

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

A partir de la construcción de estructuras civiles se tiene la necesidad de determinar las características de los suelos, con la finalidad de establecer sus propiedades y comportamientos, con este propósito fueron desarrollados los sistemas de clasificación, que logran expresar de manera concisa las características generales del suelo, basados en la distribución del tamaño de la partícula y la plasticidad.

A inicios del siglo XX el científico sueco Albert M. Atterberg (1846-1916), trabajaba en la industria de cerámica donde logra desarrollar pruebas sencillas para describir la plasticidad de una arcilla, importante propiedad para el modelado, evitar la contracción y agrietamiento cuando se hornea. De esta manera en 1914 estableció una forma de clasificar los suelos mediante pruebas para obtener los límites líquido y plástico; por ejemplo, las arcillas como suelos plásticos, las margas no plásticas (con cierta cohesión) y las arenas son suelos no cohesivos.

En 1932 el ingeniero Arthur Casagrande propuso la utilización de un dispositivo (Copa de Casagrande) para obtener el límite líquido, caracterizando el suelo y como puede variar su comportamiento en función de la cantidad de agua.

Desde entonces se busca promover diferentes métodos para determinar la plasticidad en suelos finos, uno de ellos es el penetrómetro de caída. En 1949 se realizó el primer ensayo normalizado con el denominado "cono ruso" desarrollado por Vassilev. Este método es muy utilizado en Europa y Asia, actualmente existen diferentes tipos de penetrómetro de caída como: británico, ruso, canadiense, indio, etc; los mismos se diferencian por el peso, ángulo del cono y la profundidad de penetración.

La investigación propone una comparación de los límites de plasticidad; a través de la copa de Casagrande y el método de la mano o rollitos que para fines analíticos es denominado método convencional (MC) y el método penetrómetro de caída (británico)

(MPC), el cual permite establecer las diferencias, beneficios, ventajas, desventajas y eficiencia.

## **1.2. Situación problemática**

Las arcillas en combinación con el agua pasan gradualmente del estado sólido al semisólido, seguido del estado plástico y finalmente al estado líquido, el contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro.

A lo largo de los años el cálculo del porcentaje de los límites de plasticidad en nuestro entorno está establecido por la norma ASTM D 4318 denominado método convencional, por lo que es necesario la implementación de nuevos métodos para obtener una mayor eficiencia y mejor opción de uso.

El penetrómetro de caída británico está definido por la norma BS 1377:1990 para el límite líquido, a diferencia que con el límite plástico su estimación fue desarrollada basándose en los trabajos de Wood & Wroth (1978), donde sugieren un cono con 240 g, 3 veces más pesado que el cono del límite líquido británico, pero con la misma geometría y profundidad de penetración.

A pesar que el método penetrómetro de caída es una nueva alternativa en nuestro medio, el funcionamiento y el manejo del equipo es casi nulo, es necesario realizar muchos ensayos en diferentes tipos de suelos plásticos, para verificar si los resultados son coherentes así integrar la metodología en futuras investigaciones y por lo tanto validar su uso en nuestro medio.

Tarija es una ciudad donde predominan los suelos arcillosos por lo tanto antes de realizar cualquier construcción de una obra civil, es necesario el estudio de la plasticidad.

La investigación indica la variación que existe entre los dos métodos, ventajas, desventajas y beneficios.

### **1.2.1. Problema**

¿Cómo la comparación de los valores del límite líquido y límite plástico obtenidos por el método convencional y método penetrómetro de caída en arcillas de baja plasticidad, podrán mostrar la eficiencia y ventajas entre el uno y el otro?

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

En Bolivia la plasticidad de suelos finos se determina a través del método convencional (MC), mediante la copa de Casagrande y el método de la mano o rollitos, el cual está establecido por la Norma ASTM D 4318, por lo que es importante y necesario contar con diferentes equipos o metodologías para determinar el límite líquido y el límite plástico, con el fin de obtener una variación de métodos y reflejar mejor el comportamiento de la plasticidad en los resultados, de tal manera obtener una mejor eficiencia.

Esta investigación implementa el penetrómetro de caída británico para determinar el límite líquido establecido por la norma BS 1377:1990 y el penetrómetro de caída de Wood & Wroth (1978) con el fin de determinar el límite plástico en arcillas de baja plasticidad (CL), nuestro medio cuenta con los equipos necesarios para realizar los diferentes ensayos por lo que es factible realizar la comparación.

### **1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema**

#### **Delimitación temporal**

El tiempo de los datos tienen un valor indefinido debido a que no cambian las propiedades del suelo.

#### **Delimitación espacial**

El proceso de investigación se centra en realizar ensayos con muestras de arcillas que tienen baja plasticidad (CL), los mismos se encuentran en los barrios suburbanos de la ciudad de Tarija.

### **1.3. Justificación**

Los países europeos y asiáticos se rigen por la norma BS 1377:1990 para la obtención de los límites de plasticidad, el cual incluye el penetrómetro de caída en los ensayos, debido a que el equipo es relativamente nuevo en nuestro entorno y no existen investigaciones con el uso del mismo, nace la necesidad de realizar la comparación.

La implementación del penetrómetro de caída durante la realización de las pruebas en laboratorio permite al investigador relacionarse con el equipo; desde el funcionamiento hasta su uso.

Borja Fanny (2007), realizó un análisis comparativo usando el cono inglés y la copa de Casagrande para determinar el límite líquido de suelos finos. Los resultados de Límite Líquido con el método del Cono Inglés difieren de un 6 a un 10% aproximadamente más que con el método de la Copa de Casagrande.

Por lo que al realizar esta investigación se establece un nuevo rango de diferencia de acuerdo a los resultados obtenidos, aplicando ambas metodologías en la plasticidad de arcillas.

La comparación logra cuantificar la variación que existe entre el método convencional y el método penetrómetro de caída, a su vez se establecieron las ventajas, desventajas y eficiencia, obteniendo los resultados mediante ensayos en laboratorio los mismos se rigen bajo normas y teorías propias de la ingeniería civil, los cuales serán tomados en cuenta en futuras investigaciones.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Comparar los valores del límite líquido y el límite plástico obtenidos a través del método convencional (MC) y el método penetrómetro de caída (MPC); realizando ensayos con arcillas de baja plasticidad (CL), para determinar la variación entre ambos métodos.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar arcillas con baja plasticidad de la zona de estudio.
- Determinar la plasticidad a través de los métodos de análisis.
- Clasificar las arcillas.
- Establecer la confiabilidad de los datos obtenidos.
- Analizar los resultados obtenidos.

#### **1.5. Hipótesis**

Si, al comparar los valores del límite líquido y límite plástico que se obtienen mediante el método convencional y el método penetrómetro de caída, realizando ensayos en arcillas de baja plasticidad, que variación tendrán ambos métodos.

## 1.6. Operacionalización de las variables

### 1.6.1. Variable independiente

Variable independiente: Tipo de metodología

Tabla 1. 1 Variable independiente

Variable	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Tipo de metodología	Existen diferentes métodos para determinar la plasticidad en arcillas.	Método convencional	Porcentaje [%]	Límite líquido y límite plástico.
		Método penetómetro de caída	Porcentaje [%]	Límite líquido y límite plástico.

Fuente: Elaboración propia.

### 1.6.2. Variable dependiente

Variable dependiente: Plasticidad

Tabla 1. 2 Variable dependiente

Variable	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Plasticidad	Es el estado del suelo que se altera cuando se incrementa su contenido de humedad.	Límite Líquido	Porcentaje [%]	Mediante el uso de la Copa de Casagrande y Penetrómetro de caída.
		Límite Plástico	Porcentaje [%]	Mediante el método de la mano o rollitos y Penetrómetro de caída.

Fuente: Elaboración propia.

## 1.7. Identificación del tipo de Investigación

La investigación es experimental y descriptiva, un método de estudio que busca determinar la variación que existe entre dos métodos, el investigador solo se limita a observar y no interviene en las variables.

## **1.8. Unidades de estudio y decisión muestral**

### **1.8.1. Unidad de estudio**

La unidad de estudio es la plasticidad que depende del tipo de suelo y el tipo de método.

LL (%) = Porcentaje de límite líquido.

LP (%) = Porcentaje de límite plástico.

### **1.8.2. Población**

La plasticidad es una propiedad de suelos finos presentes en limos y arcillas. La población se concentra en todas las arcillas que existen en la ciudad de Tarija.

### **1.8.3. Muestra**

La investigación se basa solamente en arcillas de baja plasticidad (CL).

### **1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo**

Se utiliza el muestreo probabilístico en categoría de muestreo estratificado intencional, debido a que las muestras de suelo fueron extraídos de diferentes sitios, los puntos de muestreo se encuentran en los barrios suburbanos de la ciudad de Tarija y se localizaron explorando sitios con antecedentes de contener arcillas de baja plasticidad (CL).

## **1.9. Métodos y técnicas empleadas**

### **1.9.1. Métodos**

La investigación es un método empírico, de modo que los ensayos requeridos se realizaron en el laboratorio de suelos, con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos.

### **1.9.2. Técnicas**

La recolección de los datos se realiza por medio de la observación directa, en el cual se contempla los diferentes procesos de ensayos, para luego recolectar información y registrar para su previo análisis.

## **1.1. Procesamiento de la información**

Los datos fueron registrados en planillas, los formularios empleados en laboratorio son específicos para cada tipo de ensayo, los cuales fueron sometidos a trabajos en gabinete

con el fin de obtener los resultados necesarios para generar la comparación con el fin de concluir con los objetivos propuestos.

## **1.2. Alcance de la investigación**

La investigación determina una comparación de los valores del límite líquido y límite plástico que se obtienen a través del método convencional (MC) dispuesto por la norma ASTM D 4318, penetrómetro de caída (MPC) establecido por la norma BS 1377:1990 para el límite líquido y una investigación de Wood & Wroth (1978) para el límite plástico.

Se realizaron ensayos de: contenido de humedad natural, granulometría y límites de plasticidad (LL, LP) en 30 muestras de arcillas clasificados como baja plasticidad (CL), los cuales fueron extraídos de diferentes puntos los cuales se encuentran en los barrios suburbanos de Tarija. Con los resultados obtenidos del límite líquido y límite plástico se realizó una comparación estableciendo un rango de variación entre metodologías.



**CAPÍTULO II**  
**CONSIDERACIONES**  
**GENERALES DE LA**  
**PLASTICIDAD**

## CAPÍTULO II

### CONSIDERACIONES GENERALES DE LA PLASTICIDAD

#### 2.1. Suelos

La palabra “suelos” puede definirse como “todo el material orgánico e inorgánico que cubre la costra rocosa de la tierra. Todos los suelos son, prácticamente, producto de la desintegración de las rocas que forman dicha costra. Esta desintegración o “intemperismo”, ha sido realizada por las fuerzas químicas y mecánicas que han actuado sobre las formaciones de roca madre durante innumerables periodos. (Wright, 1993).

Independientemente de su origen, los tamaños de partículas que conforman el suelo pueden variar en un amplio intervalo. Los suelos son generalmente llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del suelo. (Das, 2013).

Tabla 2. 1 Límites de separación de tamaño de suelo

Nombre de la organización	Tamaño de grano			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U. Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (p. ej., limos y arcillas) < 0.075	

Fuente: Das, 2013.

La tabla 2.1, muestra los límites de separación de tamaño de suelo desarrollados por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, el Departamento de Agricultura de E.U., la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U. y la Oficina de Reclamación de E.U. En esta tabla se presenta sólo a modo de ejemplo, ya que juega un papel importante en la historia del desarrollo de los límites de separación de tamaño de suelo. En la actualidad el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado y ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. (Das, 2013).

## **2.2. Arcillas**

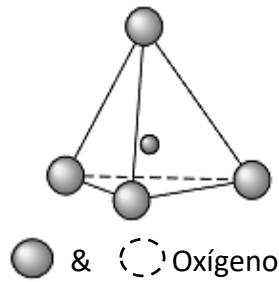
Las arcillas son en su mayoría partículas en forma de láminas microscópicas y submicroscópicas de mica, minerales de arcilla y otros minerales. Como se muestra en la tabla 2.1, las arcillas se definen generalmente como partículas menores de 0.002 mm. En algunos casos las partículas de tamaño entre 0.002 y 0.005 mm. Las partículas se clasifican como arcilla sobre la base de su tamaño, ya que no pueden contener necesariamente minerales de arcilla. (Das, 2013).

Se distinguen por la presencia de granos muy finos, compuestas principalmente de partículas coloides, tienen considerable resistencia cuando están secas, sufren cambios extremos en volumen cuando cambia el contenido de humedad y son prácticamente impermeables al flujo de agua. Las arcillas limosas o los limos arcillosos se conocen con el nombre de arcillas magras, en tanto las arcillas pueden distinguirse además por el hecho de su resistencia se reduce bruscamente aun cuando en su estado natural posean una muy alta y en algunos casos, desaparece por completo cuando se desacomoda su estructura natural, es decir, cuando los granos se vuelven a distribuir. (Wright, 1993).

### **2.2.1. Composición mineralógica de las arcillas**

Los minerales de arcilla son silicatos de aluminio complejos compuestos de una de las dos unidades básicas: (1) sílice tetraédrico y (2) aluminio octaédrico. Cada unidad del tetraedro consiste de cuatro átomos de oxígeno que rodean un átomo de silicio (Figura 2.1). (Das, 2013).

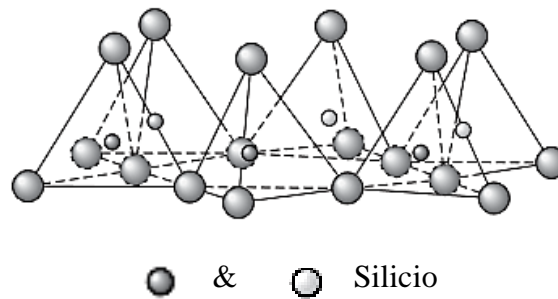
Figura 2. 1 Unidad del tetraedro



Fuente: Das, 2013.

La combinación de unidades tetraédricas de sílice da una lámina de sílice (Figura 2.2).

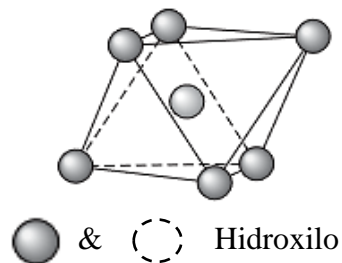
Figura 2. 2 Unidades tetraédricas



Fuente: Das, 2013.

Tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros en la vecindad. Las unidades octaédricas consisten en seis hidroxilos rodeando un átomo de aluminio, (Figura 2.3)

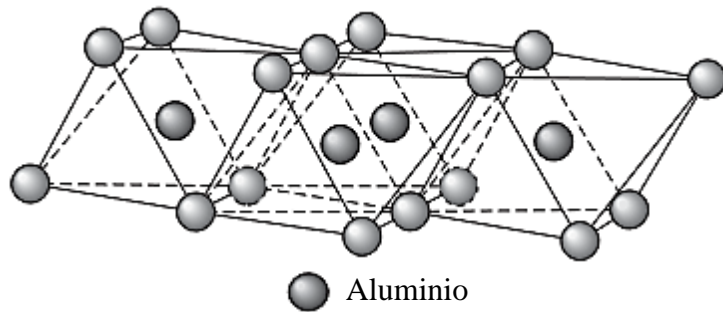
Figura 2. 3 Unidades octaédricas



Fuente: Das, 2013.

y la combinación de las unidades hidroxilo de aluminio octaédricas da una capa octaédrica (Figura 2.4).

Figura 2. 4 Lámina de gibsita

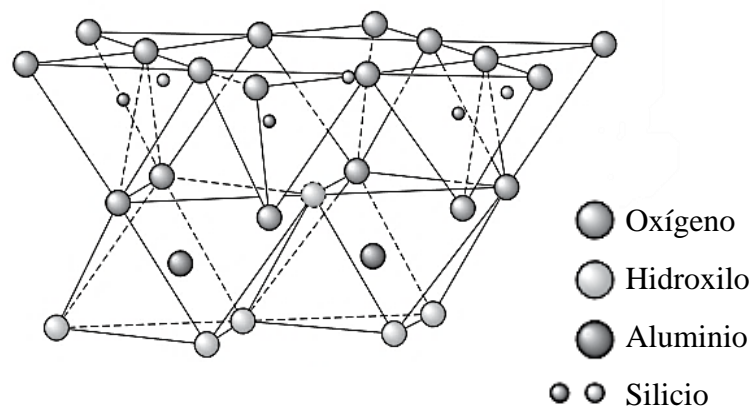


Fuente: Das, 2013.

A veces el magnesio sustituye a los átomos de aluminio en las unidades octaédricas, en cuyo caso la capa octaédrica se llama lámina de brucita. (Das, 2013).

En una lámina de sílice, cada átomo de silicio con una valencia positiva de 4 está ligado a cuatro átomos de oxígeno, con una valencia negativa total de 8. Sin embargo, cada átomo de oxígeno en la base del tetraedro está vinculado a dos átomos de silicio. Esto significa que el átomo de oxígeno en la parte superior de cada unidad tetraédrica tiene una valencia negativa de 1 para ser contrarrestado. (Das, 2013).

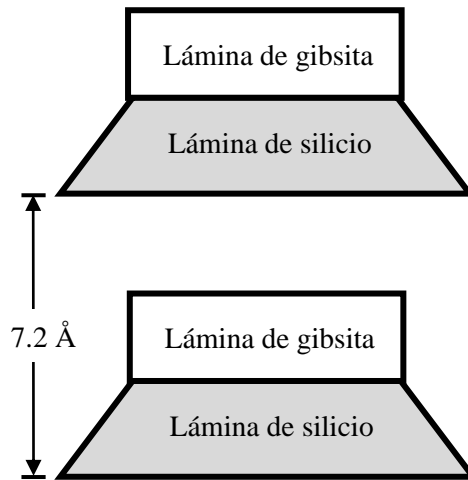
Figura 2. 5 Lámina de sílice sobre lámina octaédrica



Fuente: Das, 2013.

La caolinita consiste de capas repetidas de láminas de sílice-gibsita elementales, como se muestra en la figura 2.6. Cada capa es de aproximadamente 7.2 Å de espesor. Las capas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno. La caolinita se produce como plaquetas, cada una con una dimensión lateral de 1000 a 20 000 Å y un espesor de 100 a 1000 Å. El área de la superficie de las partículas de caolinita por unidad de masa es de aproximadamente 15 m<sup>2</sup>/g. El área de superficie por unidad de masa se define como superficie específica. (Das, 2013).

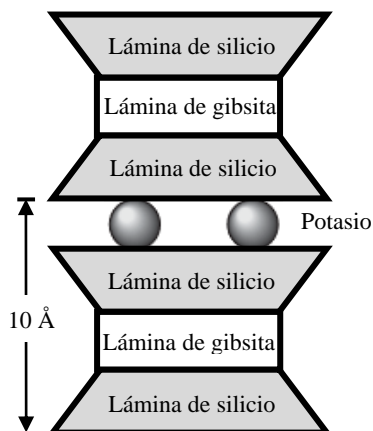
Figura 2. 6 Capas de la caolinita



Fuente: Das, 2013.

La illita consiste de una lámina de gibsita unida a dos láminas de sílice, una en la parte superior y otra en la parte inferior (Figura 2.7). A veces se llama arcilla micácea. Las capas de illita están unidas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para equilibrar los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por alguno de silicio en las láminas tetraédricas. La sustitución de un elemento por otro sin ningún cambio en la forma cristalina se conoce como sustitución isomorfa. Las partículas de illita tienen generalmente dimensiones laterales que van de 1000 a 5000 Å, y espesores de 50 a 500 Å. La superficie específica de las partículas es de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/g. (Das, 2013).

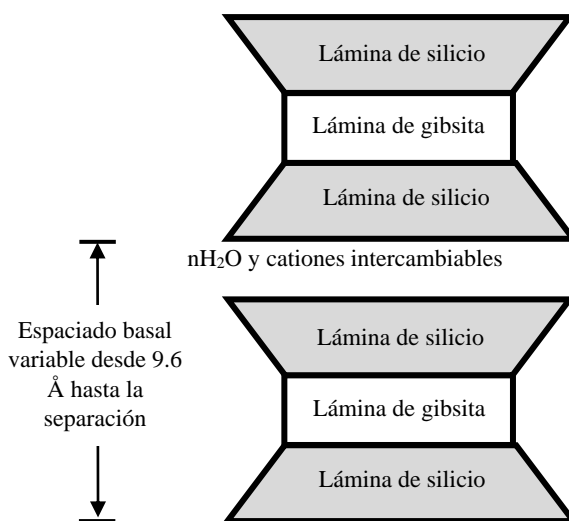
Figura 2. 7 Capas de la ilita



Fuente: Das, 2013.

La montmorillonita tiene una estructura similar a la de la ilita, es decir, una lámina de gibsita intercalada entre dos láminas de sílice (Figura 2.8). En la montmorillonita existe sustitución isomorfa de magnesio y hierro para el aluminio en las láminas octaédricas. Aquí no están presentes los iones de potasio, como en el caso de la ilita, y una gran cantidad de agua es atraída al espacio entre las capas. Las partículas de montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 50 Å. La superficie específica es de aproximadamente 800 m<sup>2</sup>/g. (Das, 2013).

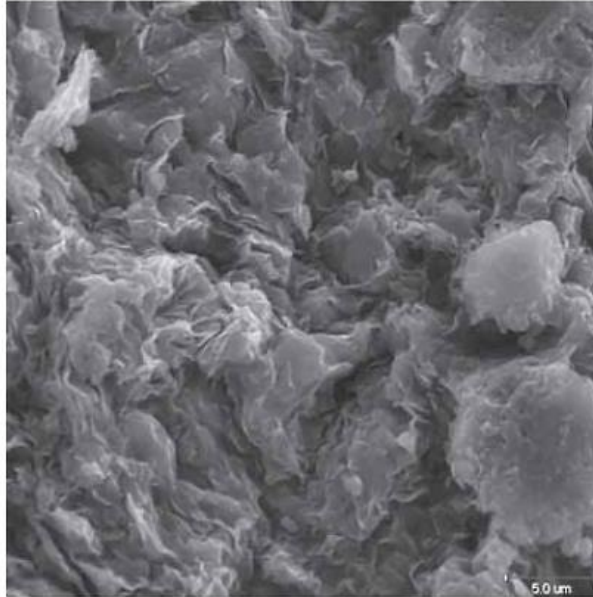
Figura 2. 8 Capas de la montmorillonita



Fuente: Das, 2013.

La figura 2.9 es una micrografía electrónica de barrido que muestra el tejido de la montmorillonita.

Figura 2. 9 Micrografía electrónica del tejido de la montmorillonita



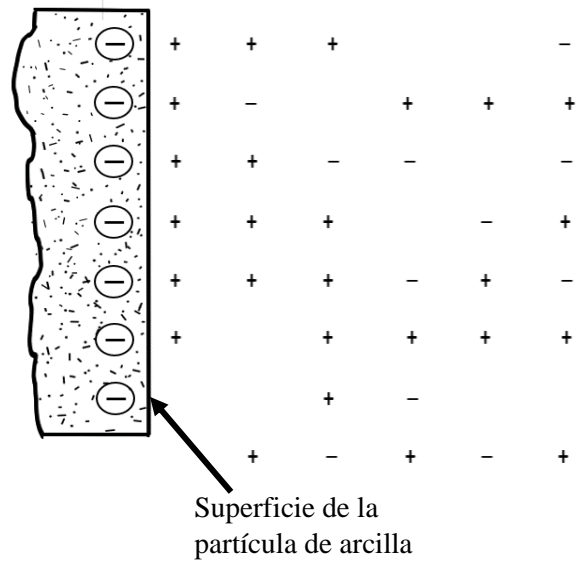
Fuente: Das, 2013.

Además de la caolinita, illita y montmorillgibbsiteonita, otros minerales comunes de la arcilla que se encuentran generalmente son clorita, haloisita, vermiculita y atapulgita. Las partículas de arcilla tienen una carga neta negativa en sus superficies. Éste es el resultado de la sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes. Grandes cargas negativas se derivan de superficies específicas mayores. También se producen algunos sitios cargados positivamente en los bordes de las partículas. (Das, 2013).

En arcilla seca la carga negativa se compensa con cationes intercambiables, como  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , rodeando las partículas sostenidas por la atracción electrostática. Cuando se añade agua a la arcilla, estos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. Esto se conoce como doble capa difusa (figura 2.10). (Das, 2013).



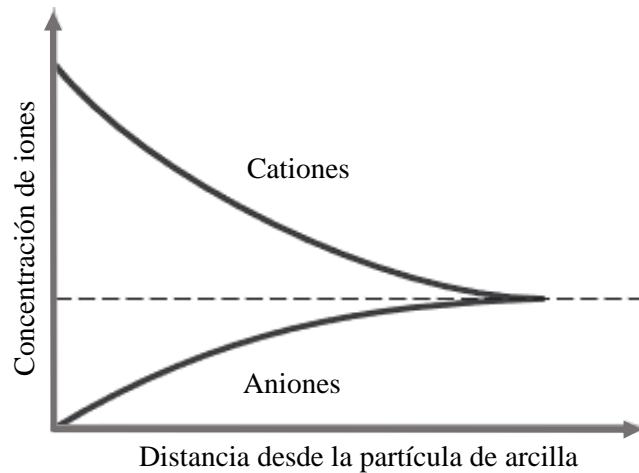
Figura 2. 10 Capa doble difusa



Fuente: Das, 2013.

La concentración de cationes disminuye con la distancia desde la superficie de la partícula (figura 2.11).

Figura 2. 11 Agua atraída por la superficie de las partículas de arcilla



Fuente: Das, 2013.

Las moléculas de agua son polares. Los átomos de hidrógeno no están dispuestos de una manera simétrica alrededor de un átomo de oxígeno, sino que se producen en un ángulo

de enlace de  $105^\circ$ . Como resultado de ello, una molécula de agua actúa como una pequeña varilla con una carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, esto se conoce como un dipolo. El agua dipolar es atraída por la superficie cargada negativamente de las partículas de arcilla y por los cationes en la capa doble. Los cationes, a su vez, son atraídos hacia las partículas del suelo. (Das, 2013).

Un tercer mecanismo por el cual el agua es atraída por las partículas de arcilla es el enlace de hidrógeno, en el que los átomos de hidrógeno en las moléculas de agua son compartidos con los átomos de oxígeno en la superficie de la arcilla. Algunos cationes de los poros parcialmente hidratados en el agua también son atraídos a la superficie de las partículas de arcilla. Estos cationes atraen moléculas de agua dipolares. La fuerza de atracción entre el agua y la arcilla disminuye con la distancia desde la superficie de las partículas. Toda el agua que se unió a las partículas de arcilla por la fuerza de atracción se conoce como agua de capa doble. A la capa más interna del agua de capa doble, que está unida con mucha fuerza por la arcilla, se le conoce como agua adsorbida. Esta agua es más viscosa que el agua común. La orientación de agua alrededor de las partículas de arcilla da a los suelos arcillosos sus propiedades plásticas. (Das, 2013).

### **2.3. Distribución granulométrica del suelo**

El cribado se usa para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente a la malla N° 200 (0.075 mm). La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes, hasta la malla N° 200; los retenidos en cada malla se pesan y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño; el complemento a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por la malla en cuestión. Así puede tenerse un punto de la curva acumulativa correspondiendo a cada abertura. El método se dificulta cuando estas aberturas son pequeñas y por ejemplo, el cribado a través de las mallas N° 100 (0.150 mm) y N° 200 (0.075 mm) suele requerir agua para ayudar el paso de la muestra (procedimiento de lavado). (Juárez Badillo, 2005)

### 2.3.1. Análisis granulométrico mediante mallas

El análisis de tamiz consiste en agitar la muestra de suelo a través de un conjunto de tamices que tienen aberturas más pequeñas progresivamente. Los números estándar de tamiz y los tamaños de las aberturas se dan en la tabla 2.2. (Das, 2013).

Tabla 2. 2 Tamaños estándar de tamices

Tamiz N°	Abertura (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.000
16	1.180
20	0.850
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075
270	0.053

Fuente: Das, 2013.

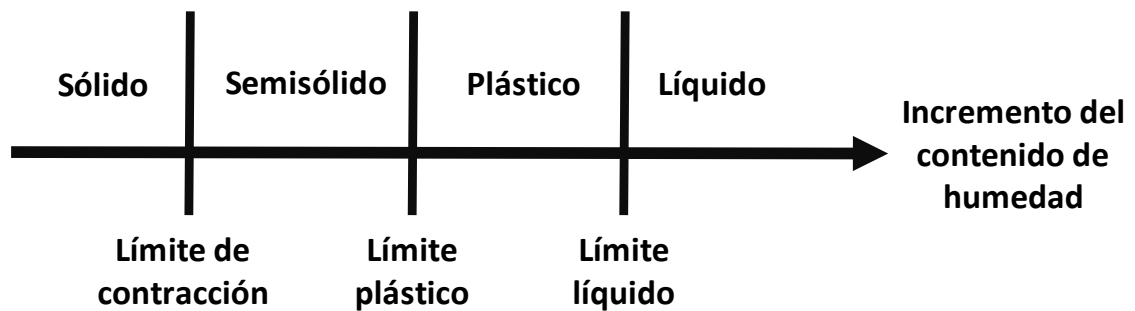
### 2.4. Plasticidad y consistencia del suelo

Albert Atterberg definió como plasticidad la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. A su vez observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, también observó que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad. (Das, 2013).

Cuando los minerales arcillosos están presentes en un suelo de grano fino, el suelo puede remodelarse en presencia de algo de humedad sin desmoronarse. Esta naturaleza cohesiva

es causada por el agua adsorbida que rodea las partículas de arcilla. A principios del siglo XX, un científico sueco llamado Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de suelos de grano fino con contenidos de humedad variables. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, de manera arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, el comportamiento del suelo se puede dividir en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido. (Das, 2013).

Figura 2. 12 Límites de Atterberg



Fuente: Das, 2013.

El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al plástico es el límite plástico y del estado plástico al líquido es el límite líquido. Estos parámetros también se conocen como límites de Atterberg. (Das, 2013).

#### 2.4.1. Límite líquido (LL)

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. De acuerdo con esta definición los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia, muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida según Atterberg es de  $25\text{g/cm}^2$ . La cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo Villalaz, 1976).

La resistencia de diferentes suelos arcillosos en el límite líquido no es constante, si no que puede variar ampliamente. (Juárez Badillo, 2005).

#### **2.4.2. Límite plástico (LP)**

El límite plástico se define como el contenido de humedad, expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico, generalmente se hace uso de la materia que, mezclado con agua, ha sobrado de la prueba del límite líquido y al cual se le evapora humedad por mezclado hasta tener una mezcla plástica que sea fácilmente moldeable. (Crespo Villalaz, 1976).

En las arcillas muy plásticas, la tenacidad en el límite plástico es alta, debiéndose aplicar con las manos considerable presión para formar rollitos; por el contrario, las arcillas de baja plasticidad son poco tenaces en el límite plástico. (Juárez Badillo, 2005).

#### **2.4.3. Índice de plasticidad (IP)**

La diferencia entre los valores del límite líquido (LL) y del límite plástico (LP) da el llamado índice plástico (IP) del suelo. Los límites líquido y plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo, pero el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla. (Crespo Villalaz, 1976).

#### **2.5. Clasificación de los suelos de grano fino (SUCS)**

Este sistema es ampliamente utilizado por los ingenieros (Norma ASTM D 2487). El Sistema Unificado de Clasificación se presenta en la tabla 2.3 y clasifica los suelos en dos grandes categorías:

- Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% que pasa a través del tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S. G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso. (Das, 2013).
- Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. (Das, 2013).

Tabla 2. 3 Sistema unificado de clasificación del suelo

	Criterio para la asignación de símbolos de grupo			Símbolos de grupo
<b>Suelos de grano grueso</b> Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	<b>Gravas</b>	Gravas limpias	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3^c$	GW
	Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4.	Menos de 5% finos <sup>a</sup>	$Cu < 4$ y/o $1 > Cc > 3^c$	GP
		Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 2.13)	GM
		Más de 12% finos <sup>a,d</sup>	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 2.13)	GC
	<b>Arenas</b>	Arenas limpias	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3^c$	SW
	50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Menos de 5% finos <sup>b</sup>	$Cu < 6$ y/o $1 > Cc > 3^c$	SP
<b>Suelos de grano fino</b> 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	<b>Limos y arcillas</b>	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 2.13) <sup>e</sup>	CL
	Límite líquido menor de 50	Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 2.13) <sup>e</sup>	ML
			$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$ ; vea la figura 2.13; zona OL	OL
	<b>Limos y arcillas</b>	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 2.13)	CH
	Límite líquido 50 o más	Orgánico	Gráficos PI por debajo de línea "A" (figura 2.13)	MH
			$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$ ; vea la figura 2.13; zona OH	OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt

<sup>a</sup>Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

<sup>b</sup>Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

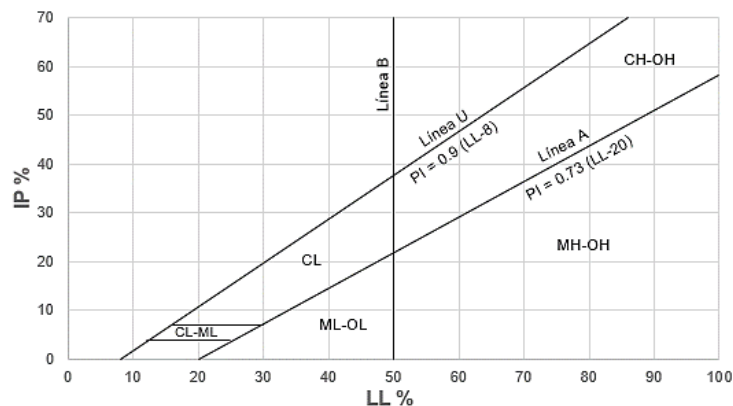
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

<sup>d</sup>Si  $4 \leq PI \leq 7$  y gráficos en la zona rayada en la figura 2.13, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

<sup>e</sup>Si  $4 \leq PI \leq 7$  y gráficos en la zona rayada en la figura 2.13, se usa doble símbolo CL-ML.

Fuente: Das, 2013.

Figura 2. 13 Carta de plasticidad SUCS



Fuente: Das, 2013.

## **Línea A**

Esta línea divide los suelos en dos grupos:

- Arcillas que están ubicadas en la parte superior de la línea A.
- Limos y suelos orgánicos que están ubicadas en la parte inferior de la línea A.

## **Línea B**

Esta línea divide los suelos en dos grupos:

- A la izquierda de la línea están los suelos de baja plasticidad (L).
- A la derecha de la línea están los suelos alta plasticidad (H).

## **Línea U**

Es el límite de las arcillas, ya que estas no se ubican por encima de la línea.

Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

- W: bien clasificado
- P: mal clasificado
- L: baja plasticidad (límite líquido menor de 50).
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor de 50). (Das, 2013).

## **2.6. Ensayos para determinar la plasticidad**

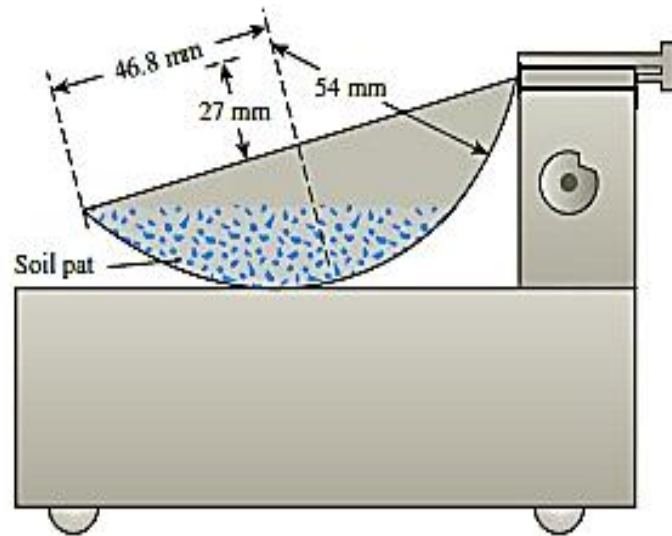
Para determinar la plasticidad en arcillas se utiliza los siguientes métodos:

### **2.6.1. Método convencional**

#### **a) Copa de Casagrande (LL)**

El método de percusión fue desarrollado por Casagrande (1932) y utilizado a lo largo el mundo. Este es el único método adoptado por ASTM (Designación de prueba D 4318) para determinar el límite líquido. Este dispositivo consta de una copa de latón y una base de goma dura. La copa de latón se puede dejar caer sobre la base mediante una leva por una manivela. Para realizar la prueba de límite líquido, se debe colocar una pasta de suelo en la copa como se observa en la figura 2.14. (Das, 2013).

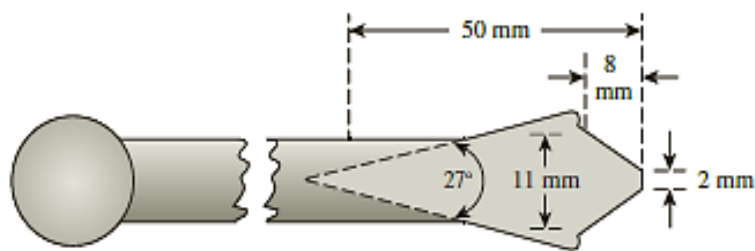
Figura 2. 14 Copa de Casagrande



Fuente: Das, 2013.

Luego se corta una ranura en el centro de la superficie del suelo con la herramienta de ranurado estándar. (Figura 2.15).

Figura 2. 15 Ranurador

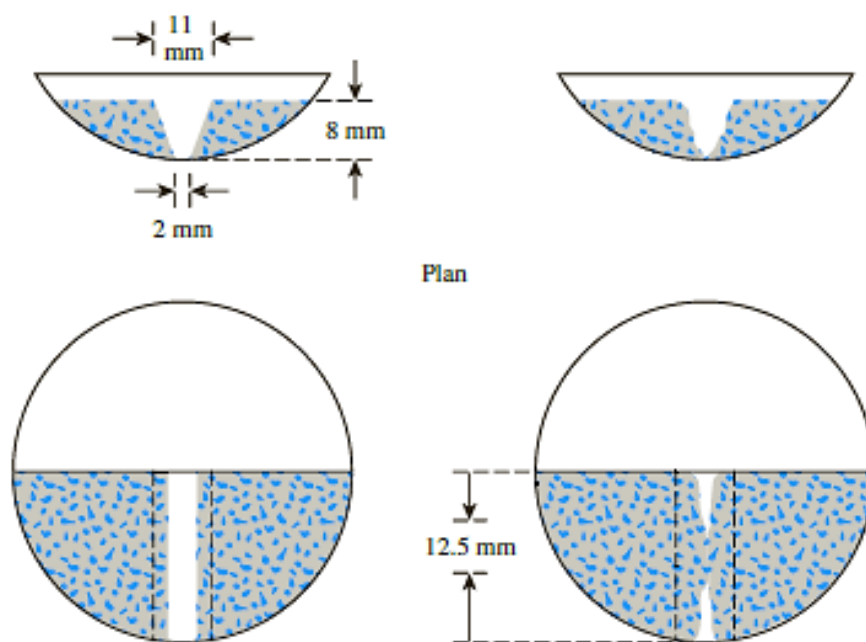


Fuente: Das, 2013.

Por el uso de la leva accionada por manivela, la copa se levanta y se deja caer desde una altura de 10 mm (0.394 pulg.). El contenido de humedad, en porcentaje, requerido para cerrar una distancia de 12.7 mm (0.5 pulg.) a lo largo de la parte inferior de la ranura (Figura 2.16) después de 25 golpes es conocido como el límite líquido. (Das, 2013).



Figura 2. 16 Ranura en el centro de la superficie



Fuente: Das, 2013.

Las pruebas para el mismo suelo se llevan a cabo con diferentes contenidos de humedad, con el número de golpes  $N$ , requeridos para lograr el cierre que varían entre 15 y 35. El contenido de humedad del suelo, en porcentaje, y el número correspondiente de golpes se trazan en papel cuadrículado semilogarítmico. La relación entre el contenido de humedad y el  $\log N$  se aproximan como una línea recta. Esta línea se refiere como la curva de flujo. El contenido de humedad correspondiente a  $N=25$ , determinado a partir de la curva de flujo, da el límite líquido del suelo. (Das, 2013).

#### b) Método de la mano o rollitos (LP)

El límite plástico se define como el contenido de humedad en porcentaje, en el que el suelo se desmorona, cuando se enrolla en hilos de 3.2 mm de diámetro. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba del límite plástico es simple y se realiza por laminación repetida de una masa de suelo de tamaño elipsoidal a mano sobre una placa de vidrio (Figura 2.17). El procedimiento para la prueba del límite plástico está dado por ASTM en Designación de prueba D 4318. (Das, 2013).

Figura 2. 17 Masa de suelo en placa de vidrio esmerilado



Fuente: Das, 2013.

### **2.6.2. Método penetrómetro de caída**

Durante el periodo de investigación, la Norma Boliviana de estudios Geotécnicos propone implementar el método penetrómetro de caída denominado penetrómetro de cono para la determinación del límite líquido BS 1377 (UNE) el mismo se encuentra en el capítulo II Ensayos de caracterización, Artículo 28 página 25.

Este método se utiliza en la determinación de:

#### **a) Penetrómetro de caída (LL)**

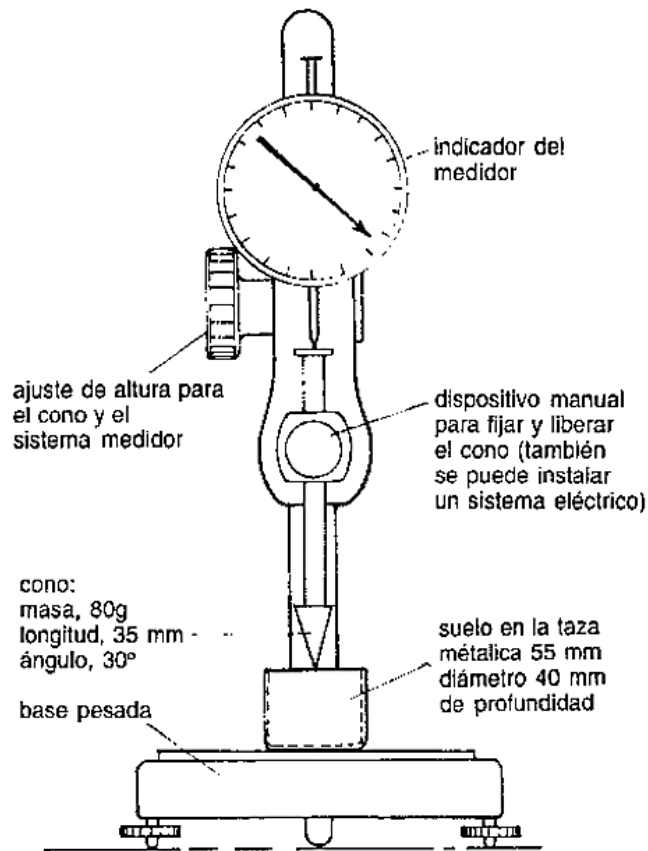
En esta prueba se determina el límite líquido como el contenido de humedad en el que un cono estándar de ángulo de vértice de  $30^\circ$  y peso de 0.78 N (80 g) penetrará una distancia de 20 mm en 5 segundos, cuando se le permite caer desde una posición de contacto puntual con la superficie del suelo, la figura 2.18 muestra la fotografía de un aparato de cono de caída. (Das, 2018).

Debido a la susceptibilidad para lograr el límite líquido de una sola prueba, se pueden realizar cuatro o más pruebas variando el contenido de humedad para determinar la penetración del cono de caída. Un gráfico donde se traza el contenido de humedad versus

la penetración del cono (mm) la trama da como resultado una línea recta. El contenido de humedad correspondiente a la penetración de 20 mm es el límite líquido. (Das, 2018).

El procedimiento del ensayo se rige a la norma británica BS 1377:1990 del Anexo 2.

Figura 2. 18 Penetrómetro de caída



Fuente: Whitlow, 1994.

### b) Penetrómetro de caída (LP)

En el caso de la determinación del límite líquido, se utiliza un cono modificado de geometría similar, con un peso de 2.35 N (240 g). Tres o cuatro pruebas con diferentes contenidos de humedad de suelo y se determinan las correspondientes penetraciones de cono. (Das, 2018).

El contenido de humedad correspondiente a una penetración de cono 20 mm es el límite plástico. (Wroth and Wood, 1978).

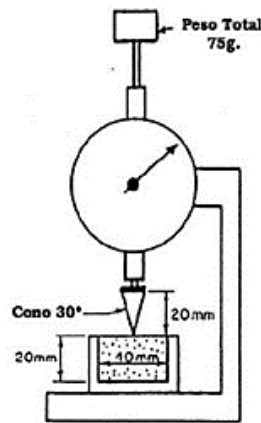
## 2.7. Tipos de penetrómetro de caída

Desde la implementación de este método el equipo pasa por diferentes etapas de acuerdo al paso del tiempo, la actualización y tecnología.

### a) Penetrómetro de caída con cronómetro manual

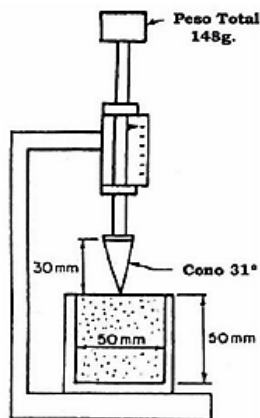
Estos equipos no tienen un dispositivo de bloqueo y desbloqueo automático, tienen una precisión de 0.1 mm. Estos tienen un mecanismo tipo reloj o una regla que mide la penetración del cono y el conteo del tiempo de penetración se lo realiza con un cronómetro manual. (BS 1377:1990).

Figura 2. 19 Cono de Georgia



Fuente: Rabat Blázquez, 2016.

Figura 2. 20 Cono hindú (Indian Central Road Research Institute)



Fuente: Rabat Blázquez, 2016.

### **b) Penetrómetro de caída semiautomático**

El penetrómetro semiautomático se completa con un controlador automático, que libera automáticamente el émbolo mediante un dispositivo magnético, con ajuste vertical de micrómetro y temporizador electrónico ajustable del tiempo de caída. El penetrómetro está equipado con un temporizador digital, que puede ajustarse al tiempo estándar de caída libre de 5 segundos o a algún otro ajuste para pruebas personalizadas. Cuando se activa, el temporizador permite que la aguja caiga libremente en la muestra durante el intervalo de tiempo específico y luego bloqueará el avance de la aguja mientras proporciona una lectura directa de los resultados de la prueba. El penetrómetro tiene una base de hierro fundido con tornillos niveladores, un medidor digital de medición de penetración de precisión de 0.01 mm, botón de liberación y puesta a cero automática. (<https://www.cotecno.cl/penetrómetro-de-cono/>).

Figura 2. 21 Penetrómetro de caída digital semiautomático



Fuente: <https://www.cotecno.cl/penetrómetro-de-cono/>.

### **c) Penetrómetro de caída digital**

El penetrómetro de caída en la última actualización del equipo tiene una lectura digital de los valores de penetración, que se realiza en mm y pulgadas, con resolución de 0.01 mm, pantalla LCD de 5 dígitos, con ajuste a cero en cualquier posición. (<https://proetisa.com/penetrómetro-de-cono-digital/>).

Figura 2. 22 Penetrómetro de caída digital



Fuente: <https://www.cotecno.cl/penetrómetro-de-cono/>.

## 2.8. Tipos de cono

Existen diferentes tipos de cono para la determinación del límite líquido los mismos se pueden observar en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4 Resumen de las diferencias entre los conos (Budhu, 1985)

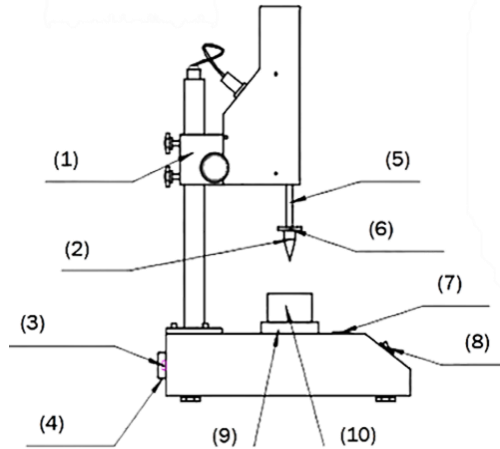
País	Detalles del cono	Penetración para límite líquido (mm)
Rusia	Ángulo del cono = 30° Masa del cono = 76 g	10
Gran Bretaña, Francia	Ángulo del cono = 30° Masa del cono = 80 g	20
India	Ángulo del cono = 31° Masa del cono = 148 g	20.4
Suecia, Canadá (Québec)	Ángulo del cono = 60° Masa del cono = 60 g	10

Fuente: Das, 2018.

## 2.9. Caracterización del equipo

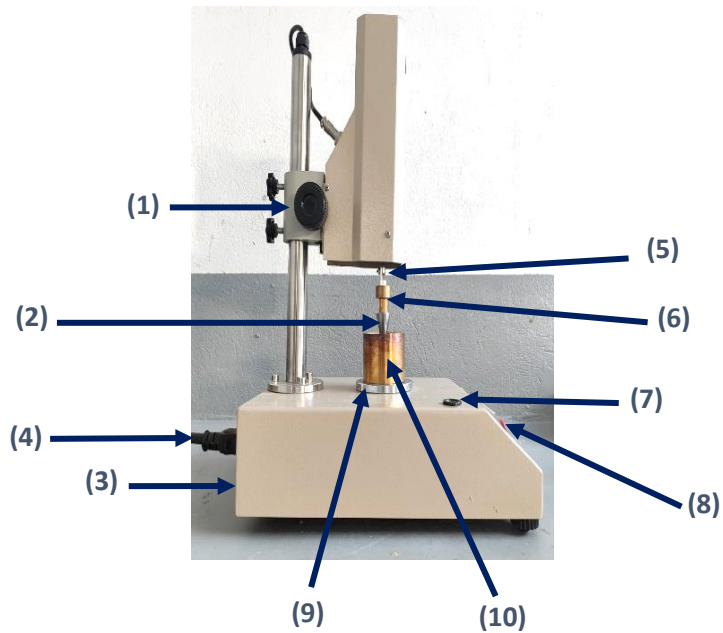
En esta investigación se utiliza un penetrómetro de caída británico, digitalizado de 0.01 mm de precisión, de la marca OBRK el cual tiene las siguientes partes:

Figura 2. 23 Esquema y partes del penetrómetro de caída



Fuente: FICHA TÉCNICA Límite plástico líquido digital.

Figura 2. 24 Penetrómetro de caída (INGEOSUD)



Fuente: Elaboración propia.

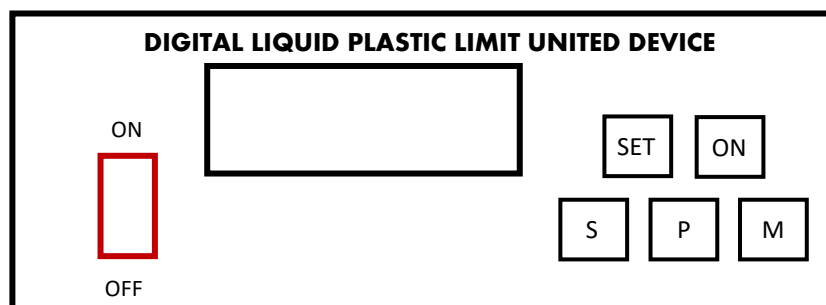
Tabla 2. 5 Nombre de las partes del equipo

(1) Marca de elevación	(6) Contrapeso
(2) Cono	(7) Burbuja de nivel
(3) Interfaz de impresora	(8) Interruptor de encendido
(4) Puerto de alimentación	(9) Placa base
(5) Varilla cónica	(10) Copa de muestra

Fuente: FICHA TÉCNICA Límite plástico líquido digital.

- **Manual de uso**

Figura 2. 25 Esquema de la pantalla del equipo



Fuente: MANUAL Límite plástico líquido digital.

Figura 2. 26 Pantalla del equipo (INGEOSUD)



Fuente: Elaboración propia.



**ON:** presione para iniciar la prueba.

**SET:** esta tecla se usa para establecer el tiempo de prueba y cambiar la función del contacto entre el cono y la superficie de la muestra de suelo.

Presione esta tecla, la pantalla LCD mostrará " $\pm 5.0$ ", lo que indica que el tiempo de prueba establecido es de 5 segundos.

Presione S. Mostrar " $\pm 15.0$ " significa que el tiempo establecido es de 15 segundos.

Presione el botón continuamente para cambiar el tiempo establecido entre 5 segundos, 15 segundos, 30 segundos y 60 segundos.

"ON" significa que la función de bloqueo del cono está activada. En este momento, la caída del cono requiere presionar el botón ON. En este estado, puede evitar que el cono caiga accidentalmente y dañe la punta del cono.

"OFF" significa que la función de bloqueo del cono está desactivada.

Presione la tecla "ON", cuando la punta del cono toque la superficie de la muestra, la prueba se iniciará automáticamente y el cono caerá automáticamente.

**M:** presione esta tecla, el electroimán que bloquea la barra cónica se tira hacia adentro y la barra cónica ya no está bloqueado. Suelte la llave y la barra del cono se bloqueará.

**S:** Después de completar una prueba, presione esta tecla para guardar los datos en la memoria del instrumento. después de tres tiempos de almacenamiento, la pantalla LCD mostrará el promedio de las tres pruebas.

**P:** Después de completar la prueba, presione esta tecla para imprimir los resultados de la prueba. (MANUAL Límite plástico líquido digital).

**a) Características de los conos**

El penetrómetro de caída para el límite líquido es de acero inoxidable, con un ángulo de ápice de  $30^\circ$  y masa de 80 g. (Das, 2013).

Figura 2. 27 Cono del penetrómetro de caída para el LL



Fuente: Elaboración propia.

El penetrómetro de caída para el límite plástico es de acero inoxidable, con un ángulo de ápice de  $30^\circ$  y masa de 240 g. (Das, 2013).

Figura 2. 28 Cono del penetrómetro de caída para el LP



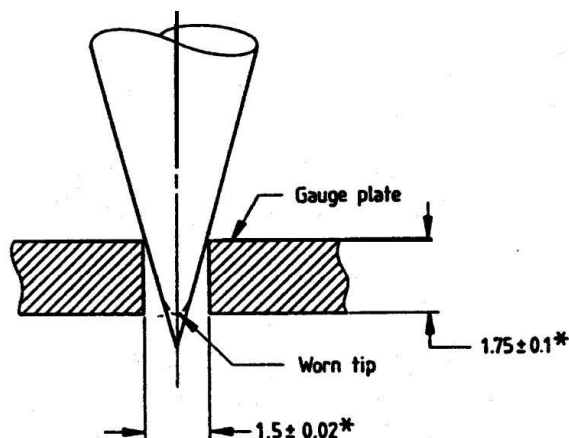
Fuente: Elaboración propia.

## b) Calibración del equipo

Debido a que el equipo es automático no es necesario realizar una calibración, pero se debe tener las siguientes verificaciones:

1. Antes de realizar un ensayo se debe verificar que el cono este correctamente ensamblado al equipo.
2. Se debe verificar que el peso del cono coincida con el especificado por la norma BS 1377:1990.
3. Se sustituirá el cono si, después de uso continuo la punta ya no se siente cuando se cepilla ligeramente con la punta del dedo cuando la punta del cono esté empujado a través de un agujero de  $1.5 \pm 0.02$  mm de diámetro, perforado a través de una placa metálica de  $1.75 \pm 0.1$  mm de espesor. (BS 1377:1990).

Figura 2. 29 Verificación de la punta del cono



Fuente: Norma británica BS 1377:1990.

Con excepción si el equipo haya sido reparado, desmantelado, ajustado o reacondicionado, deberá recalibrarse antes de su uso posterior, también cuando se sospeche un cambio en la precisión del instrumento o en las verificaciones previos al ensayo, deberá ser calibrado por personal preparado y autorizado. Según la norma británica BS 1377:1990 los dispositivos eléctricos se calibrarán al menos una vez al año. (BS 1377:1990).

## **I. Marco referencial**

Paola M. Llerena (2022) realizó un Análisis para la obtención de límite líquido y plástico según la norma ASTM D 4318 en comparación con la norma BS 1377:1990 en suelos de diferente plasticidad, el cual tiene como objeto realizar una correlación entre los métodos empleados para la determinación de Límites Atterberg. Los ensayos experimentales en diferentes muestras, fueron tratadas estadísticamente, permitiendo el análisis de diferentes parámetros estadísticos y parámetros de validación. Se pudo conocer las diferentes alternativas y equipos que son utilizados actualmente para la determinación de LL y LP, evidenciando que el uso del penetrómetro cónico para el cálculo del LL resulta ser factible mediante este método.

María C. Duarte y Herman D. Rojas (2017) investigaron la Obtención del límite líquido y límite plástico usando el penetrómetro de cono de caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo bentonítico; se realizó una comparación entre los datos obtenidos. El método del penetrómetro arrojó resultados muy cercanos a los teóricos. Los resultados del LP por método del doble peso no son cercanos a los teóricos, por lo que es recomendable utilizar métodos tradicionales. Los resultados obtenidos de LP por el método de Feng fueron poco razonables. Es importante mencionar que existen las normas ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils y BS 1377 Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, para determinar el límite líquido de los suelos empleando el penetrómetro de cono, pero para la obtención del límite plástico no existe una norma que regule su utilización, por tanto, se usaron dos métodos empleados en la literatura mundial y así se pudo despejar las dudas sobre el manejo y obtención de dicho límite.

Jesús A. Guardado; Enver Montes, Kevin Zaldaña (2020) estudiaron la determinación de la correlación entre los métodos de Casagrande y cono de penetración en la obtención del límite líquido de suelos de baja y alta compresibilidad mediante ensayos de laboratorio, obteniendo que las muestras correspondientes a Limos de Baja Compresibilidad (ML), se observa que los resultados obtenidos de Límite Líquido varían entre los Métodos de Casagrande y Cono de Penetración en promedio un 4%, teniendo una máxima diferencia de 11% y una menor diferencia correspondiente a 1% Además, un 90% de las muestras

poseen una diferencia de valor de Límite Líquido en el rango 0-10%. Se concluye que, de un total de 31 muestras obtenidas, el 75% de ellas refirieron un alto índice de Plasticidad.

## **II. Marco normativo**

- El método convencional está establecido por la Norma ASTM D 4318.
- El método penetrómetro de caída se rige por la norma BS 1377:1990 para LL.
- Granulometría ASTM D 6913.
- Contenido de humedad ASTM D 2216.
- Clasificación de suelos ASTM D 2487.

# **CAPÍTULO III**

## **DISEÑO EXPERIMENTAL**

**CAPÍTULO III**  
**DISEÑO EXPERIMENTAL**

**3.1. Muestreo**

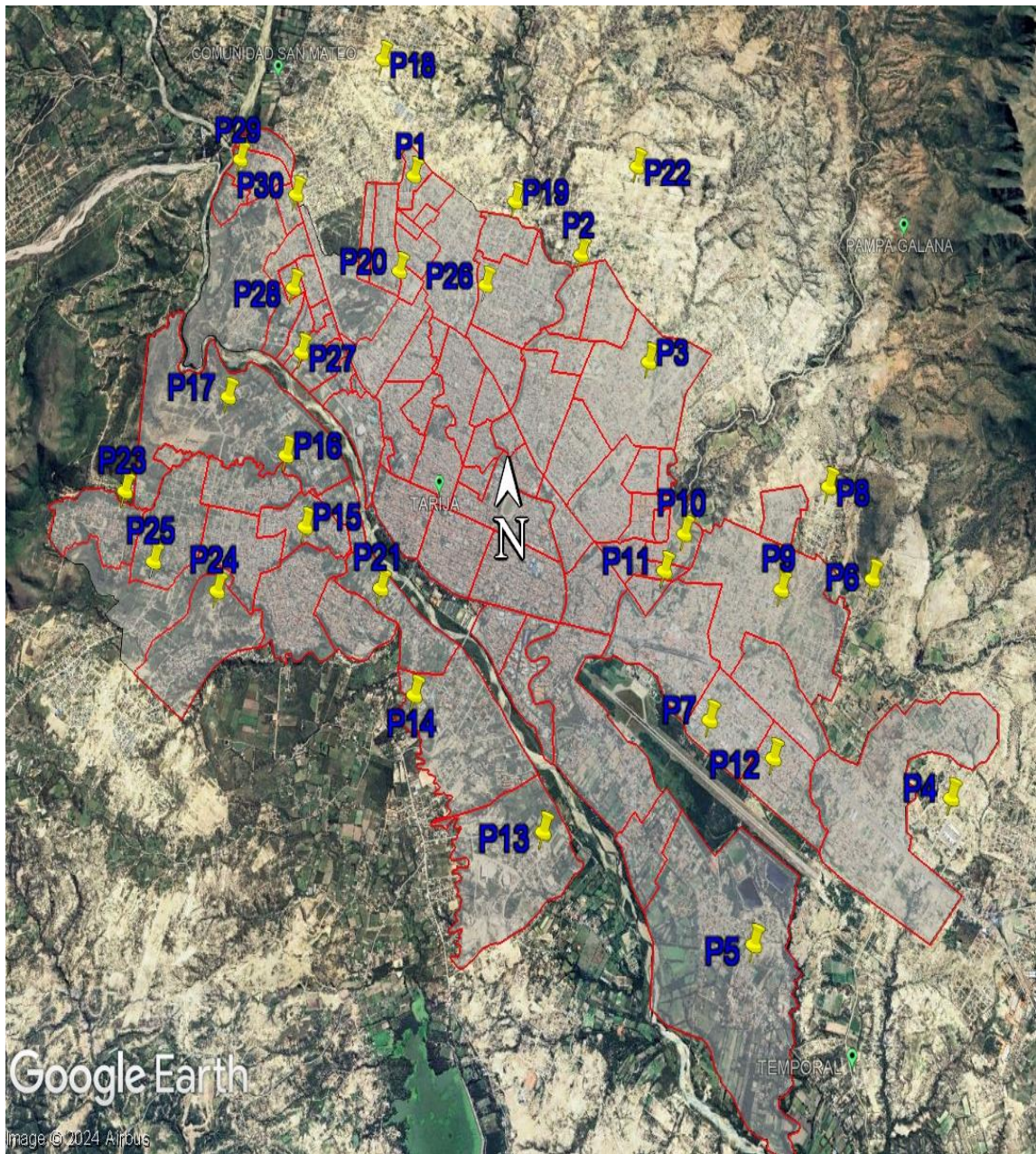
Se realizó la extracción de 30 muestras de arcilla que son de baja plasticidad (CL), los mismos se encuentran en diferentes puntos de los barrios de la ciudad de Tarija Cercado.

Tabla 3. 1 Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto	Barrio	Coordenadas	
		Latitud "S"	Longitud "W"
1	Oscar Zamora	21°30'12.69"	64°44'16.67"
2	2 de Mayo	21°30'39.90"	64°43'2.46"
3	El Constructor	21°31'15.60"	64°42'32.40"
4	Torrecillas	21°33'30.44"	64°40'28.15"
5	San Luis	21°34'12.22"	64°41'47.44"
6	8 de Marzo	21°32'24.72"	64°40'58.44"
7	San Jorge I	21°33'7.43"	64°42'5.34"
8	Nuevo Amanecer	21°31'55.85"	64°41'16.14"
9	Morros Blancos	21°32'28.03"	64°41'36.17"
10	Juan Nicolai	21°32'10.71"	64°42'16.47"
11	15 de Abril	21°32'22.19"	64°42'24.54"
12	San Jorge II	21°33'18.74"	64°41'39.61"
13	San Blass	21°33'40.23"	64°43'11.68"
14	Miraflores	21°32'59.97"	64°44'5.74"
15	Méndez Arcos	21°32'8.38"	64°44'54.56"
16	San Antonio	21°31'45.79"	64°45'4.44"
17	Aranjuez	21°31'26.87"	64°45'30.67"
18	La Cañada	21°29'31.6"	64°44'33.09"
19	24 de Junio	21°30'21.63"	64°43'31.86"
20	Los Chapacos	21°30'45.28"	64°44'20.77"
21	German Bush	21°32'27.55"	64°44'21.71"
22	Los Laureles	21°30'9.59"	64°42'38.9"
23	Alto Senac	21°31'57.14"	64°46'11.00"
24	Catedral	21°32'28.35"	64°45'29.25"
25	Tabladita II	21°32'19.27"	64°45'56.53"
26	Lourdes	21°30'50.08"	64°43'43.20"
27	15 de Noviembre	21°31'12.35"	64°45'0.81"
28	15 de Agosto	21°30'50.94"	64°45'6.13"
29	Los Olivos	21°30'6.97"	64°45'33.20"
30	Carlos Wagner	21°30'19.18"	64°45'7.69"

Fuente Elaboración propia.

Figura 3. 1 Ubicación de los puntos de muestreo



Fuente: Elaboración propia.

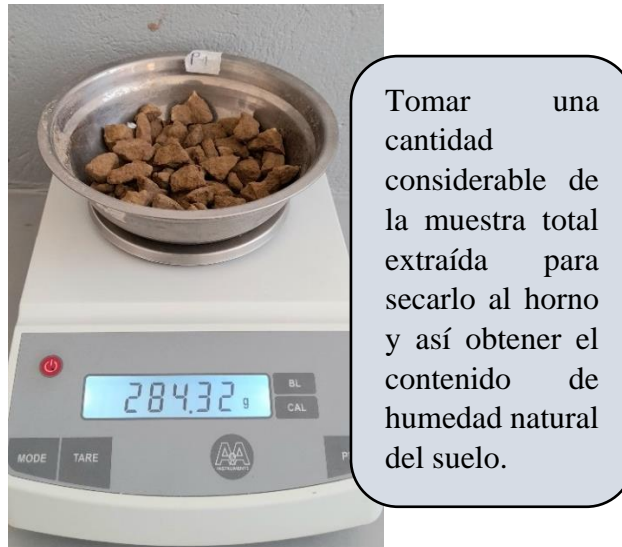


### 3.2. Caracterización de la arcilla

Para caracterizar las arcillas se realizan los siguientes ensayos:

#### 3.2.1. Contenido de humedad natural

Figura 3. 2 Peso de la muestra natural



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 3 Peso del suelo seco



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 2 Valores del contenido de humedad natural

Barrio	Muestra	Contenido de humedad natural
		W%
Oscar Zamora	OZ1	14.61
	OZ2	15.06
	OZ3	14.89
2 de Mayo	2M 1	12.67
	2M 2	13.88
	2M 3	13.27
El Constructor	EC 1	10.02
	EC 2	11.14
	EC 3	9.40
Torrecillas	T 1	12.31
	T 2	13.03
	T 3	11.89
San Luis	SL 1	13.40
	SL 2	12.21
	SL 3	12.83
8 de Marzo	8M 1	15.10
	8M 2	14.72
	8M 3	15.49
San Jorge I	SJI 1	10.38
	SJI 2	9.50
	SJI 3	10.99
Nuevo Amanecer	NA 1	14.36
	NA 2	13.43
	NA 3	14.72
Morros Blancos	MB 1	10.25
	MB 2	11.02
	MB 3	9.76
Juan Nicolai	JN 1	12.97
	JN 2	13.35
	JN 3	12.55
15 de Abril	15A 1	12.96
	15A 2	11.87
	15A 3	13.54
San Jorge II	SJII 1	12.36
	SJII 2	11.41
	SJII 3	13.02
San Blass	SB 1	11.11
	SB 2	11.49
	SB 3	11.84
Miraflores	M 1	9.48
	M 2	9.96
	M 3	8.65
Méndez Arcos	MA 1	10.43
	MA 2	9.58
	MA 3	9.91

San Antonio	SA 1	12.93
	SA 2	12.34
	SA 3	13.38
Aranjuez	A 1	11.00
	A 2	11.91
	A 3	10.53
La Cañada	LC 1	11.89
	LC 2	12.37
	LC 3	11.34
24 de Junio	24J 1	10.78
	24J 2	11.41
	24J 3	10.46
Los Chapacos	LCH 1	10.85
	LCH 2	10.40
	LCH 3	11.56
German Bush	GB 1	11.12
	GB 2	11.84
	GB 3	10.52
Los Laureles	LL 1	14.03
	LL 2	14.48
	LL 3	13.50
Alto Senac	AS 1	13.30
	AS 2	12.32
	AS 3	12.84
Catedral	C 1	13.72
	C 2	14.23
	C 3	14.84
Tabladita II	TII 1	11.41
	TII 2	10.79
	TII 3	12.11
Lourdes	L 1	13.05
	L 2	12.59
	L 3	13.46
15 de Noviembre	15N 1	10.97
	15N 2	10.61
	15N 3	11.41
15 de Agosto	15AG 1	11.81
	15AG 2	11.20
	15AG 3	12.48
Los Olivos	LO 1	14.51
	LO 2	14.39
	LO 3	14.87
Carlos Wagner	CW 1	11.49
	CW 2	11.16
	CW 3	10.86

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Granulometría

Figura 3. 4 Peso de la muestra seca en horno



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 5 Muestra para ser lavado



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 6 Lavado de la muestra en el tamiz N° 200



La muestra es lavada en el tamiz N° 200 hasta que el agua que pase a través de ella sea cristalina.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 7 Muestra lavada en horno



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 8 Muestra secada al horno



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 9 Tamizado de la muestra lavada



Luego de que las muestras son secadas en el horno, se debe tamizar y anotar el peso retenido en cada malla.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 3 Valores de la granulometría

Barrio	Muestra	Porcentaje que pasa del tamiz			
		Nº4	Nº10	Nº40	Nº200
Oscar Zamora	OZ1	100.00	99.48	98.71	95.28
	OZ2	100.00	99.42	98.62	95.23
	OZ3	100.00	99.53	98.77	95.35
2 de Mayo	2M 1	100.00	99.97	99.85	93.49
	2M 2	100.00	99.92	99.81	93.37
	2M 3	100.00	99.99	99.76	93.42
El Constructor	EC 1	100.00	100.00	99.07	82.57
	EC 2	100.00	100.00	99.00	82.61
	EC 3	100.00	100.00	99.12	82.52
Torrecillas	T 1	100.00	100.00	99.94	87.45
	T 2	100.00	100.00	99.97	87.36
	T 3	100.00	99.98	99.86	87.31
San Luis	SL 1	100.00	100.00	99.88	93.82
	SL 2	100.00	100.00	99.81	93.78
	SL 3	100.00	100.00	99.92	93.93
8 de Marzo	8M 1	100.00	99.90	98.78	80.20
	8M 2	100.00	99.96	98.82	80.19
	8M 3	100.00	99.87	98.68	80.11
San Jorge I	SJI 1	100.00	100.00	99.93	92.57
	SJI 2	100.00	100.00	99.87	92.44
	SJI 3	100.00	100.00	99.96	92.48
Nuevo Amanecer	NA 1	100.00	99.35	98.92	75.56
	NA 2	100.00	99.41	99.01	75.70
	NA 3	100.00	99.29	98.84	75.45
Morros Blancos	MB 1	100.00	100.00	100.00	98.64
	MB 2	100.00	100.00	99.99	98.58
	MB 3	100.00	100.00	100.00	98.69
Juan Nicolai	JN 1	100.00	100.00	99.94	93.98
	JN 2	100.00	99.98	99.88	93.87
	JN 3	100.00	100.00	99.98	94.07
15 de Abril	15A 1	100.00	99.71	98.54	93.20
	15A 2	100.00	99.65	98.66	93.28
	15A 3	100.00	99.60	98.51	93.34
San Jorge II	SJII 1	100.00	100.00	99.93	99.37
	SJII 2	100.00	99.98	99.80	99.29
	SJII 3	100.00	100.00	99.87	99.24
San Blass	SB 1	100.00	100.00	99.91	97.21
	SB 2	100.00	100.00	99.80	97.20
	SB 3	100.00	100.00	99.87	97.09
Miraflores	M 1	100.00	100.00	99.10	77.98
	M 2	100.00	100.00	99.22	78.02
	M 3	100.00	100.00	99.16	78.13
Méndez Arcos	MA 1	100.00	100.00	98.86	97.13
	MA 2	100.00	100.00	98.98	97.13
	MA 3	100.00	100.00	98.93	97.14

San Antonio	SA 1	100.00	99.06	95.78	77.97
	SA 2	100.00	99.19	95.97	78.05
	SA 3	100.00	99.13	95.80	77.81
Aranjuez	A 1	100.00	100.00	99.18	98.31
	A 2	100.00	100.00	99.00	98.25
	A 3	100.00	100.00	99.10	98.27
La Cañada	LC 1	100.00	100.00	98.02	95.78
	LC 2	100.00	100.00	97.96	95.83
	LC 3	100.00	100.00	98.10	95.73
24 de Junio	24J 1	100.00	100.00	99.65	95.00
	24J 2	100.00	100.00	99.74	95.02
	24J 3	100.00	100.00	99.77	94.97
Los Chapacos	LCH 1	100.00	100.00	99.90	95.42
	LCH 2	100.00	100.00	99.95	95.41
	LCH 3	100.00	100.00	99.84	95.45
German Bush	GB 1	100.00	100.00	99.86	93.56
	GB 2	100.00	99.99	99.79	93.60
	GB 3	100.00	99.99	99.90	93.54
Los Laureles	LL 1	100.00	100.00	99.92	99.29
	LL 2	100.00	100.00	99.86	99.30
	LL 3	100.00	100.00	99.97	99.26
Alto Senac	AS 1	100.00	100.00	99.97	99.47
	AS 2	100.00	100.00	99.86	99.46
	AS 3	100.00	100.00	99.92	99.34
Catedral	C 1	100.00	100.00	99.22	88.46
	C 2	100.00	100.00	99.16	88.51
	C 3	100.00	99.99	99.30	88.42
Tabladita II	TII 1	100.00	100.00	99.74	97.53
	TII 2	100.00	100.00	99.80	97.42
	TII 3	100.00	100.00	99.66	97.37
Lourdes	L 1	100.00	99.89	99.41	95.89
	L 2	100.00	99.80	99.36	96.02
	L 3	100.00	99.83	99.27	95.87
15 de Noviembre	15N 1	100.00	99.97	99.45	93.64
	15N 2	100.00	99.93	99.50	93.59
	15N 3	100.00	99.99	99.42	93.69
15 de Agosto	15AG 1	100.00	99.71	99.30	98.61
	15AG 2	100.00	99.78	99.27	98.73
	15AG 3	100.00	99.64	99.27	98.68
Los Olivos	LO 1	100.00	100.00	99.43	98.85
	LO 2	100.00	99.99	99.49	99.02
	LO 3	100.00	100.00	99.38	98.99
Carlos Wagner	CW 1	100.00	100.00	98.45	97.53
	CW 2	100.00	99.99	98.50	97.45
	CW 3	100.00	100.00	98.58	97.58

Fuente: Elaboración propia.



### 3.2.3. Límites de plasticidad

Figura 3. 10 Suelo triturado que pasa el tamiz N° 40



Antes de realizar el ensayo de límites, se debe triturar el suelo y tamizar en la malla N° 40.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 11 Suelo preparado para reposar



La muestra que pase el tamiz N° 40 se debe mezclar con agua destilada y reposar por 16 horas.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.1. Método convencional

Esta metodología se utiliza para el cálculo de:

#### a) Límite líquido (Copa de Casagrande)

Figura 3. 12 Calibración de la Copa de Casagrande



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 13 Colocado y ranurado del suelo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 14 N° de golpes y contenido de humedad



Luego de que la ranura se cierre 12,7 mm, realizar cortes horizontales que coincidan con el suelo juntado y retirar la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 15 Muestra con diferentes contenidos de humedad secada en horno



Obtención del contenido de humedad a distintos N° de golpes.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 4 Valores del LL con la Copa de Casagrande (MC)

Barrio	Muestra	Límites (Método convencional)
		LL (%)
Oscar Zamora	OZ1	38.73
	OZ2	39.41
	OZ3	37.99
2 de Mayo	2M 1	38.17
	2M 2	38.81
	2M 3	37.37
El Constructor	EC 1	27.28
	EC 2	27.94
	EC 3	26.53
Torrecillas	T 1	25.68
	T 2	24.99
	T 3	26.01
San Luis	SL 1	36.03
	SL 2	36.86
	SL 3	35.45
8 de Marzo	8M 1	27.99
	8M 2	27.50
	8M 3	27.23
San Jorge I	SJI 1	26.41
	SJI 2	25.26
	SJI 3	27.59
Nuevo Amanecer	NA 1	29.15
	NA 2	29.78
	NA 3	28.33
Morros Blancos	MB 1	32.67
	MB 2	32.03
	MB 3	33.11
Juan Nicolai	JN 1	30.73
	JN 2	30.13
	JN 3	31.58
15 de Abril	15A 1	47.47
	15A 2	47.93
	15A 3	46.64
San Jorge II	SJII 1	37.99
	SJII 2	38.64
	SJII 3	37.41
San Blass	SB 1	29.92
	SB 2	30.24
	SB 3	30.81
Miraflores	M 1	34.13
	M 2	34.57
	M 3	33.72
Méndez Arcos	MA 1	26.92
	MA 2	27.89
	MA 3	26.46

San Antonio	SA 1	39.60
	SA 2	40.04
	SA 3	39.00
Aranjuez	A 1	34.54
	A 2	35.27
	A 3	34.24
La Cañada	LC 1	39.85
	LC 2	40.03
	LC 3	39.16
24 de Junio	24J 1	32.90
	24J 2	33.59
	24J 3	32.42
Los Chapacos	LCH 1	29.67
	LCH 2	31.41
	LCH 3	29.97
German Bush	GB 1	36.75
	GB 2	37.78
	GB 3	36.92
Los Laureles	LL 1	40.78
	LL 2	41.59
	LL 3	40.45
Alto Senac	AS 1	41.44
	AS 2	41.61
	AS 3	40.86
Catedral	C 1	41.91
	C 2	42.07
	C 3	42.52
Tabladita II	TII 1	38.79
	TII 2	38.00
	TII 3	39.65
Lourdes	L 1	39.46
	L 2	40.15
	L 3	38.66
15 de Noviembre	15N 1	32.75
	15N 2	33.56
	15N 3	33.11
15 de Agosto	15AG 1	40.63
	15AG 2	41.51
	15AG 3	41.08
Los Olivos	LO 1	39.47
	LO 2	38.26
	LO 3	39.89
Carlos Wagner	CW 1	42.84
	CW 2	43.18
	CW 3	42.47

Fuente: Elaboración propia.

**b) Límite plástico (Método de la mano o rollitos)**

Figura 3. 16 Rollitos de 3.2 mm



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 17 Contenido de humedad de los rollitos



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 5 Valores del LP por método de la mano o rollitos (MC)

Barrio	Muestra	Límites (Método convencional)
		LP (%)
Oscar Zamora	OZ1	21.62
	OZ2	21.19
	OZ3	22.61
2 de Mayo	2M 1	21.85
	2M 2	22.50
	2M 3	22.94
El Constructor	EC 1	16.55
	EC 2	17.68
	EC 3	15.87
Torrecillas	T 1	17.38
	T 2	17.82
	T 3	16.80
San Luis	SL 1	23.16
	SL 2	22.73
	SL 3	21.98
8 de Marzo	8M 1	17.88
	8M 2	18.62
	8M 3	17.57
San Jorge I	SJI 1	18.51
	SJI 2	18.02
	SJI 3	19.18
Nuevo Amanecer	NA 1	20.68
	NA 2	21.02
	NA 3	20.19
Morros Blancos	MB 1	20.56
	MB 2	20.25
	MB 3	21.08
Juan Nicolai	JN 1	20.60
	JN 2	20.97
	JN 3	21.63
15 de Abril	15A 1	18.67
	15A 2	19.02
	15A 3	17.86
San Jorge II	SJII 1	23.08
	SJII 2	23.37
	SJII 3	22.47
San Blass	SB 1	19.29
	SB 2	18.48
	SB 3	18.94
Miraflores	M 1	18.56
	M 2	19.12
	M 3	17.91
Méndez Arcos	MA 1	18.34
	MA 2	18.82
	MA 3	18.23

San Antonio	SA 1	24.57
	SA 2	24.37
	SA 3	24.83
Aranjuez	A 1	18.53
	A 2	18.04
	A 3	19.21
La Cañada	LC 1	22.14
	LC 2	21.46
	LC 3	21.11
24 de Junio	24J 1	22.22
	24J 2	21.32
	24J 3	21.87
Los Chapacos	LCH 1	17.77
	LCH 2	18.78
	LCH 3	17.45
German Bush	GB 1	17.08
	GB 2	17.56
	GB 3	16.68
Los Laureles	LL 1	23.41
	LL 2	23.15
	LL 3	23.82
Alto Senac	AS 1	24.63
	AS 2	25.19
	AS 3	23.97
Catedral	C 1	21.08
	C 2	20.21
	C 3	20.86
Tabladita II	TII 1	24.44
	TII 2	23.98
	TII 3	24.60
Lourdes	L 1	23.54
	L 2	23.33
	L 3	23.98
15 de Noviembre	15N 1	21.68
	15N 2	21.30
	15N 3	22.30
15 de Agosto	15AG 1	20.71
	15AG 2	20.94
	15AG 3	20.16
Los Olivos	LO 1	20.56
	LO 2	20.09
	LO 3	21.13
Carlos Wagner	CW 1	25.67
	CW 2	25.99
	CW 3	25.16

Fuente: Elaboración propia.



### 3.2.3.2. Método penetrómetro de caída

El ensayo de límites por este método se ejecuta de la siguiente manera:

#### a) Límite líquido

##### - Previo a la prueba

1. Triturar la muestra con un martillo de goma.

Figura 3. 18 Muestra triturada



Fuente: Elaboración propia.

2. Pasar la muestra triturada por el tamiz N° 40.

Figura 3. 19 Tamizado de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

3. Mezclar la muestra con agua destilada y dejar reposar durante 24 horas.

Figura 3. 20 Muestra con agua en reposo



Fuente: Elaboración propia.

- **Desarrollo de la prueba**

1. Ensamblar el cono de 80 g.

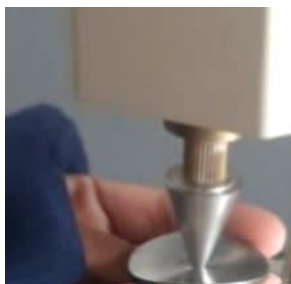
Figura 3. 21 Equipo con cono de 80 g para el LL



Fuente: Elaboración propia.

2. Verificar en la placa metálica la punta del cono, con la punta del dedo.

Figura 3. 22 Verificación de la punta del cono para el LL



Fuente: Elaboración propia.

3. Programar el equipo a 5 segundos de penetración. Una vez reposada la muestra, mezclar y empujar una porción de mezcla del suelo dentro de la copa con la espátula, teniendo cuidado de no atrapar aire. Retire el exceso del suelo enrazando con la espátula hasta obtener una superficie lisa y situarlo en el equipo.

Figura 3. 23 Muestra en la copa para ensayar



Fuente: Elaboración propia.

4. Con el cono de penetración bloqueado en la posición elevada, bajar el montaje del soporte hasta que la punta del cono apenas toque la superficie. Cuando el cono esté en la posición correcta un movimiento ligero marcará apenas la superficie del suelo.

Figura 3. 24 Cono en contacto con la superficie del suelo



Fuente: Elaboración propia.

5. Liberar el cono por un periodo de 5 segundos y registrar la lectura de penetración que marca la pantalla (El intervalo aproximado de los valores de penetración debe estar entre 15 mm a 25 mm, cubierto por cuatro ensayos). Si la diferencia entre la primera y segunda lecturas de penetración es menor que 0.5 mm, se debe promediar las dos penetraciones. Si la segunda penetración es mayor que 0.5 mm, diferente de la primera realizar una tercera prueba Si el intervalo general menor a 1 mm, anotar el promedio de las tres penetraciones.

Figura 3. 25 Muestra con dos penetraciones y tres penetraciones



Fuente: Elaboración propia.

**Nota:** Limpiar el cono cuidadosamente en cada medición evitando rayarlo. Si el intervalo general entre las tres lecturas es mayor a 1 mm, retirar el suelo de la copa, lavar la copa, volver a mezclar el suelo y repetir el proceso.

6. Tomar una porción de muestra alrededor de 10 g del área penetrada por el cono.

Figura 3. 26 Área penetrada por el penetrómetro de caída



Fuente: Elaboración propia.

7. Secar la porción de muestra en el horno para determinar el contenido de humedad.

Figura 3. 27 Contenido de humedad de la muestra



Fuente: Elaboración propia

8. Repetir este procedimiento tres veces, usando la misma muestra de suelo, agregando incrementos de agua destilada secuencialmente, donde las cuatro penetraciones deben estar comprendidos entre 15 mm y 25 mm.

**Nota:** Cada vez que el suelo sea retirado del molde se debe lavar y secar la copa.

- **Procedimiento de cálculo del límite líquido**

El siguiente ejemplo pertenece a la primera penetración del punto OZ 1.

1. Promediar las penetraciones (mm)

$$\text{Penetración} = \frac{16.48 + 16.41}{2}$$

$$\text{Penetración} = 16.45 \text{ mm}$$

2. Calcular el peso del agua (g)

$$\text{Peso del agua} = (\text{Peso de Suelo Húmedo} + \text{Cápsula (g)}) - (\text{Peso de Suelo Seco} + \text{Cápsula (g)})$$

$$\text{Peso del agua} = 25.60 - 22.74$$

$$\text{Peso del agua} = 2.86 \text{ g}$$

3. Calcular el peso del suelo seco (g)

$$\text{Peso de Suelo Seco} = (\text{Peso de Suelo Seco} + \text{Cápsula (g)}) - (\text{Peso de la Cápsula (g)})$$

$$\text{Peso de Suelo Seco} = 22.74 - 14.62$$

$$\text{Peso de Suelo Seco} = 8.12 \text{ g}$$

4. Calcular el porcentaje de humedad (%)

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{Peso del agua (g)}}{\text{Peso de suelo seco (g)}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{2.86}{8.12} * 100$$

$$\text{Porcentaje de humedad} = 35.22 \%$$

**Nota:** Realizar el mismo procedimiento para las tres penetraciones comprendidos entre 15 mm y 25 mm.

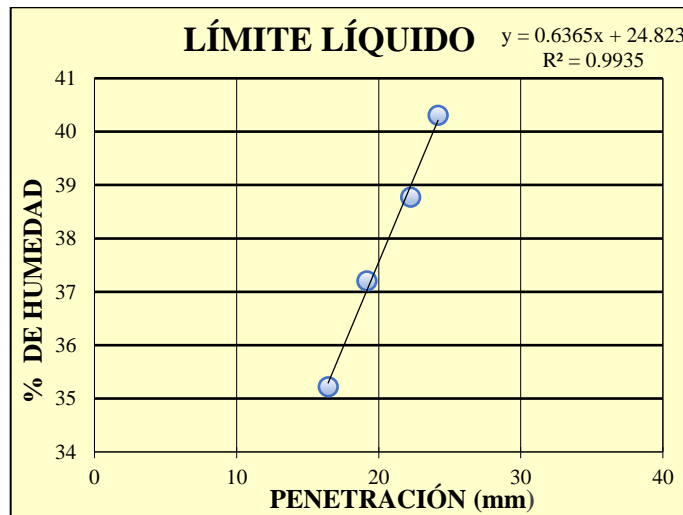
Tabla 3. 6 Determinación del límite líquido (BS 1377:1990)

Determinación de Límite Líquido (BS 1377:1990)				
Cápsula N°	1	2	3	4
Penetración 1 (mm)	16.48	19.04	22.29	24.56
Penetración 2 (mm)	16.41	19.27	22.20	23.61
Penetración 3 (mm)				24.36
Penetración (mm)	16.45	19.16	22.25	24.18
Peso de Suelo Húmedo + Cápsula (g)	25.60	28.84	27.32	31.04
Peso de Suelo Seco + Cápsula (g)	22.74	25.38	24.16	27.07
Peso del agua (g)	2.86	3.46	3.16	3.97
Peso de la Cápsula (g)	14.62	16.08	16.01	17.22
Peso de Suelo Seco (g)	8.12	9.30	8.15	9.85
Porcentaje de Humedad (%)	35.22	37.20	38.77	40.30

Fuente: Elaboración propia.

- Representar los resultados en una gráfica lineal, la penetración en (mm) y el contenido de humedad (%). El contenido de humedad correspondiente a la penetración de 20 mm en 5 segundos es el límite líquido (LL).

Figura 3. 28 Gráfica lineal LL - OZ 1



Fuente: Elaboración propia.

- Reemplazar la ecuación donde x es la penetración de 20 mm.

$$y = 0.6365 * x + 24.823$$

$$y = 0.6365 * 20 + 24.823 = 37.55\%$$

- Se determina que el límite líquido de OZ 1 es **37.55 %** → **38 %**.

Tabla 3. 7 Valores del LL con el penetrómetro de caída (MPC)

Barrio	Muestra	Límites (Método penetrómetro de caída)
		LL (%)
Oscar Zamora	OZ1	37.55
	OZ2	37.14
	OZ3	38.00
2 de Mayo	2M 1	36.70
	2M 2	36.28
	2M 3	37.16
El Constructor	EC 1	28.50
	EC 2	28.29
	EC 3	29.46
Torrecillas	T 1	27.89
	T 2	27.40
	T 3	28.31
San Luis	SL 1	34.10
	SL 2	33.49
	SL 3	34.69
8 de Marzo	8M 1	25.54
	8M 2	25.92
	8M 3	25.27
San Jorge I	SJI 1	24.97
	SJI 2	25.59
	SJI 3	24.66
Nuevo Amanecer	NA 1	31.22
	NA 2	31.65
	NA 3	30.87
Morros Blancos	MB 1	31.36
	MB 2	30.81
	MB 3	31.68
Juan Nicolai	JN 1	33.09
	JN 2	33.89
	JN 3	33.41
15 de Abril	15A 1	48.55
	15A 2	48.06
	15A 3	48.93
San Jorge II	SJII 1	36.38
	SJII 2	35.92
	SJII 3	35.35
San Blass	SB 1	32.10
	SB 2	32.43
	SB 3	31.79
Miraflores	M 1	35.97
	M 2	36.75
	M 3	36.36
Méndez Arcos	MA 1	25.96
	MA 2	25.57
	MA 3	26.51



San Antonio	SA 1	41.43
	SA 2	41.73
	SA 3	40.91
Aranjuez	A 1	36.88
	A 2	37.57
	A 3	37.98
La Cañada	LC 1	40.59
	LC 2	41.36
	LC 3	40.91
24 de Junio	24J 1	35.14
	24J 2	34.71
	24J 3	35.67
Los Chapacos	LCH 1	30.81
	LCH 2	31.52
	LCH 3	31.11
German Bush	GB 1	37.65
	GB 2	38.57
	GB 3	38.12
Los Laureles	LL 1	42.90
	LL 2	43.29
	LL 3	42.56
Alto Senac	AS 1	43.60
	AS 2	43.03
	AS 3	43.91
Catedral	C 1	44.23
	C 2	44.72
	C 3	43.46
Tabladita II	TII 1	40.00
	TII 2	40.52
	TII 3	39.43
Lourdes	L 1	37.38
	L 2	37.84
	L 3	37.00
15 de Noviembre	15N 1	35.32
	15N 2	35.91
	15N 3	34.69
15 de Agosto	15AG 1	42.00
	15AG 2	42.46
	15AG 3	43.35
Los Olivos	LO 1	37.47
	LO 2	37.20
	LO 3	38.22
Carlos Wagner	CW 1	45.21
	CW 2	46.10
	CW 3	45.45

Fuente: Elaboración propia.

**b) Límite plástico**

El ensayo sigue el mismo procedimiento del límite líquido por este método.

- **Previo a la prueba**

Figura 3. 29 Muestra triturada para tamizar



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 30 Muestra en reposo



Fuente: Elaboración propia.

- **Desarrollo de la prueba**

Figura 3. 31 Equipo con cono de 240 g para el LP



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 32 Verificación de la punta del cono para el LP



Verificar con la punta del dedo, la punta del cono en la placa metálica.

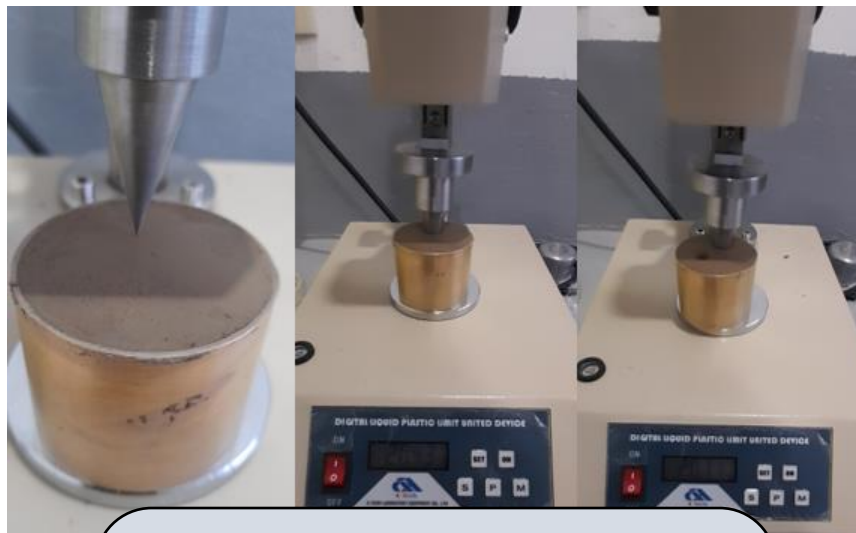
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 33 Equipo programado a 5 segundos de penetración



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 34 Dos o tres penetraciones dependiendo la especificación



Si la diferencia entre la primera y segunda lecturas de penetración es menor que 0.5 mm, se debe promediar las dos penetraciones. Si la segunda penetración es mayor que 0.5 mm, diferente de la primera realizar una tercera prueba. Si el intervalo general menor a 1 mm, anotar el promedio de las tres penetraciones.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 35 Muestra retirada alrededor de las penetraciones



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. 36 Contenido de humedad de las penetraciones



Fuente: Elaboración propia.

- **Procedimiento de cálculo del límite plástico**

El siguiente ejemplo pertenece a la segunda penetración del punto OZ 1.

1. Promediar las penetraciones (mm)

$$\text{Penetración} = \frac{18.53 + 19.35 + 18.99}{3}$$

$$\text{Penetración} = 18.96 \text{ mm}$$

2. Calcular el peso del agua (g)

$$\text{Peso del agua} = (\text{Peso de Suelo Húmedo} + \text{Cápsula (g)}) - (\text{Peso de Suelo Seco} + \text{Cápsula (g)})$$

$$\text{Peso del agua} = 26.81 - 25.38$$

$$\text{Peso del agua} = 1.43 \text{ g}$$

3. Calcular el peso del suelo seco (g)

$$\text{Peso de Suelo Seco} = (\text{Peso de Suelo Seco} + \text{Cápsula (g)}) - (\text{Peso de la Cápsula (g)})$$

$$\text{Peso de Suelo Seco} = 25.38 - 15.98$$

$$\text{Peso de Suelo Seco} = 9.40 \text{ g}$$

4. Calcular el porcentaje de humedad (%)

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{Peso del agua (g)}}{\text{Peso de suelo seco (g)}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{1.43}{9.40} * 100$$

$$\text{Porcentaje de humedad} = 15.21 \%$$

**Nota:** Realizar el mismo procedimiento para las tres penetraciones comprendidos entre 15 mm y 25 mm.

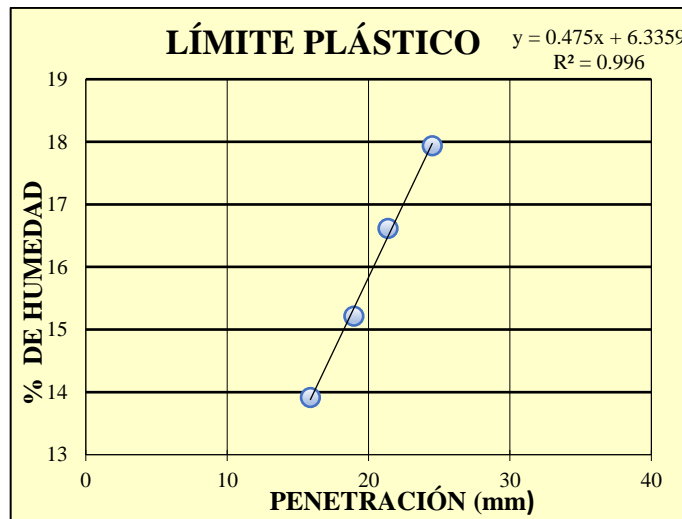
Tabla 3. 8 Determinación del límite plástico (Wood & Wroth)

Determinación de Límite Plástico (Wood & Wroth)				
Cápsula N°	1	2	3	4
Penetración 1 (mm)	15.68	18.53	21.13	24.34
Penetración 2 (mm)	16.55	19.35	21.61	24.66
Penetración 3 (mm)	15.42	18.99		
Penetración (mm)	15.88	18.96	21.37	24.50
Peso de Suelo Húmedo + Cápsula (g)	27.28	26.81	27.94	28.96
Peso de Suelo Seco + Cápsula (g)	25.83	25.38	26.27	27.10
Peso del agua (g)	1.45	1.43	1.67	1.86
Peso de la Cápsula (g)	15.41	15.98	16.22	16.73
Peso de Suelo Seco (g)	10.42	9.40	10.05	10.37
Porcentaje de Humedad (%)	13.92	15.21	16.62	17.94

Fuente: Elaboración propia.

- Representar los resultados en una gráfica lineal, la penetración en (mm) y el contenido de humedad (%). El contenido de humedad correspondiente a la penetración de 20 mm en 5 segundos es el límite líquido (LP).

Figura 3. 37 Gráfica lineal LP - OZ 1



Fuente: Elaboración propia.

- Reemplazar la ecuación donde x es la penetración de 20 mm.

$$y = 0.475 * x + 6.3359$$

$$y = 0.475 * 20 + 6.3359 = 15.84 \%$$

- Se determina que el límite plástico de OZ 1 es **15.84 % → 16%**.

Tabla 3. 9 Valores del LP con el penetrómetro de caída (MPC)

Barrio	Muestra	Límites (Método penetrómetro de caída)
		LP (%)
Oscar Zamora	OZ1	15.84
	OZ2	15.23
	OZ3	16.13
2 de Mayo	2M 1	17.31
	2M 2	17.07
	2M 3	17.89
El Constructor	EC 1	21.61
	EC 2	21.26
	EC 3	22.13
Torrecillas	T 1	22.52
	T 2	22.79
	T 3	22.17
San Luis	SL 1	18.07
	SL 2	18.47
	SL 3	18.75
8 de Marzo	8M 1	10.94
	8M 2	11.13
	8M 3	10.62
San Jorge I	SJI 1	11.90
	SJI 2	11.38
	SJI 3	12.13
Nuevo Amanecer	NA 1	25.72
	NA 2	25.30
	NA 3	26.04
Morros Blancos	MB 1	14.00
	MB 2	13.57
	MB 3	14.40
Juan Nicolai	JN 1	26.24
	JN 2	25.92
	JN 3	26.68
15 de Abril	15A 1	25.88
	15A 2	26.38
	15A 3	25.52
San Jorge II	SJII 1	18.04
	SJII 2	18.26
	SJII 3	17.83
San Blass	SB 1	25.54
	SB 2	25.21
	SB 3	25.85
Miraflores	M 1	24.02
	M 2	24.50
	M 3	23.68
Méndez Arcos	MA 1	13.24
	MA 2	12.51
	MA 3	13.09



San Antonio	SA 1	29.57
	SA 2	29.86
	SA 3	29.16
Aranjuez	A 1	24.35
	A 2	24.69
	A 3	24.04
La Cañada	LC 1	26.47
	LC 2	26.72
	LC 3	25.84
24 de Junio	24J 1	28.66
	24J 2	28.35
	24J 3	29.01
Los Chapacos	LCH 1	22.47
	LCH 2	22.22
	LCH 3	22.86
German Bush	GB 1	21.90
	GB 2	22.25
	GB 3	21.43
Los Laureles	LL 1	28.64
	LL 2	28.23
	LL 3	28.95
Alto Senac	AS 1	29.83
	AS 2	29.57
	AS 3	30.09
Catedral	C 1	26.26
	C 2	26.61
	C 3	25.90
Tabladita II	TII 1	29.26
	TII 2	29.57
	TII 3	29.88
Lourdes	L 1	17.83
	L 2	17.26
	L 3	17.56
15 de Noviembre	15N 1	27.07
	15N 2	26.84
	15N 3	26.27
15 de Agosto	15AG 1	25.31
	15AG 2	25.65
	15AG 3	24.99
Los Olivos	LO 1	14.88
	LO 2	14.49
	LO 3	15.04
Carlos Wagner	CW 1	32.11
	CW 2	32.32
	CW 3	31.87

Fuente: Elaboración propia.

c) **Índice de plasticidad**

$$IP = LL - LP = 37.55 - 15.84 = 21.72 \% \rightarrow 22\%.$$

Tabla 3. 10 Valores del IP con el penetrómetro de caída (MPC)

Barrio	Muestra	Límites (Método penetrómetro de caída)
		IP (%)
Oscar Zamora	OZ1	21.72
	OZ2	21.91
	OZ3	21.87
2 de Mayo	2M 1	19.39
	2M 2	19.21
	2M 3	19.28
El Constructor	EC 1	6.89
	EC 2	7.03
	EC 3	7.33
Torrecillas	T 1	5.37
	T 2	4.61
	T 3	6.14
San Luis	SL 1	16.03
	SL 2	15.02
	SL 3	15.94
8 de Marzo	8M 1	14.60
	8M 2	14.80
	8M 3	14.65
San Jorge I	SJI 1	13.07
	SJI 2	14.20
	SJI 3	12.53
Nuevo Amanecer	NA 1	5.50
	NA 2	6.35
	NA 3	4.82
Morros Blancos	MB 1	17.36
	MB 2	17.23
	MB 3	17.27
Juan Nicolai	JN 1	6.85
	JN 2	7.97
	JN 3	6.73
15 de Abril	15A 1	22.66
	15A 2	21.67
	15A 3	23.41
San Jorge II	SJII 1	18.34
	SJII 2	17.66
	SJII 3	17.52
San Blass	SB 1	6.56
	SB 2	7.22
	SB 3	5.94
Miraflores	M 1	11.95
	M 2	12.25

	M 3	12.68
Méndez Arcos	MA 1	12.73
	MA 2	13.06
	MA 3	13.42
San Antonio	SA 1	11.85
	SA 2	11.87
	SA 3	11.75
Aranjuez	A 1	12.54
	A 2	12.88
	A 3	13.94
La Cañada	LC 1	14.12
	LC 2	14.64
	LC 3	15.08
24 de Junio	24J 1	6.48
	24J 2	6.36
	24J 3	6.66
Los Chapacos	LCH 1	8.34
	LCH 2	9.31
	LCH 3	8.25
German Bush	GB 1	15.75
	GB 2	16.32
	GB 3	16.69
Los Laureles	LL 1	14.27
	LL 2	15.05
	LL 3	13.62
Alto Senac	AS 1	13.77
	AS 2	13.46
	AS 3	13.82
Catedral	C 1	17.97
	C 2	18.11
	C 3	17.56
Tabladita II	TII 1	10.74
	TII 2	10.95
	TII 3	9.55
Lourdes	L 1	19.54
	L 2	20.59
	L 3	19.44
15 de Noviembre	15N 1	8.25
	15N 2	9.07
	15N 3	8.43
15 de Agosto	15AG 1	16.69
	15AG 2	16.82
	15AG 3	18.36
Los Olivos	LO 1	22.59
	LO 2	22.71
	LO 3	23.18
Carlos Wagner	CW 1	13.10
	CW 2	13.78
	CW 3	13.58

Fuente: Elaboración propia.

# **CAPÍTULO IV**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Tabla 4. 1 Tabla completa de resumen

Barrio	Muestra	Prof. (m)	Clasificación de suelos SUCS ASTM D 2487		Porcentaje que pasa del tamiz				Contenido de humedad natural W%	Límites (Método convencional)			Límites (Método penetrometro de caída)		
			MC	MPC	N°4	N°10	N°40	N°200		LL (%)	LP (%)	IP (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Oscar Zamora	OZ	1	CL	CL	100	99	99	95	15	39	22	17	38	16	22
2 de Mayo	2M	1	CL	CL	100	100	100	93	13	38	22	16	37	17	19
El Constructor	EC	1	CL	ML	100	100	99	83	10	27	17	11	29	22	7
Torreallas	T	1	CL	ML	100	100	100	87	12	26	17	8	28	22	5
San Luis	SL	1	CL	CL	100	100	100	94	13	36	23	13	34	18	16
8 de marzo	8M	1	CL	CL	100	100	99	80	15	28	18	10	26	11	15
San Jorge I	SJI	1	CL	CL	100	100	100	92	10	26	19	8	25	12	13
Nuevo Amanecer	NA	1	CL	ML	100	99	99	76	14	29	21	8	31	26	6
Morros Blancos	MB	1	CL	CL	100	100	100	99	10	33	21	12	31	14	17
Juan Nicolai	JN	1	CL	ML	100	100	100	94	13	31	21	10	33	26	7
15 de Abril	15A	1	CL	CL	100	100	99	93	13	47	19	29	49	26	23
San Jorge II	SJII	1	CL	CL	100	100	100	99	12	38	23	15	36	18	18
San Blas	SB	1	CL	ML	100	100	100	97	11	30	19	11	32	26	7
Miraflores	M	1	CL	CL	100	100	99	78	9	34	19	16	36	24	12
Mendez Arcos	MA	1	CL	CL	100	100	99	97	10	27	18	9	26	13	13
San Antonio	SA	1	CL	ML	100	99	96	78	13	40	25	15	41	30	12
Aranjuez	A	1	CL	CL	100	100	99	98	11	35	19	16	37	24	13
La Cañada	LC	1	CL	ML	100	100	98	96	12	40	22	18	41	26	15
24 de Junio	24J	1	CL	ML	100	100	100	95	11	33	22	11	35	29	6
Los Chapacos	LCH	1	CL	CL	100	100	100	95	11	30	18	12	31	23	9
German Bush	GB	1	CL	CL	100	100	100	94	11	37	17	20	38	22	16
Los Laureles	LL	1	CL	ML	100	100	100	99	14	41	23	17	43	29	14
Alto Senac	AS	1	CL	ML	100	100	100	99	13	41	25	17	44	30	14
Catedral	C	1	CL	CL	100	100	99	88	14	42	21	21	44	26	18
Tabladita II	THI	1	CL	ML	100	100	100	97	11	39	24	14	40	30	10
Lourdes	L	1	CL	CL	100	100	99	96	13	39	24	16	37	18	20
15 de Noviembre	15N	1	CL	ML	100	100	99	94	11	33	22	11	35	27	9
15 de Agosto	15AG	1	CL	CL	100	100	99	99	12	41	21	20	43	25	17
Los Olivos	LO	1	CL	CL	100	100	99	99	15	39	21	19	38	15	23
Carlos Wagner	CW	1	CL	ML	100	100	99	98	11	43	26	17	46	32	13

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de una variable

Se realiza un análisis estadístico de los principales valores.

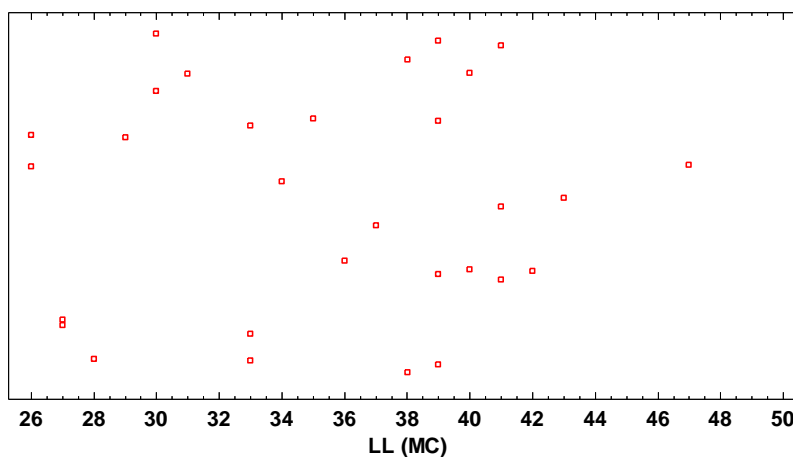
##### 4.1.1. Límite líquido (MC)

Tabla 4. 2 Valores del LL con la Copa de Casagrande (MC)

LL (MC)		
39	47	37
38	38	41
27	30	41
26	34	42
36	27	39
28	40	39
26	35	33
29	40	41
33	33	39
31	30	43

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. 1 Dispersión de los valores de LL (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

El gráfico de dispersión representa cada observación por punto sobre la ubicación correspondiente en una escala de medición horizontal. Donde se tiene 30 valores de LL (MC) con rango de 26 a 47.

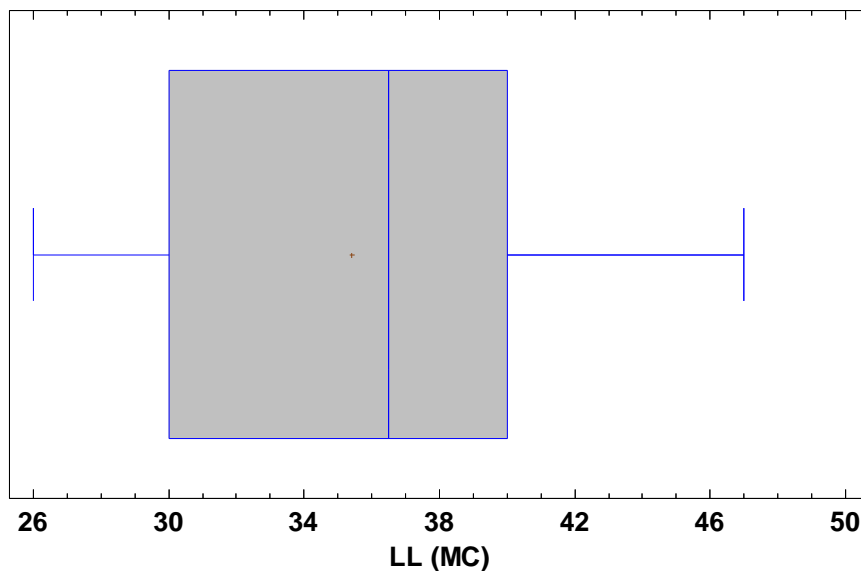
Tabla 4. 3 Resumen Estadístico para LL (MC)

Número de datos	30
Media	35.4
Mediana	36.5
Moda	39.0
Varianza	32.8
Desviación Estándar	5.72713
Coefficiente de Variación	16.1783%
Cuartil Inferior	30.0
Cuartil Superior	40.0
Rango Intercuartílico	10.0

Fuente: Software Statgraphics.

En la tabla se puede observar un resumen de los principales valores estadísticos para el LL (MC).

Gráfico 4. 2 Caja y bigotes LL (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

La gráfica de caja y bigotes indica la media, mediana y los cuartiles del grupo de datos LL (MC), también describe cualquier alejamiento de la simetría y la identificación de las observaciones “extremas o apartadas” inusualmente alejadas del cuerpo principal de los datos.

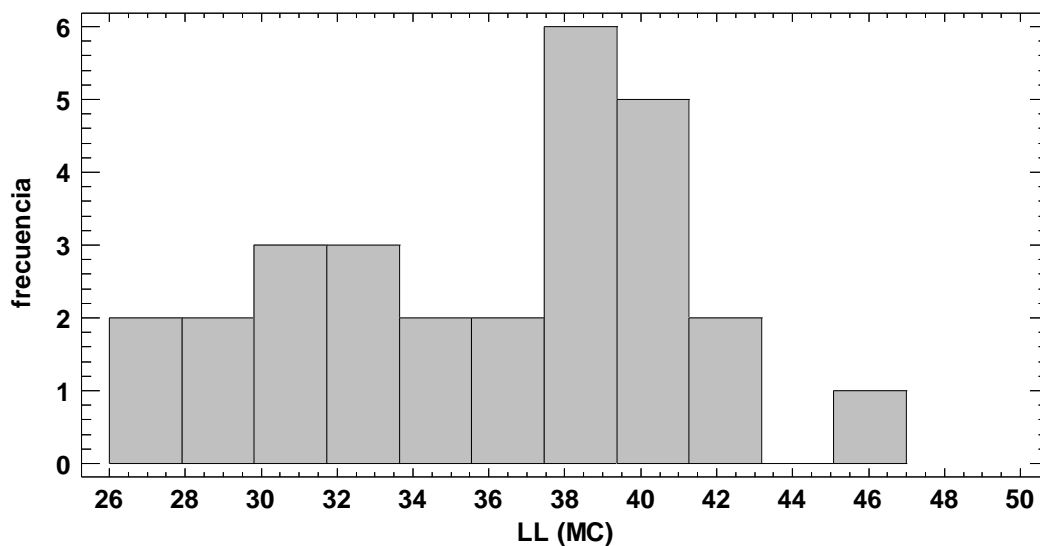
Tabla 4. 4 Tabla de Frecuencias para LL (MC)

	<b>Límite</b>	<b>Límite</b>			<b>Frecuencia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Clase</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Punto Medio</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Relativa</b>	<b>Acumulada</b>	<b>Rel. Acum.</b>
	menor o igual	26.0		2	0.0667	2	0.0667
1	26.0	27.9091	26.9545	2	0.0667	4	0.1333
2	27.9091	29.8182	28.8636	2	0.0667	6	0.2000
3	29.8182	31.7273	30.7727	3	0.1000	9	0.3000
4	31.7273	33.6364	32.6818	3	0.1000	12	0.4000
5	33.6364	35.5455	34.5909	2	0.0667	14	0.4667
6	35.5455	37.4545	36.5	2	0.0667	16	0.5333
7	37.4545	39.3636	38.4091	6	0.2000	22	0.7333
8	39.3636	41.2727	40.3182	5	0.1667	27	0.9000
9	41.2727	43.1818	42.2273	2	0.0667	29	0.9667
10	43.1818	45.0909	44.1364	0	0.0000	29	0.9667
11	45.0909	47.0	46.0455	1	0.0333	30	1.0000
	mayor de	47.0		0	0.0000	30	1.0000

Fuente: Software Statgraphics.

La tabla muestra una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de LL (MC) en 11 intervalos del mismo ancho y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Gráfico 4. 3 Histograma de frecuencias LL (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

El histograma muestra la frecuencia de los valores dependiendo el intervalo.



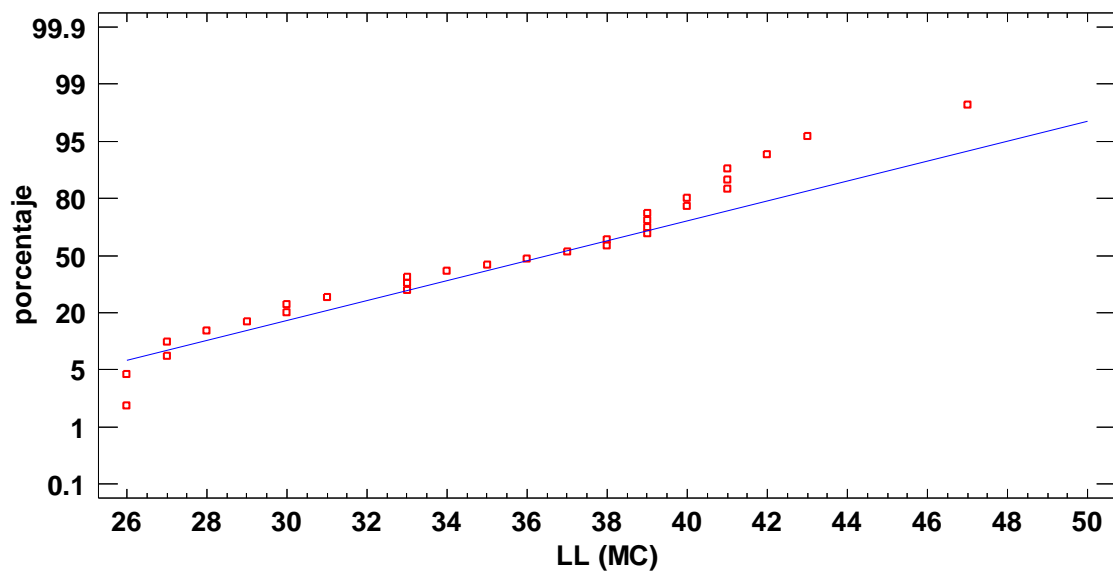
### Intervalos de Confianza para LL (MC)

Intervalos de confianza del 95.0%:

- para la media:  $35.4 \pm 2.12701$  [33.2615; 37.5385]
- para la desviación estándar: [4.56112; 7.69906]

Significa que dentro en algún lugar dentro del intervalo se encuentra la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces.

Gráfico 4. 4 Probabilidad normal LL (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

La gráfica de probabilidad normal muestra que los datos son muy próximos a la recta propia de la probabilidad.

### Prueba de Hipótesis para LL (MC)

- Prueba t

Hipótesis Nula:  $\text{media} = 0$

Alternativa: no igual

Estadístico  $t = 33.8553$

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de LL (MC) es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de LL (MC) es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

- Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula:  $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 951.2

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de LL (MC) es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de LL (MC) es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

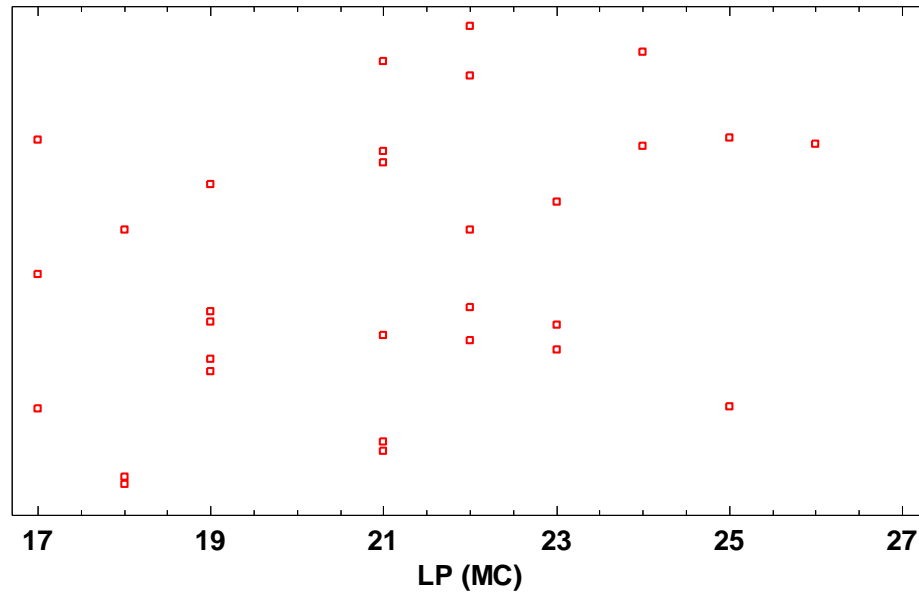
#### 4.1.2. Límite plástico (MC)

Tabla 4. 5 Valores del LP por método de la mano o rollitos (MC)

LP (MC)		
22	19	17
22	23	23
17	19	25
17	19	21
23	18	24
18	25	24
19	19	22
21	22	21
21	22	21
21	18	26

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. 5 Dispersión de los valores de LP (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

El gráfico de dispersión representa cada observación por punto sobre la ubicación correspondiente en una escala de medición horizontal. Donde se tiene 30 valores de LP (MC) con rango de 17 a 26.

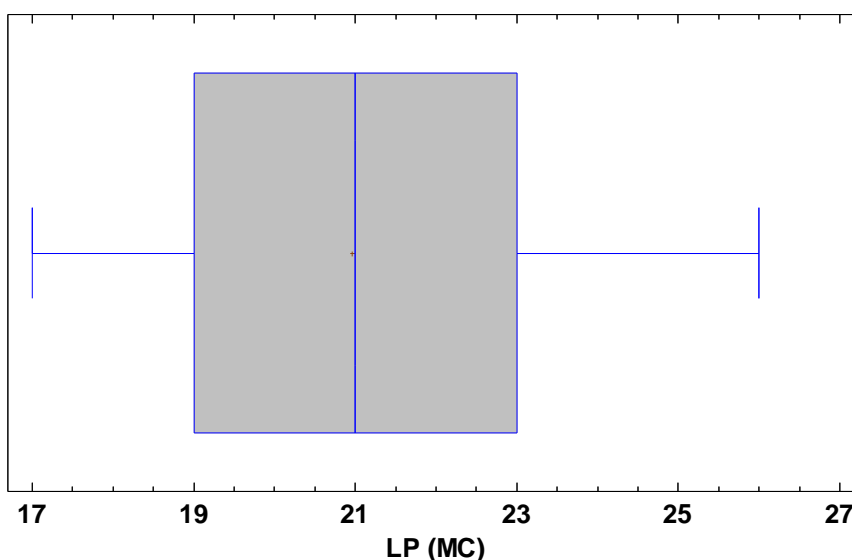
Tabla 4. 6 Resumen Estadístico para LP (MC)

Número de datos	30
Media	20.9667
Mediana	21.0
Moda	21.0
Varianza	6.44713
Desviación Estándar	2.53912
Coefficiente de Variación	12.1103%
Cuartil Inferior	19.0
Cuartil Superior	23.0
Rango Intercuartílico	4.0

Fuente: Software Statgraphics.

En la tabla se puede observar un resumen de los principales valores estadísticos para el LP (MC).

Gráfico 4. 6 Caja y bigotes LP (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

La gráfica de caja indica la media, mediana y los cuartiles del grupo de datos LP (MC), también describe cualquier alejamiento de la simetría y la identificación de las observaciones “extremas o apartadas” inusualmente alejadas del cuerpo principal de los datos.

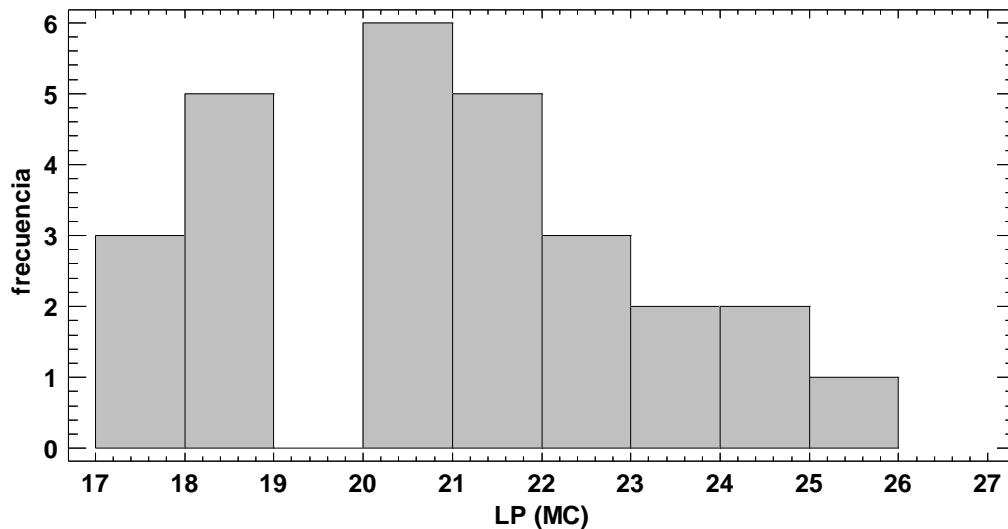
Tabla 4. 7 Tabla de Frecuencias para LP (MC)

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	17.0		3	0.1000	3	0.1000
1	17.0	18.0	17.5	3	0.1000	6	0.2000
2	18.0	19.0	18.5	5	0.1667	11	0.3667
3	19.0	20.0	19.5	0	0.0000	11	0.3667
4	20.0	21.0	20.5	6	0.2000	17	0.5667
5	21.0	22.0	21.5	5	0.1667	22	0.7333
6	22.0	23.0	22.5	3	0.1000	25	0.8333
7	23.0	24.0	23.5	2	0.0667	27	0.9000
8	24.0	25.0	24.5	2	0.0667	29	0.9667
9	25.0	26.0	25.5	1	0.0333	30	1.0000
	mayor de	26.0		0	0.0000	30	1.0000

Fuente: Software Statgraphics.

La tabla muestra una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de LP (MC) en 9 intervalos del mismo ancho y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Gráfico 4. 7 Histograma de frecuencias LP (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

El histograma muestra la frecuencia de los valores dependiendo el intervalo.

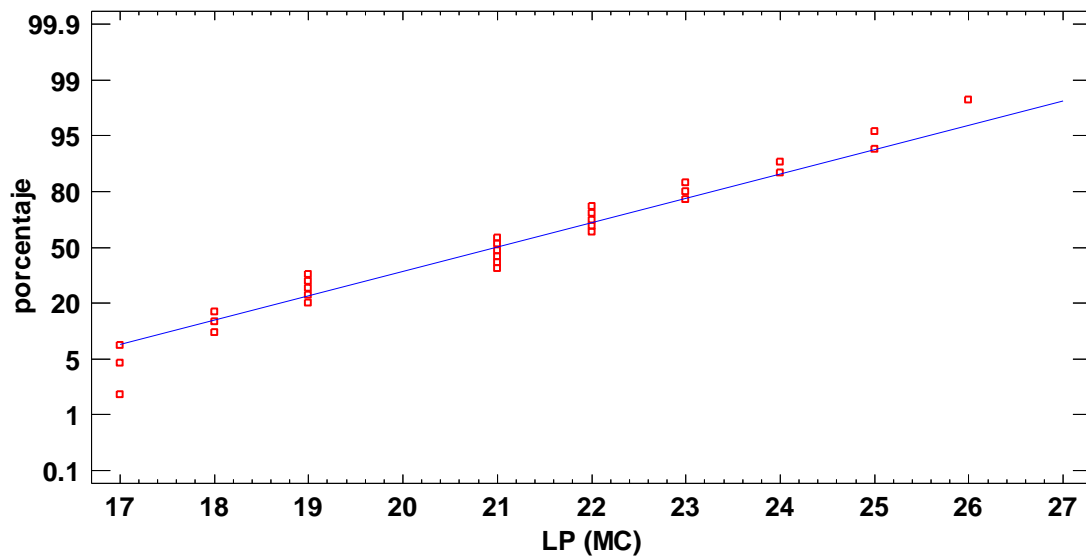
### Intervalos de Confianza para LP (MC)

Intervalos de confianza del 95.0%:

- para la media: 20.9667 +/- 0.948125 [20.0185; 21.9148]
- para la desviación estándar: [2.02217; 3.41338]

Significa que dentro en algún lugar dentro del intervalo se encuentra la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces.

Gráfico 4. 8 Probabilidad normal LP (MC)



Fuente: Software Statgraphics.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los datos son muy próximos a la recta propia de la probabilidad.

### Prueba de Hipótesis para LP (MC)

- Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 45.228

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de LP (MC) es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de LP (MC) es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

- Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula:  $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 186.967

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de LP (MC) es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de LP (MC) es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

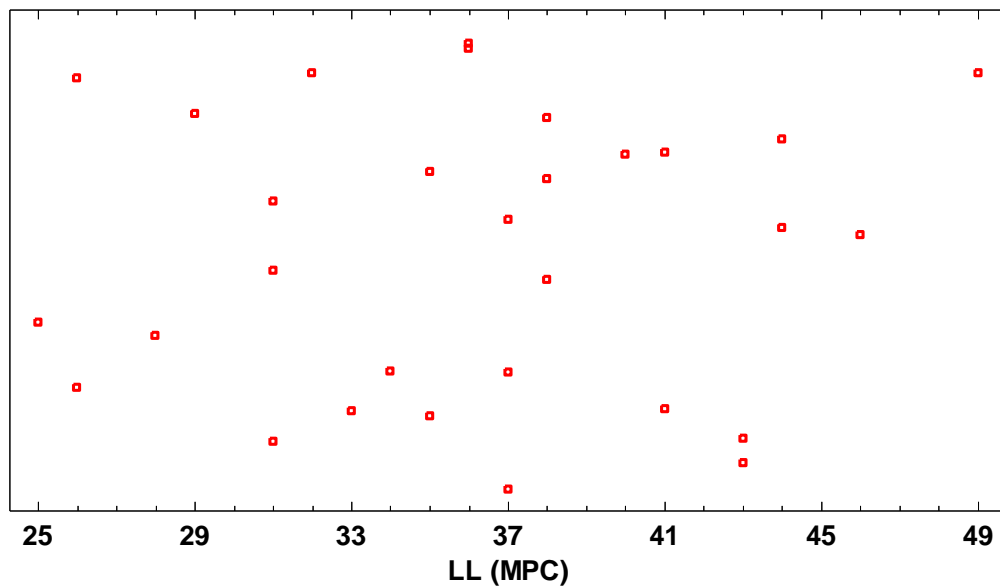
### 4.1.3. Límite líquido (MPC)

Tabla 4. 8 Valores del LL con el penetrómetro de caída (MPC)

LL (MPC)		
38	49	38
37	36	43
29	32	44
28	36	44
34	26	40
26	41	37
25	37	35
31	41	43
31	35	38
33	31	46

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. 9 Dispersión de los valores de LL (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

El gráfico de dispersión representa cada observación por punto sobre la ubicación correspondiente en una escala de medición horizontal. Donde se tiene 30 valores de LL (MPC) con rango de 25 a 49.



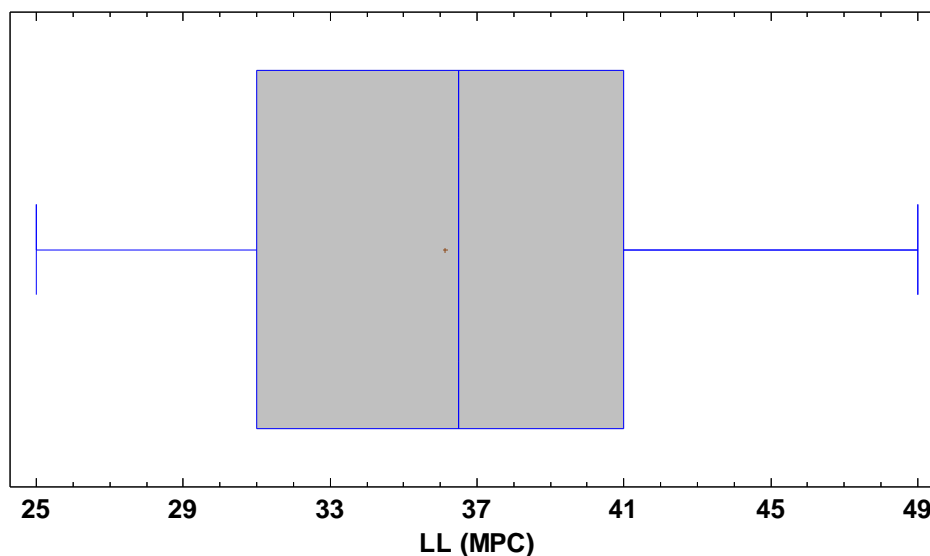
Tabla 4. 9 Resumen Estadístico para LL (MPC)

Número de datos	30
Media	36.1333
Mediana	37.0
Moda	38.0
Varianza	35.6063
Desviación Estándar	6.20196
Coefficiente de Variación	17.1641%
Cuartil Inferior	31.0
Cuartil Superior	41.0
Rango Intercuartílico	10.0

Fuente: Software Statgraphics.

En la tabla se puede observar un resumen de los principales valores estadísticos para el LL (MPC).

Gráfico 4. 10 Caja y bigotes LL (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

En la gráfica de caja y bigote se puede observar la media, mediana y los cuartiles del grupo de datos LL (MPC), también describe cualquier alejamiento de la simetría y la identificación de las observaciones “extremas o apartadas” inusualmente alejadas del cuerpo principal de los datos.

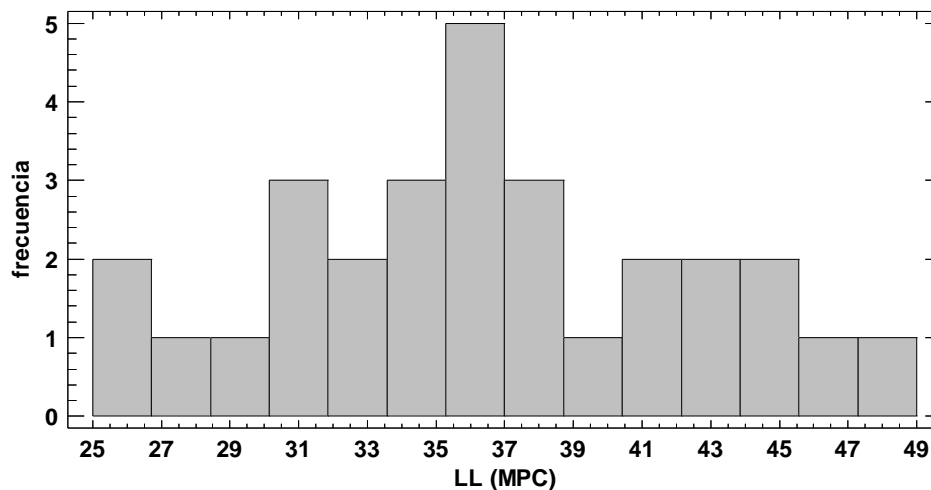
Tabla 4. 10 Tabla de Frecuencias para LL (MPC)

	<b>Límite</b>	<b>Límite</b>			<b>Frecuencia</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Clase</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Punto Medio</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Relativa</b>	<b>Acumulada</b>	<b>Rel. Acum.</b>
	menor o igual	25.0		1	0.0333	1	0.0333
1	25.0	26.7143	25.8571	2	0.0667	3	0.1000
2	26.7143	28.4286	27.5714	1	0.0333	4	0.1333
3	28.4286	30.1429	29.2857	1	0.0333	5	0.1667
4	30.1429	31.8571	31.0	3	0.1000	8	0.2667
5	31.8571	33.5714	32.7143	2	0.0667	10	0.3333
6	33.5714	35.2857	34.4286	3	0.1000	13	0.4333
7	35.2857	37.0	36.1429	5	0.1667	18	0.6000
8	37.0	38.7143	37.8571	3	0.1000	21	0.7000
9	38.7143	40.4286	39.5714	1	0.0333	22	0.7333
10	40.4286	42.1429	41.2857	2	0.0667	24	0.8000
11	42.1429	43.8571	43.0	2	0.0667	26	0.8667
12	43.8571	45.5714	44.7143	2	0.0667	28	0.9333
13	45.5714	47.2857	46.4286	1	0.0333	29	0.9667
14	47.2857	49.0	48.1429	1	0.0333	30	1.0000
	mayor de	49.0		0	0.0000	30	1.0000

Fuente: Software Statgraphics.

La tabla muestra una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de LL (MPC) en 14 intervalos del mismo ancho y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Gráfico 4. 11 Histograma de frecuencia LL (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

El histograma muestra la frecuencia de los valores dependiendo el intervalo.

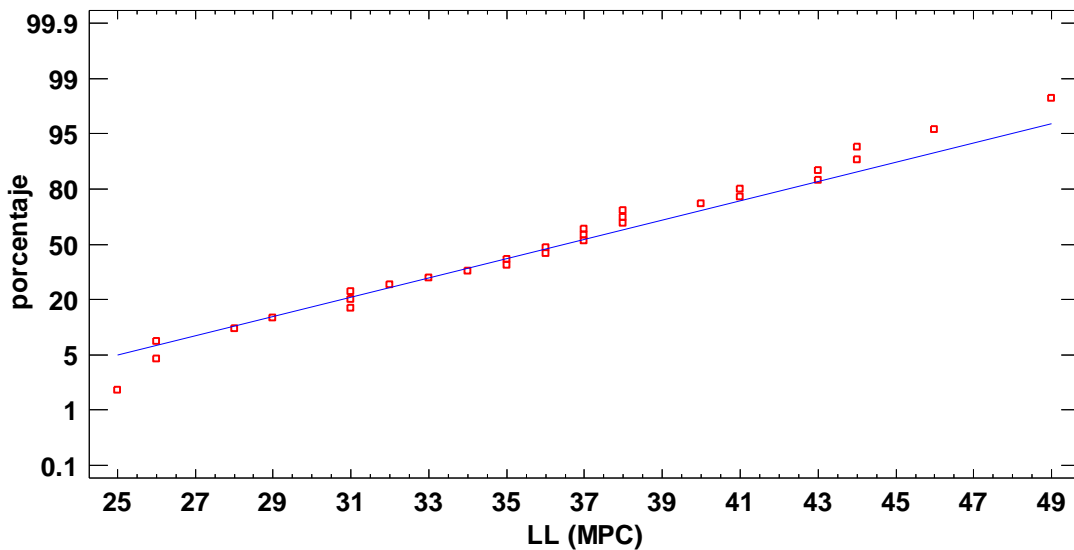
### Intervalos de Confianza para LL (MPC)

Intervalos de confianza del 95.0%:

- para la media: 36.1333 +/- 2.31586 [33.8175; 38.4492]
- para la desviación estándar: [4.93929; 8.33739]

Significa que dentro en algún lugar dentro del intervalo se encuentra la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces.

Gráfico 4. 12 Probabilidad normal LL (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los datos son muy próximos a la recta propia de la probabilidad.

### Prueba de Hipótesis para LL (MPC)

- Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 31.9109

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de LL (MPC) es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de LL (MPC) es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

- Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula:  $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 1115.47

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de LL (MPC) es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de LL (MPC) es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

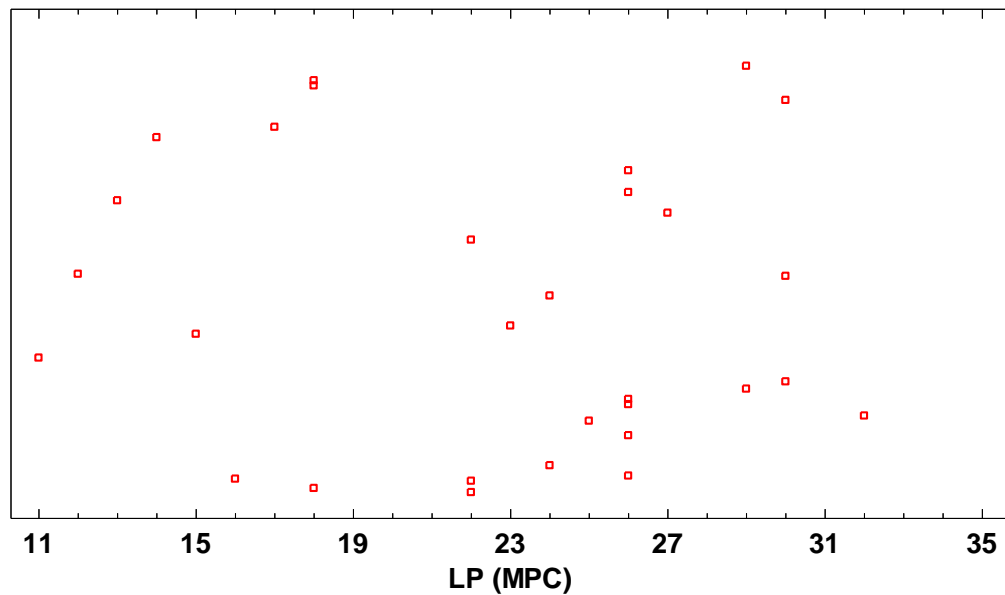
#### 4.1.4. Límite plástico (MPC)

Tabla 4. 11 Valores del LP con el penetrómetro de caída (MPC)

LP (MPC)		
16	26	22
17	18	29
22	26	30
22	24	26
18	13	30
11	30	18
12	24	27
26	26	25
14	29	15
26	23	32

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. 13 Dispersión de los valores de LP (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

El gráfico de dispersión representa cada observación por punto sobre la ubicación correspondiente en una escala de medición horizontal. Donde se tiene 30 valores de LP (MPC) con rango de 11 a 32.

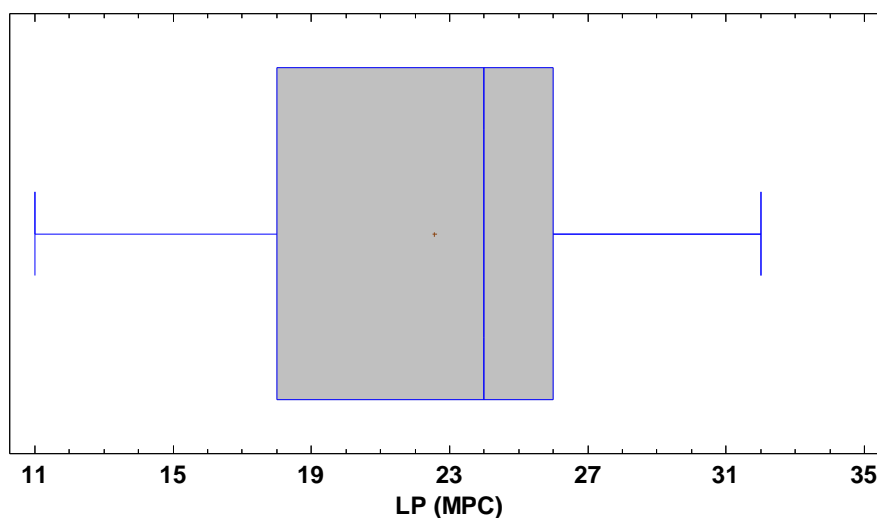
Tabla 4. 12 Resumen Estadístico para LP (MPC)

Número de datos	30
Media	22.5667
Mediana	24.0
Moda	26.0
Varianza	35.9782
Desviación Estándar	5.99818
Coefficiente de Variación	26.5798%
Cuartil Inferior	18.0
Cuartil Superior	27.0
Rango Intercuartílico	9

Fuente: Software Statgraphics.

En la tabla se puede observar un resumen de los principales valores estadísticos para el LP (MPC).

Gráfico 4. 14 Caja y bigotes LP (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

En la gráfica de caja y bigote se puede observar la media, mediana y los cuartiles del grupo de datos LP (MPC), también describe cualquier alejamiento de la simetría y la identificación de las observaciones “extremas o apartadas” inusualmente alejadas del cuerpo principal de los datos.

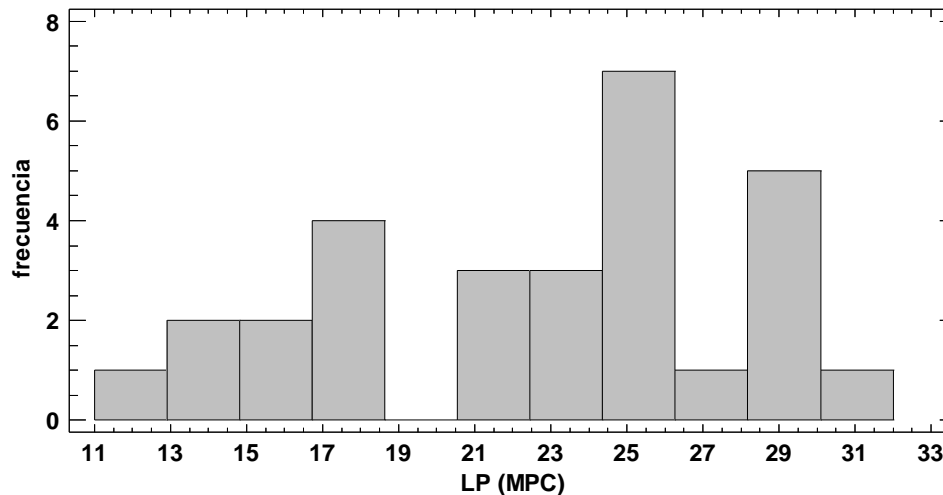
Tabla 4. 13 Tabla de Frecuencias para LP (MPC)

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	11.0		1	0.0333	1	0.0333
1	11.0	12.9091	11.9545	1	0.0333	2	0.0667
2	12.9091	14.8182	13.8636	2	0.0667	4	0.1333
3	14.8182	16.7273	15.7727	2	0.0667	6	0.2000
4	16.7273	18.6364	17.6818	4	0.1333	10	0.3333
5	18.6364	20.5455	19.5909	0	0.0000	10	0.3333
6	20.5455	22.4545	21.5	3	0.1000	13	0.4333
7	22.4545	24.3636	23.4091	3	0.1000	16	0.5333
8	24.3636	26.2727	25.3182	7	0.2333	23	0.7667
9	26.2727	28.1818	27.2273	1	0.0333	24	0.8000
10	28.1818	30.0909	29.1364	5	0.1667	29	0.9667
11	30.0909	32.0	31.0455	1	0.0333	30	1.0000
	mayor de	32.0		0	0.0000	30	1.0000

Fuente: Software Statgraphics.

La tabla muestra una tabulación de frecuencias dividiendo el rango de LP (MPC) en 11 intervalos del mismo ancho y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Gráfico 4. 15 Histograma de frecuencias LP (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

El histograma muestra la frecuencia de los valores dependiendo el intervalo.

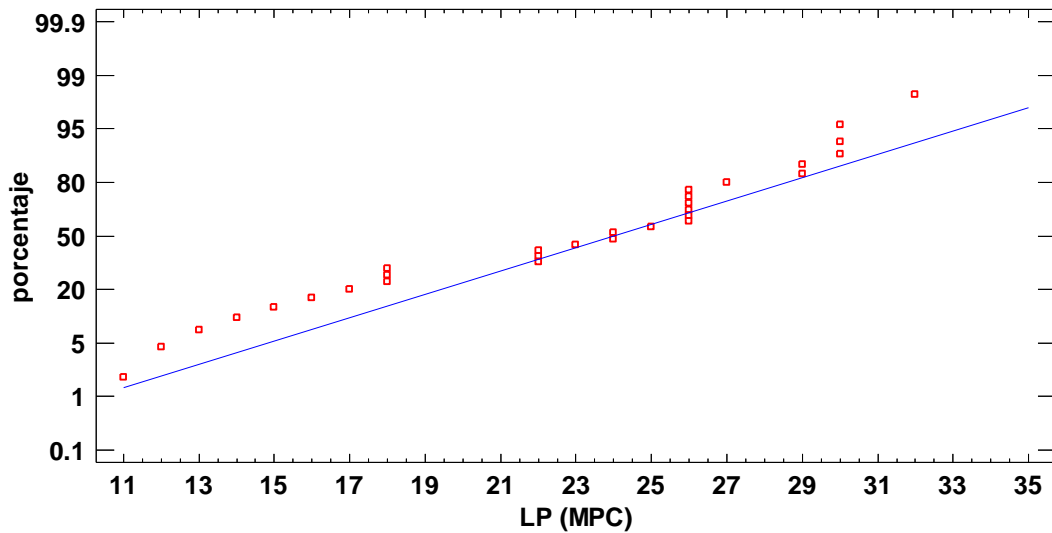
### Intervalos de Confianza para LP (MPC)

Intervalos de confianza del 95.0%:

- para la media: 22.5667 +/- 2.23976 [20.3269; 24.8064]
- para la desviación estándar: [4.77699; 8.06344]

Significa que dentro en algún lugar dentro del intervalo se encuentra la media verdadera ó la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95.0% de las veces.

Gráfico 4. 16 Probabilidad normal LP (MPC)



Fuente: Software Statgraphics.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los datos son muy próximos a la recta propia de la probabilidad.

### Prueba de Hipótesis para LP (MPC)

- Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 20.6067

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.



La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de LP (MPC) es igual a 0.0 versus la hipótesis alterna de que la media de LP (MPC) es no igual a 0.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

- Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula:  $\sigma = 1.0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 1043.37

Valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0.05$ .

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de LP (MPC) es igual a 1.0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de LP (MPC) es no igual a 1.0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.0% de confianza.

## 4.2. Comparación de los valores de límites entre métodos

La comparación de los valores del límite líquido y límite plástico entre ambos métodos, se observan en las siguientes tablas.

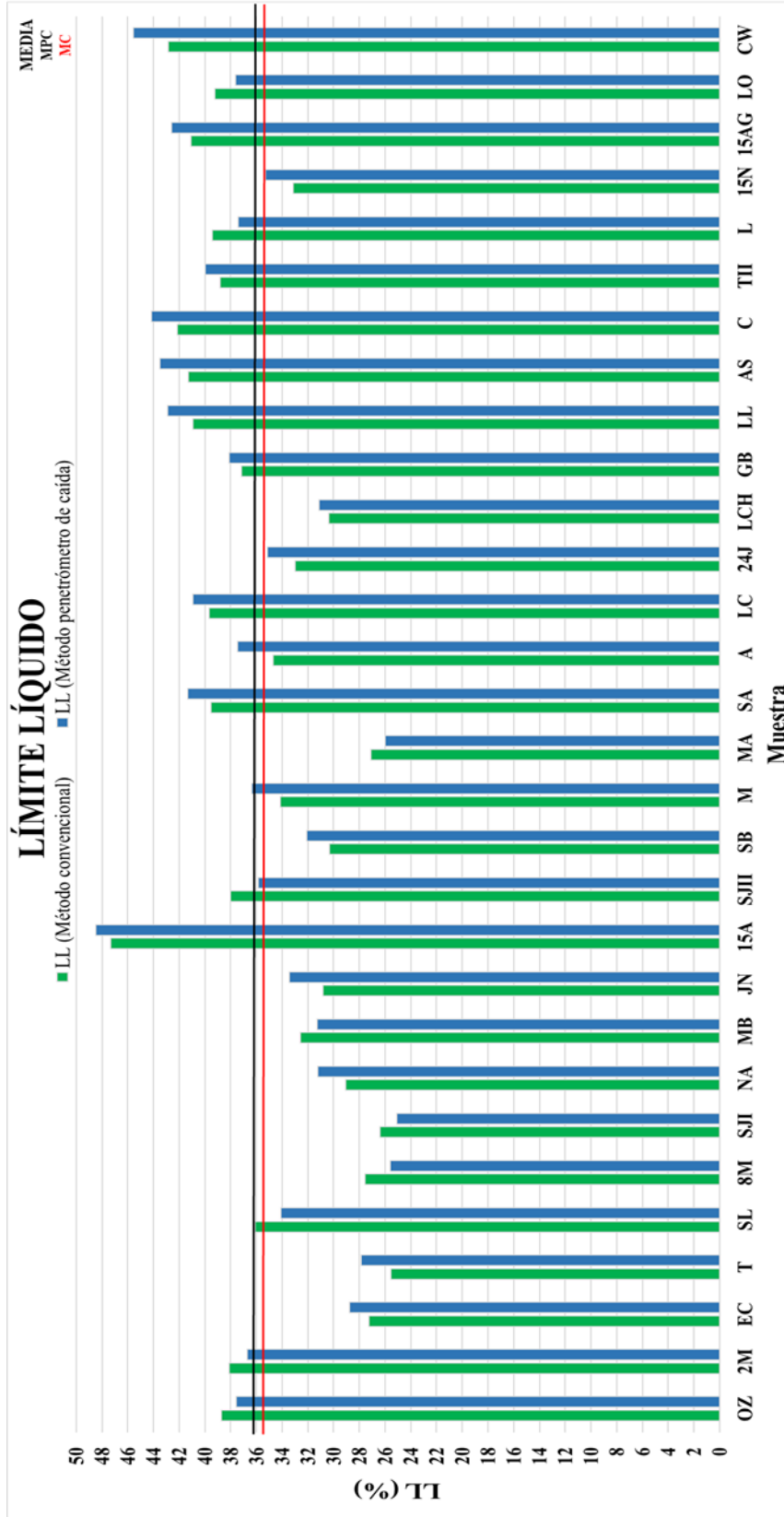
### 4.2.1. LL (MC) y LL (MPC)

Tabla 4. 14 Diferencia de los valores entre métodos LL (MC) y LL (MPC)

Muestra	LL (MC)	LL (MPC)	Variación
OZ	39	38	1
2M	38	37	1
EC	27	29	-2
T	26	28	-2
SL	36	34	2
8M	28	26	2
SJI	26	25	1
NA	29	31	-2
MB	33	31	1
JN	31	33	-3
15A	47	49	-1
SJII	38	36	2
SB	30	32	-2
M	34	36	-2
MA	27	26	1
SA	40	41	-2
A	35	37	-3
LC	40	41	-1
24J	33	35	-2
LCH	30	31	-1
GB	37	38	-1
LL	41	43	-2
AS	41	44	-2
C	42	44	-2
TII	39	40	-1
L	39	37	2
15N	33	35	-2
15AG	41	43	-2
LO	39	38	2
CW	43	46	-3

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. 17 Variación de los valores de LL (MC) Y LL (MPC)



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.17 muestra los valores de la determinación del límite líquido a través del método convencional (MC) con un rango de 26% a 47% con una media de 35,4 y el método penetrómetro de caída (MPC) donde el rango de sus valores es 25% a 49% con una media 36.1333, los cual indica una variación entre medias de 0.7333 y una variación entre sus valores de 1% a 3%.

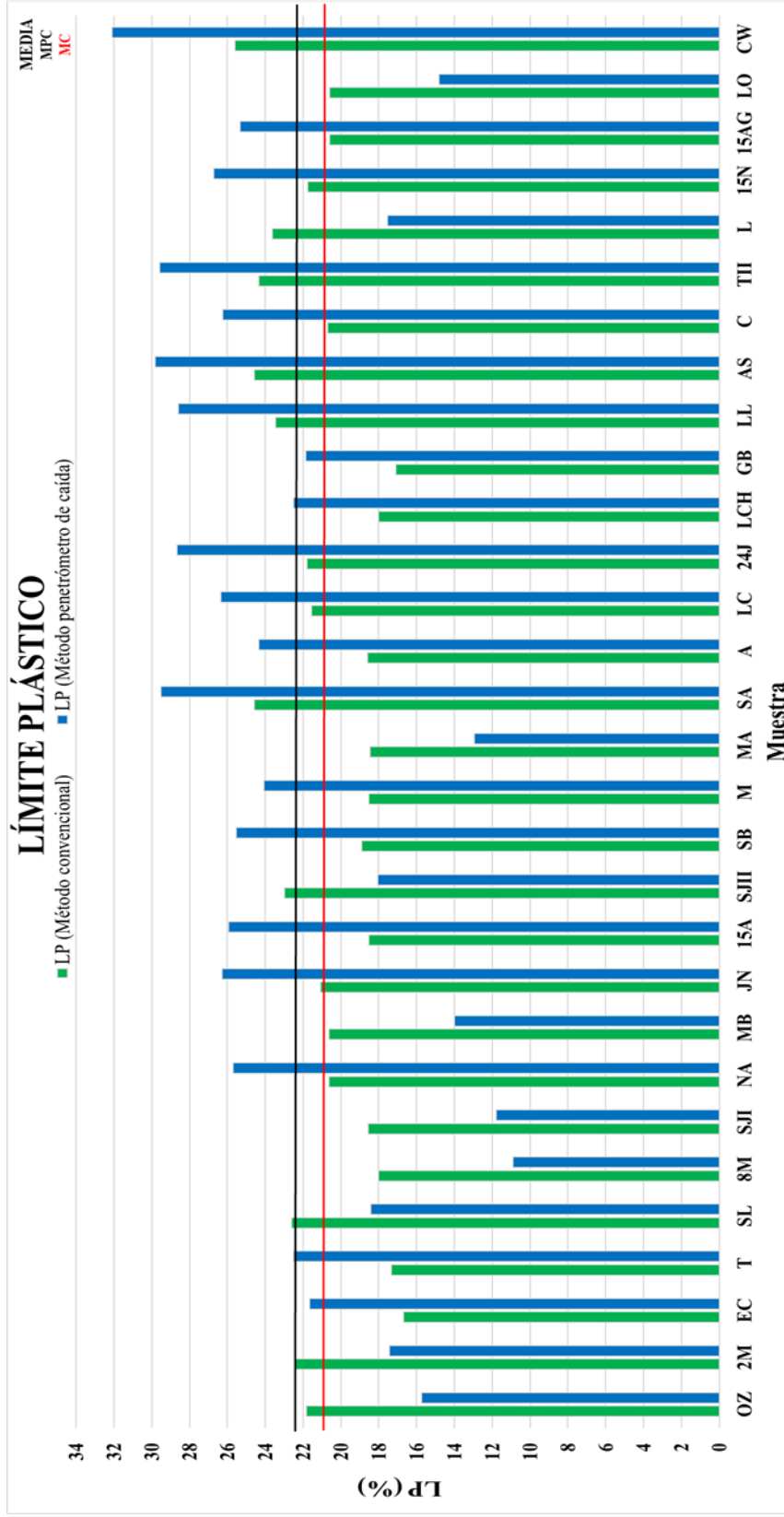
#### 4.2.2. LP (MC) y LP (MPC)

Tabla 4. 15 Diferencia de los valores entre métodos LP (MC) y LP (MPC)

Muestra	LP (MC)	LP (MPC)	Variación
OZ	22	16	6
2M	22	17	5
EC	17	22	-5
T	17	22	-5
SL	23	18	4
8M	18	11	7
SJI	19	12	7
NA	21	26	-5
MB	21	14	7
JN	21	26	-5
15A	19	26	-7
SJII	23	18	5
SB	19	26	-7
M	19	24	-6
MA	18	13	6
SA	25	30	-5
A	19	24	-6
LC	22	26	-5
24J	22	29	-7
LCH	18	23	-5
GB	17	22	-5
LL	23	29	-5
AS	25	30	-5
C	21	26	-6
TII	24	30	-5
L	24	18	6
15N	22	27	-5
15AG	21	25	-5
LO	21	15	6
CW	26	32	-7

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. 18 Variación de los valores de LP (MC) Y LP (MPC)



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4.18 muestra los valores de la determinación del límite plástico a través del método convencional (MC) con un rango de 17% a 26% con una media de 20.9667 y el método penetrómetro de caída (MPC) donde el rango de sus valores es 11% a 32% con una media 22.5667, los cual indica una variación entre medias de 1.6 y una variación entre sus valores de 4% a 7%.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Culminado la investigación se llega a las siguientes conclusiones:

Con respecto al problema:

1. La eficiencia que tiene el penetrómetro de caída a diferencia de la copa de Casagrande, es un método más exacto, debido a que la norma británica exige precisión donde la diferencia de penetración entre los 3 puntos debe ser menor a 1 mm.

Con respecto a los objetivos:

2. Todas las arcillas que se involucraron en la investigación fueron recolectadas de la ciudad de Tarija, donde según los valores se clasificaron como baja plasticidad (CL) a suelos que tienen un LL menor a 50%.
3. Se realizaron pruebas de hipótesis los cuales garantizan que los valores obtenidos tienen un 95% de confianza y un nivel de significancia del 5%.
4. Se logra determinar los valores del límite líquido entre las variables copa de Casagrande (MC) y penetrómetro de caída (MPC), los mismos se comparan obteniendo una variación de 1% a 3% por lo tanto, se determina que el método penetrómetro de caída según la norma británica BS 1377:1990 es factible y se puede emplear como un método alternativo para el cálculo del límite líquido en nuestro medio.
5. Se determinan los valores del límite plástico mediante el método convencional (MC) y método penetrómetro de caída (MPC), los cuales se comparan obteniendo una variación de 4% a 7%, se establece que la alta variación es debido a que el uso del método no está establecido por ninguna norma y se basa en una investigación de Wood & Wroth (1978).



6. El penetrómetro de caída es sensible a la humedad, debido a la gran variación de los valores del límite plástico por el método penetrómetro de caída, donde influye directamente al IP y su clasificación, se determina que los suelos de los puntos EC, T, NA, JN, SB, SA, LC, 24J, LL, AS, TII, 15N y CW dejan de ser CL.
7. El penetrómetro de caída tiene la ventaja de ser un equipo automático y los ensayos son estáticos, por lo tanto, la intervención del operador es mínima proporcionando resultados más acertados.
8. La copa de Casagrande introduce efectos dinámicos siendo más susceptible a discrepancias entre diferentes operadores, dependiendo de la destreza, habilidad y experiencia del operador.
9. El método de la mano o rollitos es un método muy subjetivo, depende de la destreza, habilidad y experiencia, debido a que la intervención del operador implica la mayor parte del ensayo.
10. La inversión económica del penetrómetro de caída es 3 veces mayor al de la copa de Casagrande.
11. El método penetrómetro de caída es nuevo en nuestro entorno, el equipo es automático, tecnológico y actualizado implicando que el operador se relacione con: su funcionamiento, uso, procedimiento del ensayo, la norma que lo respalda BS 1377:1990 y los resultados que proporciona respecto al método convencional (MC).

## 5.2. Recomendaciones

1. Durante el ensayo con la copa de Casagrande el golpeteo de la copa deberá ser 2 golpes por segundo como indica la norma, para no alterar el valor del límite líquido.
2. El laboratorista debe estar pendiente a la aparición de las fisuras que se presentan en los rollitos de 3.2 mm y pesarlos inmediatamente para evitar perder humedad y obtener una mínima diferencia de resultados del límite plástico.
3. El tiempo de penetración del penetrómetro de caída debe ser 5 segundos como indica la norma BS 1377:1990.
4. La precisión del penetrómetro de caída se influye por la punta del mismo, por lo que se debe evitar golpear o rallar para no obtener resultados incorrectos.
5. Antes de colocar el suelo en el molde, con ayuda de la espátula se debe acomodar la muestra en el plato, eliminando burbujas o espacios vacíos, esto impide que la diferencia de puntos sea menor a 1 mm.
6. Si la diferencia entre la primera y segunda lecturas de penetración menor que 0.5 mm, se debe promediar las dos penetraciones. Si la segunda penetración es mayor que 0.5 mm, diferente de la primera realizar una tercera penetración. Si el intervalo general es menor a 1 mm, anotar el promedio de las tres penetraciones. Si la diferencia es mayor a 1 mm se debe retirar la muestra del molde, volver a mezclar y envasar de nuevo.
7. De acuerdo a los resultados de comparación entre los métodos existe una alta variación en el límite plástico del método penetrómetro de caída de Wood y Wroth (1978), siendo necesario ampliar la investigación.