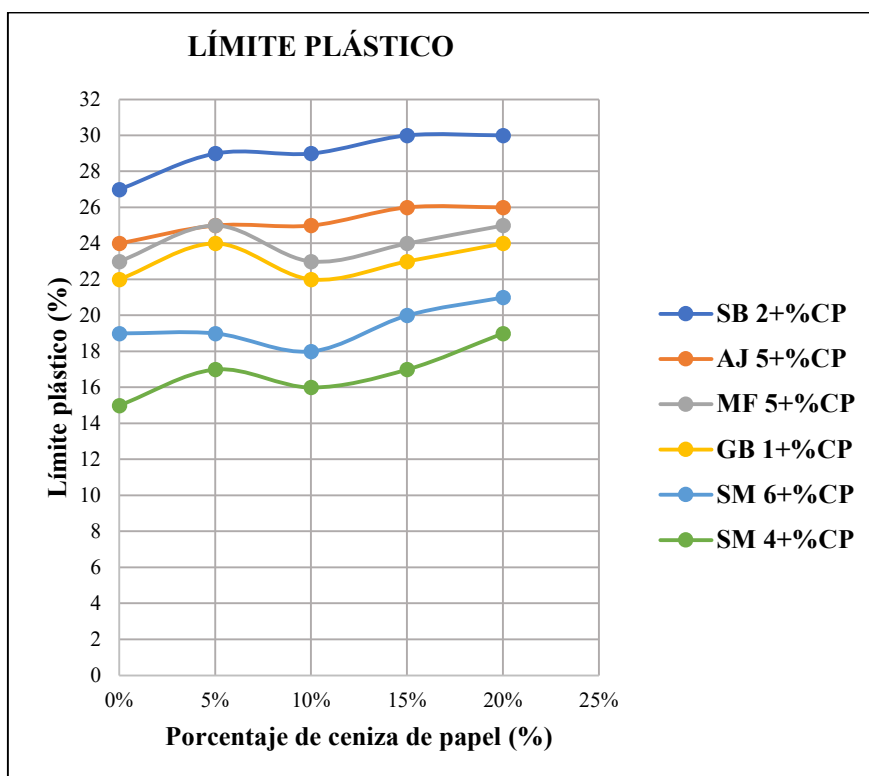
En conclusión, la incorporación de ceniza de papel, lejos de mejorar la plasticidad para fines de estabilización, incrementa la capacidad de retención de humedad del suelo, lo que resulta perjudicial para la estabilidad y durabilidad de las estructuras viales.

4.1.2 Comportamiento del límite plástico

La incorporación de ceniza de papel (CP) en arcillas de baja compresibilidad generó un incremento progresivo pero muy leve en el límite plástico (LP).

A diferencia del límite líquido, el LP mostró un comportamiento menos uniforme: en algunas muestras aumentó de forma constante, mientras que en otras permaneció casi estable o con variaciones mínimas y se las puede observar a continuación.

Figura 4.3: Comportamiento del límite plástico



Fuente: Elaboración propia

La gráfica evidencia una tendencia similar entre todas las muestras, con variaciones mínimas e insignificantes en el límite plástico, lo que indica que el suelo tratado conserva una consistencia trabajable y relativamente estable incluso con el incremento del contenido de ceniza de papel. Este ligero aumento del LP podría estar relacionado con las características físicas y químicas de la ceniza: su alta finura favorece la retención de agua, mientras que la presencia de óxidos alcalinos incrementa la atracción y retención de humedad en la mezcla. Además, la materia inerte presente que no contribuye a la cohesión, interfiriendo en la compactación y estructura interna del suelo.

Cabe resaltar que, durante la manipulación de la ceniza en estado húmedo, esta no presentó propiedades plásticas por sí misma, lo que confirma que su efecto en el LP se debe principalmente a la interacción física y química con las partículas de arcilla y no a un aporte directo de plasticidad.

También se analizó la diferencia del LP puro de cada suelo con el LP con ceniza, donde se pudo observar lo siguiente.

Tabla 4.2: Diferencia del LP puro con el LP con ceniza

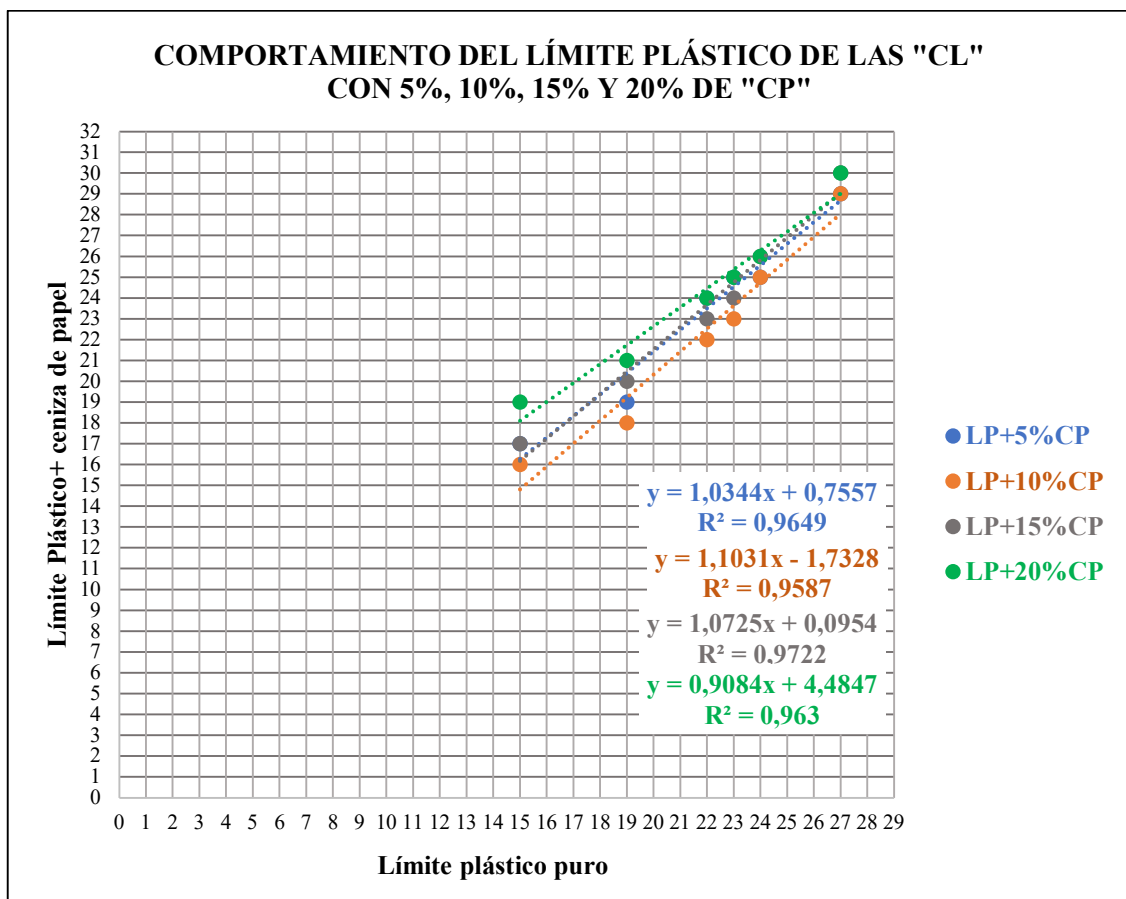
MUESTRA	LP PURO (%)	LP+5%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	15	17	2
SM 4	19	19	0
GB 1	22	24	2
MF 5	23	25	2
AJ 5	24	25	1
SB 2	27	29	2
Promedio=			1,50
MUESTRA	LP PURO (%)	LP+10%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	15	16	1
SM 4	19	18	-1
GB 1	22	22	0
MF 5	23	23	0
AJ 5	24	25	1
SB 2	27	29	2
Promedio=			0,50
MUESTRA	LP PURO (%)	LP+15%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	15	17	2
SM 4	19	20	1
GB 1	22	23	1
MF 5	23	24	1
AJ 5	24	26	2
SB 2	27	30	3
Promedio=			1,67
MUESTRA	LP PURO (%)	LP+20%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	15	19	4
SM 4	19	21	2
GB 1	22	24	2
MF 5	23	25	2
AJ 5	24	26	2
SB 2	27	30	3
Promedio=			2,50

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, la variación del LP con la adición de 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de CP fue de +1,5 %, +0,5 %, +1,67 % y +2,5 % respectivamente, valores que reflejan un cambio pequeño y sin impacto significativo sobre la trabajabilidad del suelo. Esto indica que el material conserva una consistencia relativamente estable incluso con la adición de ceniza.

Con más precisión a continuación se representa el comportamiento que sufre el límite plástico del suelo natural al incrementar ceniza de papel.

Figura 4.4: Comportamiento del LP puro vs el LP con ceniza



Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones de regresión para cada porcentaje de adición muestran la tendencia de incremento del LP con altos coeficientes de determinación (R^2 entre 0,95 y 0,97), confirmando la consistencia del patrón observado:

- 5 % CP: $y = 1,0344x + 0,7557$ ($R^2 = 0,9649$)
- 10 % CP: $y = 1,1031x + 1,7328$ ($R^2 = 0,9587$)
- 15 % CP: $y = 1,0725x + 0,0954$ ($R^2 = 0,9722$)
- 20 % CP: $y = 0,9084x + 4,4847$ ($R^2 = 0,963$)

Donde:

- x = límite plástico puro
- y = límite plástico con ceniza

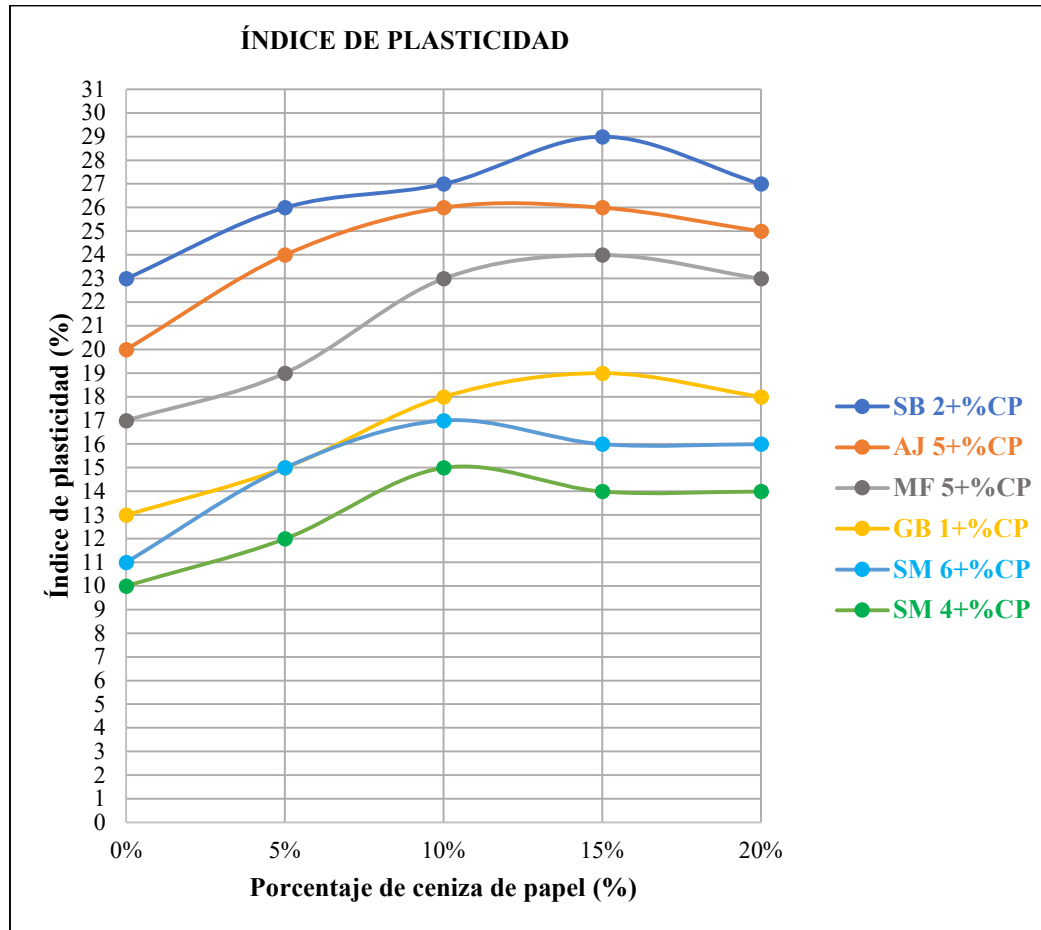
En conclusión, aunque la ceniza de papel provoca un ligero aumento del límite plástico, este cambio es mínimo y no representa una mejora en términos de reducción de plasticidad. Por el contrario, la presencia de óxidos alcalinos y materia inerte pudo contribuir a que el suelo retuviera más humedad, lo que es desfavorable para aplicaciones viales donde se requiere menor deformabilidad y mayor rigidez en la subrasante.

4.2 Análisis del comportamiento del índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es uno de los principales indicadores del comportamiento mecánico de los suelos finos, ya que define el rango de humedad en el que el suelo permanece plástico y, por tanto, deformable sin romperse. En esta investigación, se analizó cómo varía el IP de muestras de arcillas de baja compresibilidad al incorporar ceniza de papel (CP) en proporciones de 5 %, 10 %, 15 % y 20 %.

En las muestras analizadas se observa que el índice de plasticidad tiende a incrementarse progresivamente con la adición de ceniza de papel. El incremento del IP muestra una tendencia casi lineal hasta el 15 % de adición de ceniza, con ligeras reducciones al 20 %, aunque en ningún caso se logra disminuir el IP respecto al valor inicial.

Figura 4.5: Comportamiento del índice de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Este comportamiento está relacionado con los cambios observados en el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP): el LL presenta incrementos más pronunciados con la adición de ceniza, mientras que el LP tiene una variación leve. Esta diferencia amplía la resta (LL – LP) y, por ende, eleva el IP.

En conclusión, la adición de ceniza de papel a las arcillas de baja compresibilidad estudiadas no cumple con el objetivo de reducir la plasticidad; por el contrario, la incrementa debido a su granulometría fina, su composición química con óxidos higroscópicos y la presencia de materia inerte que interfiere en la cohesión y limita el desarrollo de reacciones estabilizantes.

Por lo cual se analizó la diferencia del IP puro de cada suelo con el IP con ceniza, donde se pudo observar lo siguiente.

Tabla 4.3: Diferencia del IP puro con el IP con ceniza

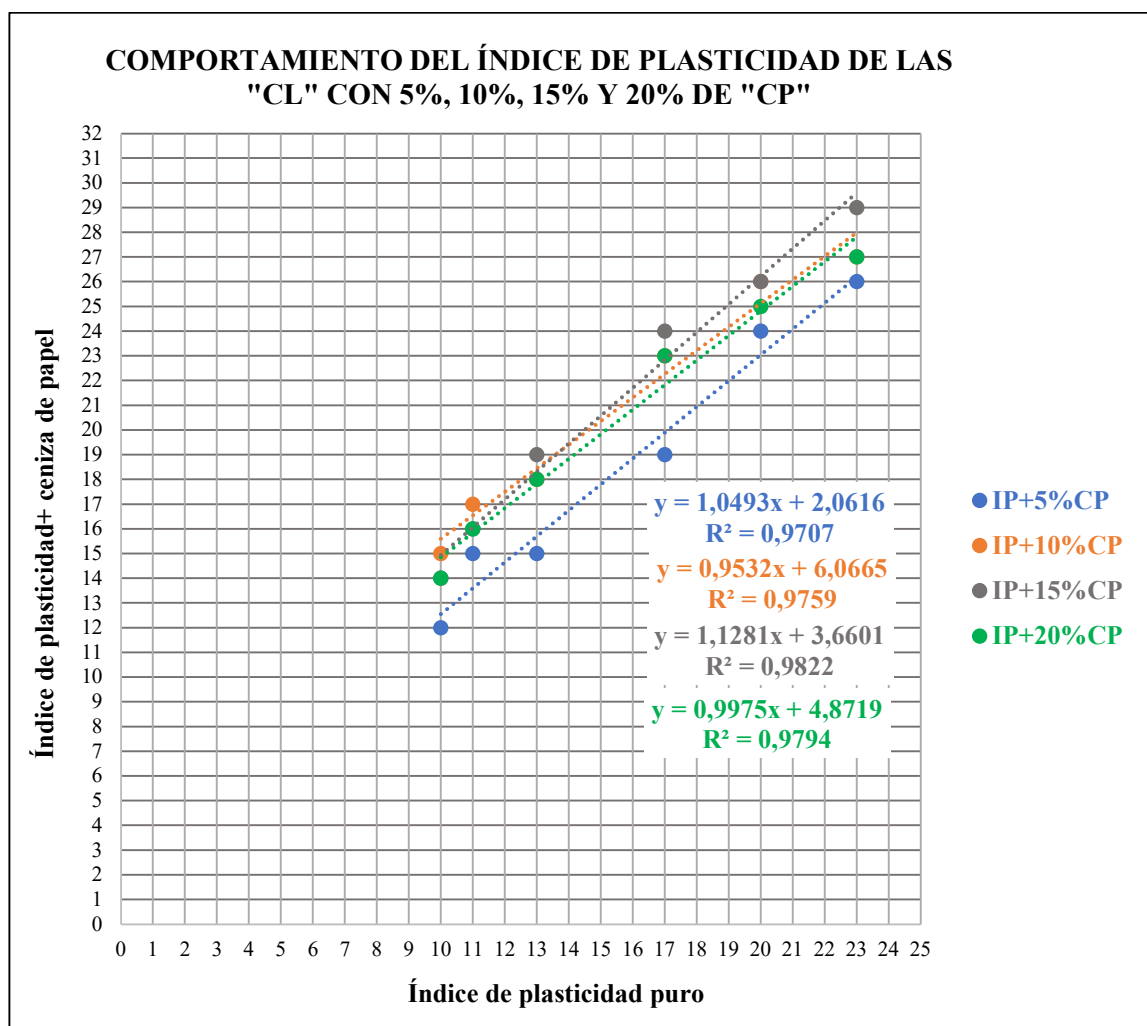
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+5%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	10	12	2
SM 4	11	15	4
GB 1	13	15	2
MF 5	17	19	2
AJ 5	20	24	4
SB 2	23	26	3
Promedio=			2,83
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+10%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	10	15	5
SM 4	11	17	6
GB 1	13	18	5
MF 5	17	23	6
AJ 5	20	26	6
SB 2	23	27	4
Promedio=			5,33
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+15%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	10	14	4
SM 4	11	16	5
GB 1	13	19	6
MF 5	17	24	7
AJ 5	20	26	6
SB 2	23	29	6
Promedio=			5,67
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+20%CP (%)	DIFERENCIA (%)
SM 6	10	14	4
SM 4	11	16	5
GB 1	13	18	5
MF 5	17	23	6
AJ 5	20	25	5
SB 2	23	27	4
Promedio=			4,83

Fuente: Elaboración propia

En promedio, los incrementos porcentuales del IP respecto al suelo natural fueron: con 5 % de ceniza aumentó 2,83%, con 10 % aumentó 5,33%, con 15 % aumentó 5,67% y con 20 % tubo un aumentó de 4,83% en el índice de plasticidad de las arcillas de baja compresibilidad, lo cual indica que no es favorable para reducir la plasticidad del suelo sino más bien es perjudicial ya que los IP mejores son los sin ceniza.

Con más precisión a continuación se representa el comportamiento que sufre el límite líquido del suelo natural al incrementar ceniza de papel.

Figura 4.6: Comportamiento del IP puro vs el IP con ceniza



Fuente: Elaboración propia

El índice de plasticidad de las arcillas aumenta de forma lineal al añadir ceniza de papel (CP) en porcentajes de 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Este comportamiento puede expresarse mediante ecuaciones de regresión lineal para cada porcentaje de adición.

- 5 % CP: $y = 1,0493x + 2,0616$ ($R^2 = 0,9707$)
- 10 % CP: $y = 0,9532x + 6,0665$ ($R^2 = 0,9759$)
- 15 % CP: $y = 1,1281x + 3,6601$ ($R^2 = 0,9822$)
- 20 % CP: $y = 0,9975x + 4,8719$ ($R^2 = 0,9794$)

Donde:

- x = Índice de plasticidad puro
- y = Índice de plasticidad con ceniza

Las ecuaciones de regresión lineal permiten visualizar y cuantificar la tendencia del IP frente al tratamiento con ceniza y los altos coeficientes de determinación (R^2), evidencia un patrón repetitivo y predecible.

En conclusión, la adición de ceniza de papel incrementa el IP de manera progresiva, lo que sugiere que este aditivo no mejora, sino que aumenta la capacidad del suelo para retener agua.

4.2.1 Análisis estadístico del índice de plasticidad

En el Capítulo I de este trabajo se formuló la siguiente hipótesis de investigación:

“La adición de ceniza de papel a arcillas de baja compresibilidad reduce su índice de plasticidad, mejorando su comportamiento para aplicaciones en obras de infraestructura vial.”

Con el fin de comprobar esta hipótesis, se realizó un análisis estadístico para determinar si la incorporación de ceniza de papel a arcillas de baja compresibilidad genera una variación significativa en el índice de plasticidad (IP).

Dado que el número total de datos es menor a 30, se empleó la prueba t de Student para muestras pareadas, con enfoque unilateral a la izquierda. Este procedimiento resulta adecuado porque permite comparar los valores de IP natural con los valores obtenidos tras la adición de ceniza en proporciones de 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, considerando en conjunto

las 24 combinaciones resultantes (6 muestras $\times$ 4 porcentajes). El propósito fue verificar si la disminución del IP era estadísticamente significativa.

Las hipótesis estadísticas se plantearon de la siguiente manera:

- Hipótesis nula (H_0): La adición de ceniza de papel no reduce el índice de plasticidad.
- Hipótesis alternativa (H_1): La adición de ceniza de papel reduce el índice de plasticidad.

Los valores experimentales de IP obtenidos en estado natural y con cada porcentaje de ceniza se organizaron en las Tablas 4.4 y 4.5, donde también se muestran las diferencias respecto al valor natural.

Tabla 4.4: Datos para prueba de hipótesis

n	MUESTRA	IP				
		IP+0%CP	IP+5%CP	IP+10%CP	IP+15%CP	IP+20%CP
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	SM 6	10	12	15	14	14
2	SM 4	11	15	17	16	16
3	GB 1	13	15	18	19	18
4	MF 5	17	19	23	24	23
5	AJ 5	20	24	26	26	25
6	SB 2	23	26	27	29	27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5: Diferencias del IP con mezcla con el IP natural

n	MUESTRA	Diferencias			
		5%-0%	10%-0%	15%-0%	20%-0%
		[%]	[%]	[%]	[%]
1	SM 6	2	5	4	4
2	SM 4	4	6	5	5
3	GB 1	2	5	6	5
4	MF 5	2	6	7	6
5	AJ 5	4	6	6	5
6	SB 2	3	4	6	4

Fuente: Elaboración propia

Número total de pares: $n = 24$

Grados de libertad: $n - 1 = 23$

Media: $\bar{d} = 4,667 \%$

Desviación estándar: $s = 1,404$

Error estándar: $SE = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0.287$

Cálculo del t estadístico: $t_c = \frac{\bar{d}}{SE} = 16,28$

Con 5 grados de libertad ($gl = 23$) y un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para una prueba unilateral izquierda:

Cálculo del t:

$$t = T.INV.(0.05 ; 23) = -1,71$$

$$p = 4.04 \times 10^{-4}$$

Si $t_c < t \rightarrow H_0$ cae en región de rechazo

Como $t_c(16,28) > t(-1,71) \rightarrow$ **no se rechaza H_0**

El valor de t calculado (16,28) es muy superior al valor crítico de t para 23 grados de libertad ($\approx -1,71$ con $\alpha = 0,05$). Además, el valor p obtenido es mucho menor que 0,05, lo que indica que la diferencia observada entre el IP natural y el IP con adición de ceniza es estadísticamente significativa.

Sin embargo, la dirección del cambio no coincide con la hipótesis de investigación. En lugar de reducirse, el índice de plasticidad aumentó de manera progresiva con la adición de ceniza de papel, evidenciando que este material no actúa como un estabilizante eficaz en arcillas de baja compresibilidad.

Este hallazgo confirma los resultados descriptivos previamente obtenidos y demuestra que, bajo las condiciones estudiadas, la ceniza de papel incrementa la plasticidad de los suelos, limitando su aplicación como aditivo para subrasantes en infraestructura vial.

4.3 Análisis de resultados con investigaciones previas

En esta investigación se evaluó el comportamiento del índice de plasticidad en arcillas de baja compresibilidad al ser mezcladas con ceniza de papel bond usado. Los resultados obtenidos evidenciaron que este aditivo no redujo la plasticidad, sino que, por el contrario, generó un incremento progresivo del índice de plasticidad.

Con el fin de identificar las posibles causas de este comportamiento, se realizó un análisis comparativo entre la composición química de la ceniza utilizada en este estudio y las cenizas reportadas en las investigaciones de (Putra, 2022) y (Byiringiro, 2014) en las cuales sí se logró una reducción significativa de la plasticidad.

4.3.1 Análisis de resultados de la composición química de las cenizas de papel

Se elaboró una tabla comparativa que presenta la composición química de las cenizas de papel empleadas en las investigaciones previas y en este trabajo. El objetivo fue identificar las diferencias sustanciales en sus componentes y establecer la relación de estas variaciones con el comportamiento observado en el índice de plasticidad.

Tabla 4.6: Composición química de la Cenizas volantes de papel usado

DESCRIPCIÓN	Cenizas volantes de papel usado (%)	Cenizas seleccionadas de lodo de papel usado (%)	Ceniza de papel usado (%)
Óxido de calcio (cal) - CaO	48,86	62,39	60,59
Dióxido de silicio (sílice) - SiO ₂	12,58	23,25	2,17
Trióxido de aluminio - Al ₂ O ₃	12,55	5,26	5,653
Óxido de hierro - Fe ₂ O ₃	1,01	0,77	4,41
Óxido de magnesio - MgO	1,82	2,46	1,1
Óxido de sodio - Na ₂ O	0	0,42	10,57
Óxido de potasio - K ₂ O	0,36	0,35	2,75
Sulfato - SO ₃	0,97	0,58	0

Dióxido de titanio - TiO_2	1,25	0	0
Óxido de manganeso - MnO	0,03	0	0
Pentóxido de fósforo - P_2O_5	0	0	0
Cloro Cl	2,33	0	0
Pérdida por ignición (L.O.I)	18,24	4,52	12,757
Muestra total	100	100	100
Temperatura de calcinación ($^{\circ}\text{C}$)	600	850	650
Tiempo de calcinación (min)	30	0,0333	60
Tipo de papel	Residuos domésticos, comerciales e industriales	Lodo de papel residuo de fábrica de papel	Papel bond usado de escritorio
Bibliografía	(Putra, 2022)	(Byiringiro, 2014)	Elab. Propia

Fuente: Elaboración propia

La comparación entre la composición química de la ceniza de papel utilizada en esta investigación y la de estudios previos (Putra, 2022; Byiringiro, 2014) revela diferencias significativas que explican los resultados obtenidos.

1. Contenido de CaO (Óxido de Calcio)

El CaO es el principal componente en las tres cenizas analizadas, pero su efectividad como agente estabilizante depende de su capacidad de reaccionar con sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) para formar compuestos cementantes.

En los estudios previos, aunque el contenido de CaO fue alto (48,86 % y 62,39 %), este se acompañó de un mayor contenido de sílice y alúmina, lo que favoreció reacciones puzolánicas.

En esta investigación, el CaO alcanzó un 60,59 %, pero no se obtuvo el mismo efecto estabilizante debido al muy bajo contenido de SiO_2 (2,17 %) y Al_2O_3 (5,653 %), que en conjunto suman apenas 7,82 %, frente a más del 25 % en las investigaciones previas. Esto limitó la formación de productos cementantes y, por ende, la reducción de plasticidad.

2. Contenido de álcalis (Na_2O y K_2O)

La ceniza utilizada en esta investigación presentó un contenido de Na_2O (10,57 %) y K_2O (2,75 %) considerablemente alto (13,32 % en total).

Los álcalis son higroscópicos (absorbentes de humedad), lo que significa que atraen y retienen humedad, aumentando la plasticidad en lugar de reducirla.

En las investigaciones previas, estos compuestos no superaron el 1 %, por lo que su impacto negativo fue mínimo.

3. Pérdida por ignición (L.O.I) (12,757 %)

Este contenido inerte no reacciona con el CaO ni contribuye a la formación de compuestos cementantes.

Además, interfiere en la cohesión entre partículas de arcilla, actuando como un relleno que aumenta la cantidad de finos sin aportar propiedades estabilizantes.

4. Influencia de las características físicas y el origen del papel

La ceniza de esta investigación provino exclusivamente de papel bond usado de escritorio, limpio y sin aditivos químicos de blanqueo, lo que limitó su variedad de componentes reactivos.

En cambio, en los estudios previos se utilizaron residuos de papel doméstico, industrial o lodos de fábrica, que contenían aditivos y reactivos químicos para blanquear el papel, que aumentaron la reactividad de la ceniza.

El mayor tiempo de calcinación (60 min a 650 °C) en esta investigación, comparado con los otros estudios, no compensó la baja disponibilidad de sílice y alúmina.

4.3.2 Análisis de resultados de los IP en las investigaciones previas

En esta sección se comparan los resultados de esta investigación con los obtenidos por Putra (2022) y Byiringiro (2014), con el fin de identificar las causas por las que en sus estudios la adición de ceniza de papel logró reducir el índice de plasticidad (IP), mientras que en este trabajo el IP aumentó.

Se adjunta la tabla de resultados del suelo usado por Putra y el comportamiento que tuvo el IP al adicionar 5%, 10% y 15% de cenizas volantes de papel usado

Tabla 4.7: Reducción de la plasticidad de un suelo (CH)

Suelo	LL	LP	IP	CLASIFICACIÓN
Arcilla	86,00	39,01	46,99	CH

WPA	IP
0%	46,99
5%	35,67
10%	30,00
15%	28,70

Fuente: (Putra, 2022)

También se adjunta una tabla de resultados de los suelos usados por Byiringiro y que comportamiento obtuvo el IP al incrementar 8%, 20% y 24% de ceniza de lodo de papel.

Tabla 4.8: Reducción de la plasticidad de un suelo (ML), (CH) y (CL)

Arcilla 1	Ceniza (%)	LL	PL	PI	Clasificación
Antes del tratamiento (C1BT)	0	44	29	15	ML
Después del tratamiento (C1AT)	20	63	42	21	MH
Arcilla 2	Ceniza (%)	LL	PL	PI	Clasificación
Antes del tratamiento (C2BT)	0	61	30	31	CH
Después del tratamiento (C2AT)	24	51	39	12	MH
Arcilla 3	Ceniza (%)	LL	PL	PI	Clasificación
Antes del tratamiento (C3BT)	0	46	23	23	CL
Después del tratamiento (C3AT)	8	43	33	10	ML

Fuente:(Byiringiro, 2014)

La Tabla 4.5 presenta los resultados de Putra, quien trabajó con un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) con un límite líquido (LL) inicial de 86 %. La adición de cenizas volantes de papel en proporciones de 5 %, 10 % y 15 % produjo una reducción progresiva del IP, pasando de 46,99 a 28,70. Este comportamiento favorable puede atribuirse principalmente a dos factores:

1. **Calidad de la ceniza:** rica en compuestos cementantes (óxidos de calcio, sílice y alúmina) capaces de reaccionar con las arcillas para disminuir su plasticidad.
2. **Tipo de suelo:** la alta plasticidad inicial (LL elevado) ofrece mayor margen para lograr reducciones significativas del IP mediante estabilización química.

En contraste, la Tabla 4.6 muestra los resultados de Byiringiro con tres tipos de suelos: un limo (ML), una arcilla de baja plasticidad (CL) y una de alta plasticidad (CH). Sus resultados indican:

1. **Suelo 1 (ML):** al adicionar 20 % de ceniza, el IP aumentó de 15 a 21, volviéndose más plástico. Este resultado coincide con lo observado en esta investigación y sugiere que la composición química de la ceniza no siempre es efectiva, especialmente en suelos con baja plasticidad inicial.
2. **Suelo 2 (CH) y Suelo 3 (CL):** mostraron reducciones significativas del IP, atribuibles a una ceniza con alto contenido de calcio reactivo y posiblemente menor proporción de materiales inertes.

4.4 Discusión de la aplicabilidad en subrasantes

En la presente investigación se utilizaron muestras de arcillas de baja compresibilidad provenientes de subrasantes y algunos taludes del distrito 12 de la ciudad de Tarija, con el fin de contar con un muestreo más amplio y representativo del material presente en la zona. Sin embargo, la aplicabilidad real de los resultados se enfoca exclusivamente en las subrasantes, dado que estas constituyen la capa de apoyo de la estructura vial que puede ser tratada y mejorada antes de la colocación del pavimento, mientras que los taludes no son susceptibles de ser estabilizados y reinstalados en su posición original.

En ingeniería vial, la plasticidad de la subrasante es un parámetro crítico, ya que influye directamente en su capacidad de soporte y en la durabilidad del pavimento. Según la clasificación AASHTO M 145 y criterios comúnmente adoptados en normativas viales, para un comportamiento aceptable en climas húmedos el índice de plasticidad (IP) de la subrasante debería ser ≤ 12 , mientras que valores entre 12 y 20 se consideran aceptables únicamente en climas secos y con medidas de control de humedad. Valores superiores a 20 se asocian con alto riesgo de deformaciones y pérdida de soporte bajo condiciones de saturación.

En climas semiáridos como el de Tarija, el IP de la subrasante debería mantenerse preferentemente ≤ 15 para minimizar riesgos, aunque valores de 15 a 20 pueden aceptarse

con medidas de control de humedad (drenajes, capas granulares, compactación controlada y sellado superficial).

Tabla 4.9: Comparación del IP puro con el IP con ceniza

MUESTRA	IP PURO (%)	IP+5%CP (%)
SM 6	10	12
SM 4	11	15
GB 1	13	15
MF 5	17	19
AJ 5	20	24
SB 2	23	26
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+10%CP (%)
SM 6	10	15
SM 4	11	17
GB 1	13	18
MF 5	17	23
AJ 5	20	26
SB 2	23	27
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+15%CP (%)
SM 6	10	14
SM 4	11	16
GB 1	13	19
MF 5	17	24
AJ 5	20	26
SB 2	23	29
MUESTRA	IP PURO (%)	IP+20%CP (%)
SM 6	10	14
SM 4	11	16
GB 1	13	18
MF 5	17	23
AJ 5	20	25
SB 2	23	27

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se puede observar que se utilizó arcillas con IP mayores a 10% para ver si lograban reducir al adicionar ceniza de papel. No obstante, al incorporar ceniza de papel bond usado en proporciones del 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, se observó un incremento progresivo y lineal del IP en todas las muestras, superando en la mayoría de los casos los

umbrales normativos para subrasantes, a excepción de la muestra SM6 que no llegó al límite, pero igualmente incremento la plasticidad. Este incremento es técnicamente desfavorable, ya que implica un aumento en la susceptibilidad a la humedad, mayor deformabilidad y potencial pérdida de capacidad portante de la capa de fundación vial.

El comportamiento observado se atribuye a las características físico-químicas de la ceniza utilizada, y en consecuencia, la adición de ceniza de papel en su forma actual no mejora la plasticidad de las arcillas de baja compresibilidad para su uso en subrasantes, sino que incrementa este parámetro, comprometiendo su comportamiento estructural. Por tanto, su empleo como único estabilizante no es recomendable para proyectos viales que requieran subrasantes de alta calidad.

4.5 Análisis técnico-económico de la producción de ceniza de papel

El análisis económico de este trabajo se centró en determinar el costo de producción de la ceniza de papel bond usado en el contexto local de Tarija y contrastarlo con la información reportada en estudios realizados en otros países, donde este residuo ha sido considerado un aditivo de bajo costo.

Costos de obtención y procesamiento en Bolivia

- Adquisición de papel usado: **1,00 Bs/kg** (compra a recicladores).
- Recolección y transporte: **0,10 Bs/kg**. (10% del costo del papel según recicladores).
- Energía eléctrica: consumo aproximado de 2 kWh por kg de papel (mufla a 650 °C por 1 h), con un costo unitario de 0,58 Bs/kWh según SETAR, equivalente a **1,16 Bs/kg**.
- Rendimiento: 1 kg de papel produce aproximadamente 0,15621 kg de ceniza.

Tabla 4.10: Costo por kilogramo de ceniza producida

Descripción	Bs/kg papel	Bs/kg ($\div 0.15621$)
Papel usado	1,00	6,40
Recolección y transporte	0.10	0,64
Energía eléctrica (mufla 650 °C)	1,16	7,43
Total=		14,47

Fuente: Elaboración propia

El costo total por kilogramo de ceniza producida es de **14,47 Bs.**

En el contexto local, la ceniza de papel no se produce de manera masiva. Para este estudio, fue necesario recolectar papel bond usado, transportarlo y someterlo a un proceso de calcinación en mufla a 650 °C durante 60 minutos. El rendimiento obtenido fue de apenas 0,156 kg de ceniza por cada kilogramo de papel calcinado, lo que encarece su costo unitario. Considerando la adquisición del papel, el transporte y el consumo energético, se estimó un costo de producción de 14,47 Bs por kilogramo de ceniza. Este valor resulta significativamente más alto que el costo de estabilizantes tradicionales como la cal, cuyo precio equivale aproximadamente a **1,50 Bs/kg** (precio local), es decir, unas 13 veces más económica que la ceniza de papel.

En contraste, en países como Sudáfrica o Indonesia, la situación es diferente. Allí, la ceniza de papel es un subproducto de la industria papelera y se obtiene directamente de plantas incineradoras que generan grandes volúmenes de residuos. Según (Induambiente,2025), una planta papelera puede generar entre 800 y 900 toneladas mensuales de cenizas y lodos, con costos de disposición que varían entre 20 y 60 USD por tonelada, lo que equivale a entre **0,14 y 0,42 Bs/kg**. En esos contextos, la ceniza de papel no requiere procesos adicionales de calcinación ni recolección manual, lo que la convierte en un aditivo económico y fácilmente accesible para la estabilización de suelos.

La diferencia entre el caso boliviano y el internacional se debe principalmente a la escala de producción y a la existencia de infraestructura industrial. Mientras que en países industrializados la ceniza se obtiene como un desecho abundante, en Bolivia debe

producirse desde cero en condiciones de laboratorio, con altos costos asociados al consumo de energía y al bajo rendimiento.

Tabla 4.11: Comparación de precios

Descripción	Precio
CP en Bolivia	14,47 Bs/kg
Cal	1,5 Bs/kg
CP en Europa	0,14 a 0,42 Bs/kg

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, en el ámbito internacional la ceniza de papel puede considerarse un aditivo de bajo costo, gracias a la disponibilidad de grandes volúmenes en plantas industriales. Sin embargo, en el contexto local de Bolivia su producción resulta costosa y poco competitiva frente a estabilizantes convencionales como la cal, lo que limita su viabilidad económica como material alternativo para estabilización de suelos.

4.6 Interpretación final de los resultados

El análisis integral de los ensayos realizados demuestra que la adición de ceniza de papel a arcillas de baja compresibilidad no favorece la reducción del índice de plasticidad (IP), objetivo principal de esta investigación, sino que provoca un incremento progresivo de este parámetro con cada porcentaje añadido. El aumento del límite líquido (LL) fue notorio en todas las muestras, mientras que el límite plástico (LP) presentó variaciones mínimas, lo que explica que la diferencia entre ambos valores (y por ende el IP) se amplíe.

Este comportamiento se relaciona con la composición química de la ceniza utilizada, caracterizada por un alto contenido de óxido de calcio (CaO , 60,59 %), pero acompañada de bajas proporciones de sílice y alúmina reactivas, además de la presencia de óxidos solubles como el de sodio (Na_2O , 10,57 %) y el de potasio (K_2O , 2,75 %), así como un 12,76 % de la materia inerte. Estos componentes parecen favorecer la retención de humedad y no generan reacciones cementantes suficientes, lo que repercute negativamente en la plasticidad del suelo tratado.

Desde el punto de vista técnico-económico, si bien la ceniza de papel es un subproducto reciclado y de bajo costo de adquisición, su procesamiento presenta costos elevados en el

contexto local debido a su bajo rendimiento (0,156 kg de ceniza por cada kg de papel calcinado) y a los requerimientos energéticos de calcinación. Estos factores, sumados a la logística de recolección y manejo, encarecen significativamente su obtención en comparación con estabilizantes tradicionales como la cal. Sin embargo, en países con infraestructura industrial más desarrollada, como Sudáfrica o Indonesia, donde existen plantas de incineración de papel a gran escala, su producción puede ser más económica y competitiva. Considerando el incremento del IP observado en esta investigación y el costo de aplicación en las condiciones locales, su uso como aditivo estabilizante para subrasantes en infraestructura vial no resulta viable en el presente contexto.

En conclusión, los resultados obtenidos permiten rechazar la hipótesis planteada y destacan la importancia de realizar una caracterización previa de los aditivos, evaluando no solo su disponibilidad y costo, sino también su verdadera capacidad de modificar las propiedades geotécnicas del suelo de forma favorable.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Para poder identificar y seleccionar correctamente las arcillas de baja compresibilidad (clasificadas como CL según SUCS), se debe realizar la caracterización previa cumpliendo con los criterios de límites líquidos entre 20 % y 50 % y ensayos normalizados ASTM. En el caso de la ceniza de papel, obtenida de papel tipo bond, proveniente de residuos de oficina, se debe calcinar a 650 °C durante 60 minutos. Esta selección aseguró que los materiales empleados fueran representativos y adecuados para los fines del estudio.
- De las propiedades físicas y químicas de la ceniza de papel, con alto contenido CaO (60,59 %), pero con bajos niveles de SiO₂ (2,17 %) y Al₂O₃ (5,65 %), además de la presencia de óxidos solubles como Na₂O (10,57 %) y K₂O (2,75 %), junto con un 12,76 % de materia inerte, y elevada finura (69,94 % de partículas menores a 0,002 mm), resultaron determinantes en su interacción con el suelo, influyendo de manera no favorable en la reducción de la plasticidad.
- El análisis del comportamiento del índice de plasticidad (IP) mostró que, a diferencia de lo esperado, la adición de ceniza de papel en proporciones de 5 %, 10 %, 15 % y 20 % no redujo el IP de las arcillas, sino que provocó un incremento progresivo y lineal. Esto se asocia principalmente a la capacidad de la ceniza para retener humedad y a la ausencia de reacciones cementantes efectivas, derivadas de su composición química y la presencia de materia inerte, que interfirió en la cohesión de las partículas de arcilla.
- Del análisis del comportamiento del índice de plasticidad de arcillas de baja compresibilidad mezcladas con diferentes porcentajes de ceniza de papel se determinó que este aditivo, en las condiciones estudiadas, no mejora las propiedades plásticas del suelo para su uso en infraestructura vial. Por el contrario, su incorporación tiende a incrementar el IP, lo que puede resultar no adecuado para

su aplicación en subrasantes. Estos resultados evidencian la necesidad de explorar combinaciones de ceniza de papel con otros estabilizantes, como cal o cemento, para optimizar su desempeño en la estabilización de suelos arcillosos, si fuera el caso.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda no utilizar la ceniza de papel bond reciclado como estabilizante individual en suelos arcillosos de baja compresibilidad, ya que aumenta el índice de plasticidad.
- Es aconsejable realizar nuevos ensayos combinando la ceniza de papel con otros agentes estabilizantes, como cal o cemento, que podrían generar un efecto bueno en las propiedades físicas del suelo.
- Realizar pruebas variando la temperatura y el tiempo de calcinación de la ceniza de papel, con el objetivo de mejorar las propiedades químicas que favorezcan reacciones puzolánicas y cementantes.
- Al realizar límites de plasticidad se debe tener una balanza cerca para pesar las muestras rápidamente y procurar hacerlo en un ambiente cerrado, ya que son muy sensibles al ambiente y pueden absorber o perder humedad lo que puede afectar en los cálculos.
- Es importante aplicar pruebas de resistencia mecánica adicionales (como CBR o ensayos triaxiales) a las mezclas suelo-ceniza para evaluar no solo su plasticidad sino también su comportamiento estructural ante cargas.