

**CAPÍTULO I**  
**DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

# CAPÍTULO I

## DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

### 1.1. ANTECEDENTES

El suelo es aquel material no consolidado formado por la desintegración de la roca y la acumulación de distintos materiales a lo largo de los siglos, en un proceso que involucra numerosas variantes físicas, químicas y biológicas, en la naturaleza, el suelo está presente en forma de capas y cada capa tiene su propio conjunto de propiedades que lo hace diferente de las capas superiores o inferiores (Gupta, Alam, y Muzzammil. 2016) , existen diferentes tipos de suelos, entre las cuales se tiene las arcillas que son producto de dichos procesos, la misma se caracteriza por tener granos finos amarillentos que retienen muy bien el agua.

La Permeabilidad del suelo, es una de las propiedades del suelo que permite que el agua pase a través de los vacíos de interconexión (Gupta et al. 2016), el agua ejerce presión sobre el material poroso a través del cual circula, esta presión se conoce como presión de filtración, donde se produce un roce entre el agua y las paredes de los granos o componentes solidos del suelo, que conforman canalillos por donde el agua se mueve, (Caballero, 2001), su importancia radica en que relaciona la velocidad del flujo en una determinada área. El parámetro que controla la permeabilidad de los suelos es el tamaño de grano (Nagaraj, Pandian, y Narashimha Raju 1993), al mismo tiempo la conductividad hidráulica de un suelo depende también de la conectividad de los poros dentro del material (Lambe, T y Whitman. 1991), de su tortuosidad, las proporciones de huecos y la densidad relativa, los cuales forman parte de los parámetros que permiten la filtración a través de un suelo (Haigh, Eadington, y Madabhushi 2012). Sin embargo, la permeabilidad del suelo también depende de varios factores adicionales, como la temperatura, la presión atmosférica y la absorción (Warrick 2003).

El propósito de esta investigación es estimar valores factibles del coeficiente de permeabilidad "k", por medio del edómetro a través de una comparación de los resultados de este con el método de carga variable.

Es de menester importancia mencionar algunos trabajos previos relacionados con la presente investigación; el aporte teórico del presente trabajo de investigación, se basa

principalmente en la Ley de Henry Darcy 1856, la cual establece que el caudal que atraviesa la muestra es linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico (DARCY 1856), y fue deducida como una universalización aplicable al cálculo del flujo de agua por medio de filtros de arena; asimismo la permeabilidad se encuentra estrechamente relacionada con la consolidación de un suelo, razón por lo cual se utilizó la ecuación  $k = C_v * m_v * \gamma_w$ , propuesta por KARL TERZAGHI en su teoría de consolidación, misma que fue utilizada para estimar el coeficiente de permeabilidad a partir del ensayo edométrico. (Terzaghi y Peck S. F. 1973)

Todas las investigaciones que se realizaron para determinar el coeficiente de permeabilidad, aplicado en diferentes proyectos en la ingeniería civil, es de singular importancia razón por la cual se analiza y se desarrolla esta investigación, debido a que constantemente enfrentamos diversos problemas de cimentación considerando que el suelo, es el que sustentará el peso de toda la estructura y si este no cumple con ese objetivo la estructura sufrirá asentamientos.

Esto nos lleva a especular qué tan importante e indispensable es la utilización de valores certeros del coeficiente de permeabilidad "k" en suelos finos, tomando en cuenta que la investigación se realizó en el departamento de Tarija, provincia Cercado, donde predomina la existencia de suelos arcillosos en diferentes zonas principalmente en lugares destinados al crecimiento poblacional; las muestras para la caracterización e investigación fueron extraídas de los barrios: San Jorge II, La Terminal, San Blas, Constructor, Los Chapacos.

## **1.2. SITUACIÓN PROBLÉMICA**

En el departamento de Tarija, en la actualidad es común que no se realicen ensayos de permeabilidad al momento de efectuar un estudio de suelos, debido a que los ingenieros no tienen esa cultura de realizar los ensayos de permeabilidad, considerando que este conlleva una demanda de tiempo, en el cual muchas veces en los estudios geotécnicos, no se cuenta con el tiempo para realizar estos ensayos.

En particular la permeabilidad es un parámetro de fundamental importancia, y si este no se analiza ni se desarrolla, en un futuro se tendrá un análisis de vulnerabilidad relacionados con los riesgos de estabilidad de las estructuras geotécnicas.

Conscientes de la situación, lo que se pretende con este trabajo de investigación es poder introducir un método viable para determinar la permeabilidad de manera más rápida, y la misma sirva de apoyo para que los ingenieros puedan desempeñar cómodamente este ensayo.

### **1.2.1. Problema**

¿Cuál es la confiabilidad del método edométrico en comparación con el ensayo de carga variable aplicado en arcillas, considerando las propiedades físicas que gobiernan este fenómeno en este tipo de suelo, de la ciudad de Tarija?

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

Los suelos arcillosos son considerados poco permeables debido a la concentración iónica y el espesor de las capas de agua adheridas a las partículas de las mismas, razón por la cual se ha dejado de tomar en cuenta esta propiedad al momento de realizar un estudio de suelo; previa a la ejecución de cualquier obras civil, se debe considerar la importancia de realizar un estudio de permeabilidad para poder evitar problemas de socavación en los suelos puesto que los mismos actúan de soporte sobre los que se apoya una obra civil.

Este trabajo de grado pretende realizar una comparación entre el método de carga variable y el ensayo de consolidación para las arcillas presentes en la ciudad de Tarija, el recurso que se desea alcanzar es una metodología más rápida, económica y confiable entre ambos ensayos.

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

#### Delimitación de tiempo

Este trabajo se desarrolló, en el segundo periodo de la gestión 2019, llevando a cabo las respectivas investigaciones bibliográficas que nos permiten dar una opinión crítica al diseño, montaje, elaboración de ensayos y análisis de resultados.

#### Delimitación de factibilidad

Se logró acceder a todos los recursos necesarios, para desarrollar esta investigación, tales como el laboratorio de suelos, para realizar la caracterización del suelo, como también los equipos necesarios para los ensayos de permeabilidad y consolidación, asimismo se logró obtener las muestras de acuerdo a la norma establecida, el trabajo se desarrolló de manera satisfactoria con lo que se pudo alcanzar las metas y a la vez los objetivos propuestos.

#### Delimitación de espacio

Se llevó a cabo la extracción de muestras en los siguientes barrios de la ciudad de Tarija: Torrecillas, San Blas, Constructor, Los Chapacos y San Jorge II; los suelos fueron caracterizados física y mecánicamente, en los laboratorios de la Universidad Juan Misael Saracho.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación busca realizar una comparación de los resultados del coeficiente de permeabilidad  $k$ , obtenidos de forma directa e indirecta a través del método de carga variable y el ensayo de consolidación unidimensional; se considera necesario realizar esta investigación debido a la falta de estudios de suelos relacionados a la permeabilidad, puesto que no se cuenta con investigaciones que brinden resultados fiables y factibles del coeficiente de permeabilidad  $k$ , en suelos finos.

Para definir la fiabilidad del método edométrico, mediante la comparación entre los dos métodos en estudio, al momento de determinar el coeficiente de permeabilidad, se debe considerar que en toda la bibliografía presente de la mecánica de suelos, los valores de los coeficientes de permeabilidad muestran rangos amplios dando una clasificación muy general del suelo, para lo cual en este caso, el tipo de los suelos son arcillas; por ejemplo

MH, ML, CL, CH, y el rango de los valores del coeficiente de permeabilidad varían desde  $1 \times 10^{-5}$  hasta  $1 \times 10^{-11}$  (Anón, 2006).

Razón por la cual se pretende determinar rangos más discretos para cada valor del coeficiente de permeabilidad correspondiente a cada tipo de arcilla.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Comparar los valores de permeabilidad en muestras de arcilla obtenidos mediante ensayos de carga variable y edométrico, para garantizar la fiabilidad de los resultados del edómetro, considerando las propiedades físicas de este tipo de suelo, a través de un análisis estadístico.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Se realizó la revisión bibliográfica correspondiente a conceptos fundamentales de suelos, permeabilidad y la teoría de consolidación unidimensional.
- Se caracterizó las muestras de suelos arcillosos mediante ensayos de laboratorio.
- Se efectuó la determinación de la permeabilidad de suelos arcillosos mediante el método de carga variable y el ensayo de consolidación unidimensional en arcillas a través del método de Taylor.
- Se realizó un estudio de validación de resultados a través del análisis estadístico de resultados.

## **1.5. HIPÓTESIS**

La aplicación de un análisis estadístico para comparar, los resultados del ensayo carga variable y edométrico para determinar la permeabilidad, teniendo en cuenta las propiedades físicas de la arcilla en la ciudad de Tarija, permitirá obtener valores factibles de permeabilidad mediante el edómetro en menor tiempo.

## **1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **1.6.1. Variable independiente**

Propiedades de suelos finos

### **1.6.2. Variable dependiente**

Coeficiente de permeabilidad “k”.

Consolidación

### 1.6.3. Conceptualización y operacionalización de las variables

**Tabla 1.** Conceptualización y operacionalización de las variables independientes.

Variable independiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor - Acción técnica
Propiedades de los suelos finos.	Se refieren a las características físicas y mecánicas que presentan los suelos finos.	Contenido de Humedad	Contenido de agua presente en el suelo. “%”	Método del Horno
		Límites de Atterberg.	Plasticidad del suelo.	Método de Casa Grande.
		Granulometría	Contenido de arcilla y limo presente en el suelo	Método del Hidrómetro.
		Clasificación	Descripción del tipo de suelo	SUCS. AASHTO.
		Peso específico.	Relación entre el peso y volumen g/cm <sup>3</sup>	Método calibración del frasco volumétrico.

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 2.** Conceptualización y operacionalización de las variables dependiente

Variable dependiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor –Acción técnica
Permeabilidad	Propiedad del suelo que permite que el agua pase a través de los vacíos de interconexión	Método de carga variable	Prueba permeámetro pared flexible "cm/s"	Coefficiente de permeabilidad "k".
Consolidación	Proceso de reducción de volumen de los suelos finos cohesivos provocado por la actuación de solicitaciones (cargas) sobre su masa y que ocurre en el transcurso de un tiempo.	Método de Taylor	Prueba de consolidación unidimensional.	Coefficiente de consolidación "Cv".

Fuente: Elaboración propia

### 1.7. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es explicativa, teniendo en cuenta que el presente trabajo, trata de explicar el comportamiento del valor del coeficiente de permeabilidad obtenido en el laboratorio a través del método de carga variable y el ensayo de consolidación unidimensional y comparativo correlacional, porque usará la estadística para determinar la confiabilidad del método edométrico.

## **1.8. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL**

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

Se realizó el estudio en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, de los cuales se obtuvo la información que es necesaria para poder clasificar el suelo, poder determinar la consolidación y la permeabilidad a través del método de carga variable, así mismo la permeabilidad mediante en el ensayo de consolidación unidimensional.

Para caracterizar las propiedades de los suelos en estudio, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

Determinación en laboratorio del contenido de agua ASTM D2216.

Determinación del límite plástico ASTM D4318; AASHTO T90.

Determinación del límite líquido de los suelos ASTM D4318; AASHTO T89

Determinación del peso específico de los suelos ASTM D854; AASHTO T100

Análisis granulométrico por medio del hidrómetro ASTM D422

Clasificación de suelos para ingeniería ASTM D2487

Para determinar el coeficiente de permeabilidad, se utilizó el método de carga variable que está basado en el ensayo de permeabilidad para suelos granulares carga constante, el cual esta normado por la ASTM D2434; AASHTO T215; así mismo se determinó la permeabilidad de forma indirecta a través del ensayo de consolidación unidimensional de los suelos normado por la ASTM D2435; AASHTO T216.

### **1.8.2. Población**

La población en el presente trabajo de investigación estará representada por los suelos finos presentes en el valle central de Tarija, mismos que se denomina infinitos puesto que representa el conjunto o totalidad de elementos sobre los que se estudia y la muestra será la cantidad que se calcule a continuación.

Se requiere determinar la cantidad de ensayos para caracterizar los suelos y determinar el coeficiente de permeabilidad  $k$ .

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

Donde:

n= Es el tamaño de la muestra.

N<sub>i</sub>= Es el tamaño de cada estrato de la población.

N= Es el tamaño de la población total.

Z<sup>2</sup>= Distribución normal para un nivel de confianza del 95%, 1.96.

σ<sup>2</sup> = Es la varianza estimada del evento de estudio, 0,1.

e<sup>2</sup>= Error máximo admisible para la estimación, ± 5 %

**Tabla 3.** Tamaño de la muestra

<b>Tipos</b>	<b>Etapa</b>	<b>Ensayos</b>	<b>Ni</b>	<b>G<sup>2</sup></b>	<b>Ni*G<sup>2</sup></b>	<b>fi</b>	<b>ni</b>
Suelos arcillosos (búsqueda de los 5 tipos de suelos finos).	Caracterización	Contenido de humedad	10	0,1	1	0,091	6
		Granulometría	10	0,1	1	0,091	6
		Límites de Atterberg	10	0,1	1	0,091	6
Propiedades de la arcilla	Caracterización	Contenido de humedad	5	0,1	0,5	0,045	3
		Granulometría	5	0,1	0,5	0,045	3
		Límites de Atterberg	5	0,1	0,5	0,045	3
		Peso específico	5	0,1	0,5	0,045	3
Coeficiente de Permeabilidad k	Permeabilidad k	Carga variable	30	0,1	3	0,273	17
	Permeabilidad k	Consolidación unidimensional.	30	0,1	3	0,273	17
Total			114		11	1	64

Fuente: Elaboración propia

Efectuando el análisis correspondiente se ha establecido que la muestra llega a un número de 64 ensayos.

### **1.8.3. Muestra**

Las muestras fueron obtenidas de la población en un número representativo, el cual era adecuado para la representación de la misma; las mismas fueron ensayadas en los laboratorios de la Universidad Juan Misael Saracho, como base fundamental para la investigación presente.

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

Es un muestreo aleatorio puesto que cada elemento de la población es finita, la cual tiene una probabilidad de ser seleccionada para la muestra, esto marcando un área donde se encuentran dichas muestras y elegir las aleatoriamente sin discriminación alguna.

## **1.9. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

### **1.9.1. Métodos deductivos.**

Se empleó este método, al momento de analizar la herramienta principal deducida como la ecuación  $k = C_V * m_v * \gamma_w$  propuesta por terzaghi en 1965, la cual ha permitido obtener la permeabilidad de manera indirecta, misma que fue aplicada a las diferentes muestras de arcillas de la Ciudad de Tarija, a su vez es necesario poder validar la mencionada ecuación, realizando un análisis de comparación de los resultados con los obtenidos por el método de carga variable.

### **1.9.2. Técnicas de muestreo**

La bibliografía revisada está concentrada básicamente en el estudio de los conceptos y metodología para definir la permeabilidad, la teoría de consolidación y el estudio de las propiedades de los suelos finos.

La caracterización de los suelos se realizó a través de un estudio de muestreo para determinar las muestras de suelos, que éstas posteriormente fueron ensayadas en laboratorio para obtener sus características físicas y mecánicas; posteriormente se realizó

los ensayos de permeabilidad de carga constante y paralelamente se efectuó el ensayo de consolidación unidimensional.

#### **1.10. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Desarrolladas las pruebas de laboratorios en cuanto a la caracterización y propiedades de los suelos, se procedió a un trabajo de gabinete que consistía en tabular e interpretar los datos obtenidos; asimismo a través de los ensayos de laboratorio se pudo obtener las propiedades de suelo en función a sus relaciones volumétricas y además todo lo que se refiere a la estadística descriptiva e inferencial.

#### **1.11. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

En esta investigación para el desarrollo experimental se obtuvieron muestras de suelos finos ubicadas en distintas zonas de la ciudad de Tarija provincia Cercado.

Las muestras fueron identificadas mediante los sistemas: AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS).

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se utilizaron muestras de suelo inalterados de acuerdo a la norma española NL T203 propuesta por el consejo superior de investigaciones científicas (CSIC). Se realizaron 25 ensayos de permeabilidad por el método de carga variable y 25 ensayos de consolidación por el método de Taylor. Se debe considerar que las muestras ensayadas estaban constituidas entre los suelos: CH, MH, CL, ML y CL-ML.

Mediante un análisis estadístico se verificó la confiabilidad de los datos obtenidos del ensayo de permeabilidad de manera directa (Carga Variable) e indirecta (Consolidación), para establecer una comparación entre los resultados y verificar la correlación entre ambos métodos.

**CAPÍTULO II**

**ASPECTOS GENERALES DE LA**

**PERMEABILIDAD Y CONSOLIDACIÓN DE**

**LOS SUELOS**

## **CAPÍTULO II**

### **ASPECTOS GENERALES DE LA PERMEABILIDAD Y CONSOLIDACION DE LOS SUELOS**

#### **2.1. CONCEPTO DE SUELO**

Para propósitos de ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica, compuesta por partículas sólidas con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y con cimientos estructurales. Por lo tanto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como el origen, la distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga. La mecánica de suelos es la aplicación de la ciencia física que se ocupa del estudio de las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de las masas de suelos sometidos a diferentes tipos de fuerzas. La ingeniería de suelos es la aplicación de los principios de la mecánica de suelos a problemas prácticos. (Braja, 2013)

#### **2.2. TIPOS DE SUELO**

##### **2.2.1. Suelos residuales**

Los suelos residuales se encuentran en zonas donde la tasa de meteorización es mayor que la velocidad a la que los materiales intemperizados son llevados lejos por los agentes de transporte.

La tasa de meteorización es mayor en las regiones cálidas y húmedas en comparación con las regiones más frías y más secas y, dependiendo de las condiciones climáticas, el efecto de la intemperie puede variar ampliamente. (Braja, 2013)

##### **2.2.2. Suelos transportados**

Los suelos residuales en una pendiente natural pronunciada se mueven lentamente hacia abajo, lo que se conoce generalmente como fluencia. Cuando el movimiento descendente del suelo es repentino y rápido, se le llama deslizamiento de tierra. Los depósitos de suelo

formados por deslizamientos de tierra son coluviales. Los flujos de lodo son un tipo de suelo transportado por gravedad. En este caso los suelos residuales arenosos sueltos altamente saturados, en pendientes relativamente planas se mueven hacia abajo como un líquido viscoso y vienen a descansar en una condición más densa. Los depósitos de suelo derivados de flujos de lodo son muy heterogéneos en su composición. (Braja, 2013)

### **2.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.**

Existe una gran variedad de suelos con características diferentes, por lo que se los clasifica en diferentes categorías y tipos. Las propiedades índices del suelo, se refiere a las características particulares que identifican a un suelo de una misma categoría, estas son: granulometría, consistencia, cohesión y estructura. Conociendo toda esta información del suelo, se puede anticipar su comportamiento y la metodología que se seguirá al tratar con aquel tipo de suelo. (Campos, 2005)

#### **2.3.1. Granulometría**

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. Para describir los suelos por su tamaño de partícula, varias organizaciones han desarrollado límites de separación de tamaño de suelo. Tabla 5, 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 el sistema del MIT se presenta solo a modo de ejemplo, ya que juega un papel importante en la historia del desarrollo de los límites de separación de tamaño de suelo. Sin embargo, en la actualidad el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado y ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

Las gravas son fragmentos de rocas con partículas ocasionales de cuarzo, feldespatos y otros minerales. En las partículas de arena predominan el cuarzo y el feldespato. A veces también pueden estar presentes granos de otros minerales.



Los limos son las fracciones microscópicas del suelo que consisten en fragmentos de cuarzo muy finos y algunas partículas en forma laminar que son fragmentos de minerales micáceos.

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 5, 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 también. Las partículas se clasifican como arcilla sobre la base de su tamaño, ya que no pueden contener necesariamente minerales de arcilla. Arcillas se definen como partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua”. (Grim, 1953)

La plasticidad es la propiedad de las arcillas, parecida a la masilla, cuando contienen una cierta cantidad de agua. Suelos no arcillosos pueden contener partículas de cuarzo, feldespato, mica o son lo suficientemente pequeños como para estar dentro de la clasificación de tamaño de arcilla. Por lo tanto, esto es apropiado para partículas de suelo más pequeñas que  $2\ \mu$  o de  $5\ \mu$ , como se ha definido bajo diferentes sistemas, a las que se llamará partículas de tamaño de arcilla en lugar de arcilla. Las partículas de arcilla son en la mayoría de su intervalo de tamaño coloidal ( $<1\ \mu$ ), y  $2\ \mu$  parece ser el límite superior. (Braja, 2013)

**Tabla 4.** Límites de separación de tamaño de suelo

Nombre de la organización	Tamaños de grano (mm)			
	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)	>3	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (Limos y arcillas <0,075)	

Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

### 2.3.1.1. Análisis granulométrico con mallas

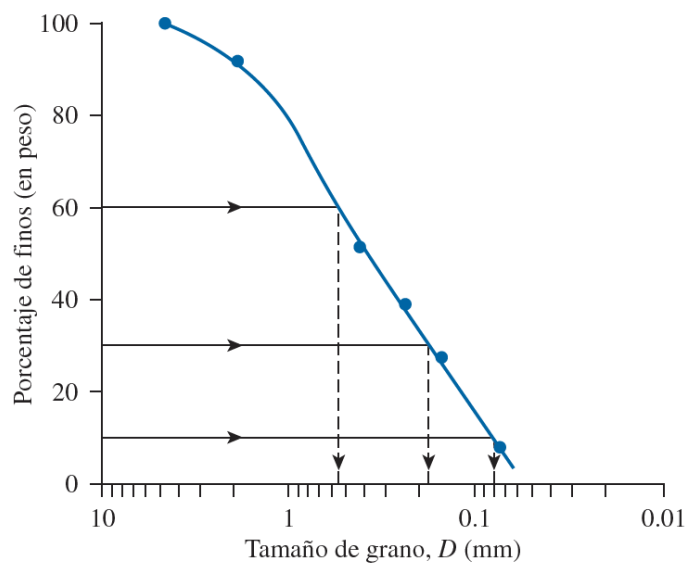
Un análisis granulométrico con mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco bien pulverizado y haciéndolo pasar a través de un apilo de mallas con aberturas cada vez más pequeñas que dispone de una charola en su parte inferior. Se mide la cantidad de suelo retenido en cada malla y se determina el porcentaje acumulado del suelo que pasa a través de cada una. A este porcentaje se le refiere por lo general como porcentaje de finos. La Tabla 6 contiene una lista de los números de mallas utilizadas en Estados Unidos y en nuestro país y el tamaño correspondiente de sus aberturas. Estas mallas son de uso común para el análisis de suelos para fines de su clasificación.

**Tabla 5.** Tamaños de mallas estándar en EE.UU.

Malla numérica	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: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

**Figura 1.** Curva de la distribución granulométrica de un suelo de grano grueso obtenida en un análisis con mallas.



Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

Se pueden determinar dos parámetros a partir de las curvas de distribución granulométrica de suelos de grano grueso: El coeficiente de uniformidad, ( $C_u$ ) y el coeficiente de graduación, o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ). Estos coeficientes son:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{(D_{60})(D_{10})}$$

Donde:

$D_{10}$ = Tamaño tal, que pasa el 10 % del suelo

$D_{30}$ = Tamaño tal, que pasa el 30 % del suelo

$D_{60}$ = Tamaño tal, que pasa el 60 % del suelo

### **2.3.1.2. Análisis hidrométrico**

El análisis hidrométrico se basa en el principio de sedimentación de las partículas de un suelo en agua. Esta prueba comprende utilizar 50 gramos de suelo seco y pulverizado. Al suelo siempre se le agrega un agente defloculante. El agente defloculante más común empleado para el análisis hidrométrico es 125 cc de una solución al 4 % de hexametáfosfato de sodio. Se deja que el suelo se sature con el agente defloculante durante al menos 16 horas. Después del periodo de saturación, se agrega agua destilada y se agita muy bien la mezcla de suelo y el agente defloculante. Luego la muestra se transfiere a un cilindro de vidrio de 1000 ml. Se agrega más agua destilada al cilindro hasta alcanzar la marca de 1000 ml y se vuelve a agitar muy bien la mezcla. Se coloca un hidrómetro en el cilindro para medir la gravedad específica de la suspensión suelo-agua en la vecindad del bulbo del instrumento Figura 2, por lo general durante un periodo de 24 horas. Los hidrómetros se calibran para mostrar la cantidad de suelo que aún está en suspensión en cualquier tiempo  $t$  dado. El diámetro mayor de las partículas del suelo todavía en suspensión en el tiempo  $t$  se puede determinar mediante la ley de Stokes.

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{(G_s - 1) \cdot \gamma_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

D = Diámetro de la partícula de suelo

$\eta$  = Viscosidad del agua

$G_s$  = Gravedad específica de los sólidos del suelo

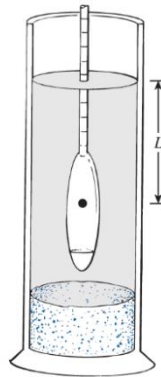
$\gamma_w$  = Peso específico del agua

L = longitud efectiva, es decir, longitud medida desde la superficie del agua en el cilindro hasta el centro de gravedad del hidrómetro; consulte la Figura 2.

T = Tiempo

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la ecuación mencionada anteriormente, se habrán asentado más allá de la zona de medición. De esta manera, con las lecturas del hidrómetro tomadas en varios tiempos, el porcentaje de suelo más fino que el diámetro dado D se puede calcular y elaborar la gráfica de la distribución granulométrica. Las técnicas de las mallas y del hidrómetro se pueden combinar para un suelo que tenga constituyentes tanto de grano grueso como de grano fino. (Braja, 2011)

**Figura 2.** Análisis granulométrico con el hidrómetro



Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

### 2.3.2. Relaciones de peso y volumen

En la naturaleza los suelos son sistemas de tres fases que consisten en partículas de suelo sólidas, agua y aire o gas. Para desarrollar las relaciones peso, volumen para un sólido, las tres fases se pueden separar como se muestra en la Figura 3.a. Con base en esta separación, se pueden definir las relaciones del volumen.

La relación de vacíos,  $e$ , es la relación del volumen de vacíos al volumen de sólidos de un suelo en una masa de suelo dada:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Donde:

$V_v$  = Volumen de vacíos.

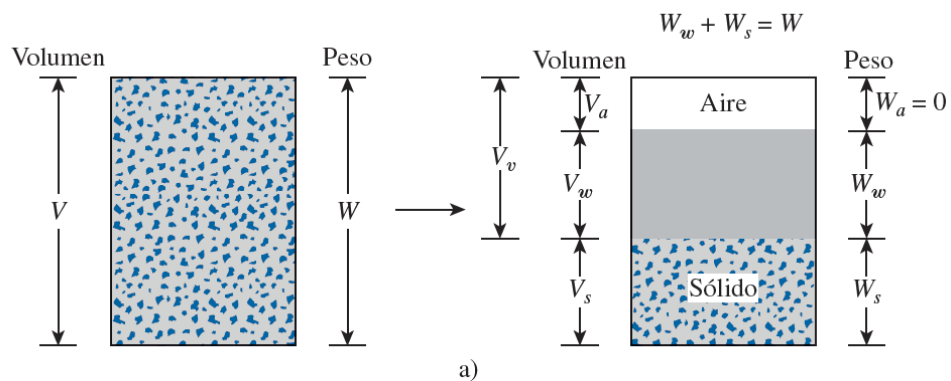
$V_s$  = Volumen del sólido del suelo.

**Tabla 6.** Límites del tamaño de suelos separados

Sistema de clasificación	Tamaño del grano (mm)
Unificado	Grava: 75 mm a 4,750 mm
	Arena: 4,750 mm a 0,075 mm
	Limo y arcilla (finos): < 0,075
AASHTO	Grava: 75 mm a 2 mm
	Arena: 2 mm a 0,050 mm
	Arcilla: < 0,002 mm

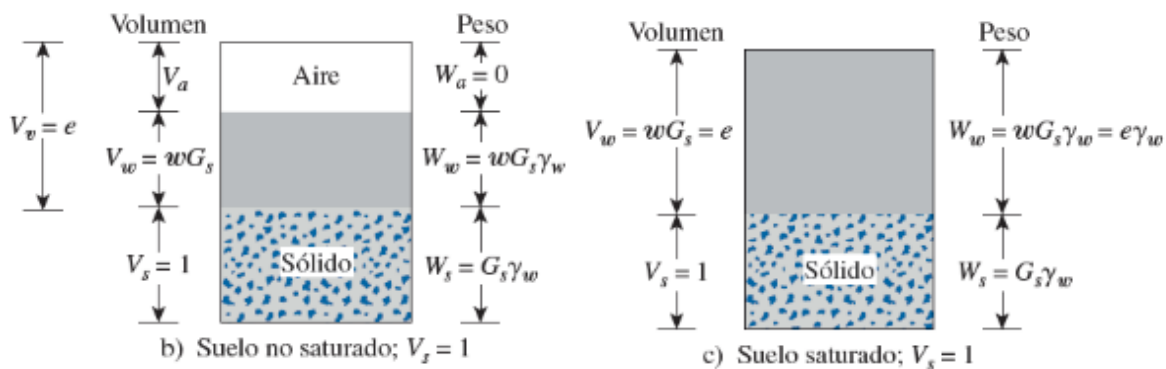
Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

**Figura 3.** Esquema de una muestra de suelo



Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

**Figura 4.** Esquema de una muestra de suelo saturado y no saturado



Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das

La porosidad,  $n$ , es la relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo

$$n = \frac{V_v}{V}$$

El grado de saturación,  $S$ , es la relación del volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos, que en general se expresa como un porcentaje:

$$S_{(\%)} = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

Donde:

$V_w$  = Volumen de agua.

Observe que, para suelos saturados, el grado de saturación es 100 %.

Las relaciones de peso son el contenido de humedad, el peso específico húmedo, el peso específico seco y el peso específico saturado, que con frecuencia se definen como sigue:

$$w_{(\%)} = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

$w_{(\%)}$  = Contenido de humedad

$W_w$  = Peso del agua

$W_s$  = Peso de los sólidos del suelo

$$\text{Peso específico húmedo} = \gamma = \frac{W}{V}$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico húmedo del suelo

W = Peso total de la muestra de suelos

V = Volumen de la muestra de suelo

El peso del aire  $w_a$  en la masa de suelo se supone que es insignificante:

$$\text{Peso específico seco} = \gamma_d = \frac{w_s}{V}$$

Donde:

$\gamma_d$  = Peso específico seco del suelo

W = Peso total de la muestra seca del suelo

V = Volumen de la muestra de suelo

Cuando una masa de suelo está completamente saturada (es decir, todo el volumen de vacíos está ocupado por agua), el peso específico húmedo de un suelo resulta igual al peso específico saturado  $\gamma_{sat}$ . (Braja, 2011)

### **2.3.3. Peso específico relativo**

El peso específico relativo de la mayoría de las partículas minerales constituyentes de un suelo  $S_s$  varía entre límites estrechos (2,60 a 2,90). Como ejemplo, el peso específico relativo del cuarzo es 2,67 y el del feldespato es 2,6. En suelos con abundante hierro,  $S_s$ , puede llegar a 3. En la turba se han llegado a medir valores de 1,5, debido a la presencia de materia orgánica. Los minerales de arcilla que constituyen la fracción coloidal de un suelo, pueden tener un peso específico promedio comprendido entre 2,80 y 2,90. Sin embargo, en algunas arcillas volcánicas, tal como sucede en el Valle de México, suelen encontrarse valores más bajos entre 2,2 y 2,6. Así pues, es normal que en un suelo real los minerales de las fracciones muy fina y coloidal tengan su peso específico relativo mayor que los minerales de la fracción más gruesa. Ello, no obstante, en la mayoría de los casos prácticos basta determinar el valor promedio del peso específico relativo de la materia sólida. El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en el laboratorio



haciendo uso de un matraz con marca de enrase. El matraz se llena hasta su marca, primero con agua y después con agua y la muestra de suelo. El aire atrapado entre las partículas de suelo se desaloja por ebullición o exponiendo la suspensión al vacío. Si la temperatura del agua es la misma que la de la suspensión puede obtenerse una fórmula para  $S_s$ .

(Juárez y Rico, 1974)

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

Donde:

$S_s$  =Peso específico relativo.

$W_s$  =Peso seco de los sólidos.

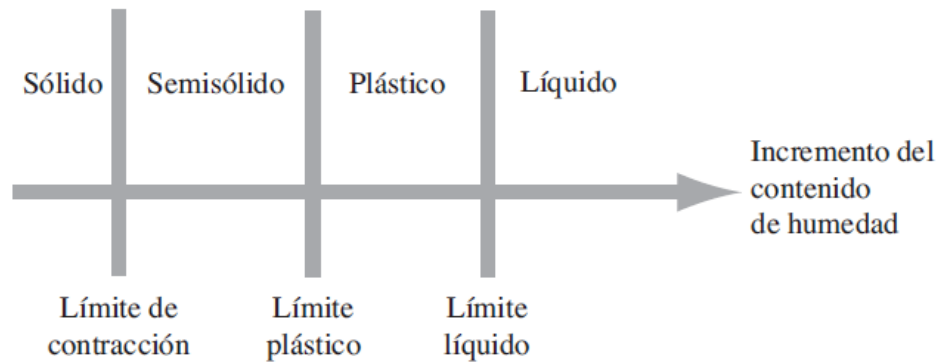
$W_{fw}$  =Peso del matraz llenos de agua

$W_{fsw}$  =Peso del matraz con suelo y agua

#### **2.3.4. Consistencia**

Cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino, el suelo se puede remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla. En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, como se muestra en la Figura 5. (Braja, 2013)

**Figura 5. Límites de Atterberg**



Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M

El contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el que se lleva a cabo la transición del estado sólido al estado semisólido se define como el límite de contracción. El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al estado plástico es el límite plástico, y del estado plástico al estado líquido es el límite líquido. Estos límites son también conocidos como límites de Atterberg. (Braja, 2013)

#### **2.3.4.1. Límites de Atterberg**

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de humedad. El contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico se define como límite líquido (LL). De manera similar, el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido y de un estado semisólido a uno sólido se definen como límite plástico (LP) y límite de contracción (LC), respectivamente. A estos límites se les refiere como límites de Atterberg, Figura 6.

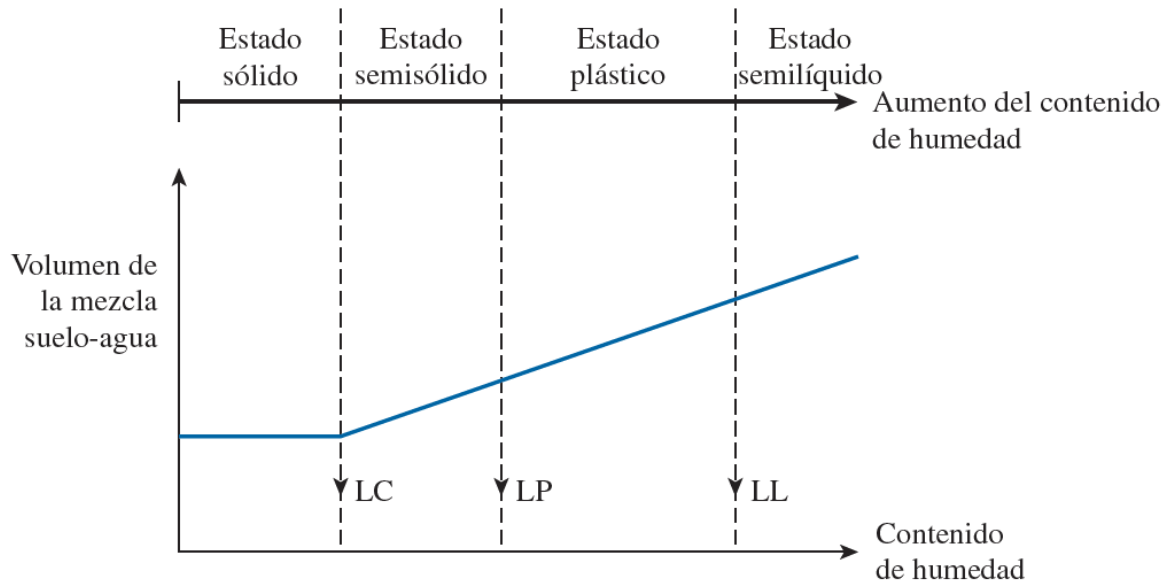
El límite líquido de un suelo se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba D 4318 de la ASTM) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes.

El límite plástico se define como el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3,18 mm de diámetro designación de prueba D 4318 de la ASTM.

El límite de contracción se define como el contenido de humedad en el que el suelo no experimenta ningún cambio adicional en su volumen con la pérdida de humedad, designación de prueba D 427 de la ASTM.

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como el índice de plasticidad IP, o  $IP = LL - LP$ .

**Figura 6.** Definición de los límites de Atterberg



Fuente: Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Braja M

### 2.3.5. Estructura y cohesión del suelo

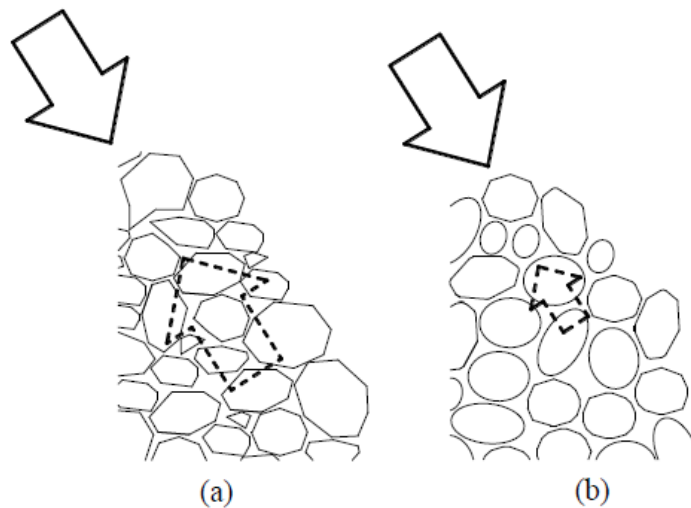
Se define estructura del suelo como al arreglo geométrico de las partículas del suelo respecto unas de otras. Existen varios factores que influyen en la estructura de suelo como ser: la textura, tamaño, composición mineralógica de las partículas y el contenido de agua del suelo.

La cohesión del suelo se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas como conjunto, como resultado de la trabazón conjunta o las microestructuras existentes en el suelo. Para el caso de suelos compuestos de partículas con forma granular, la trabazón entre partículas origina estructuras granulares simples y la fricción que se origina entre ellas contrarresta el deslizamiento de unas respecto a otras, como se muestra en la Figura 7.a, este comportamiento se lo identifica como la cohesión

para el caso de suelos granulares, donde el suelo presenta resistencia contra su disgregación ocasionada por un agente externo.

El grado de cohesión que presentan los suelos granulares, está en función a la textura de las partículas de forma granular. Las partículas con textura angular Figura 7.a, logran que el suelo tenga cohesión, mientras que las partículas con textura redondeada Figura 7.b, no contribuyen a la cohesión del suelo. (Campos, 2005).

**Figura 7.** Estructuras que dan cohesión a los suelos granulares

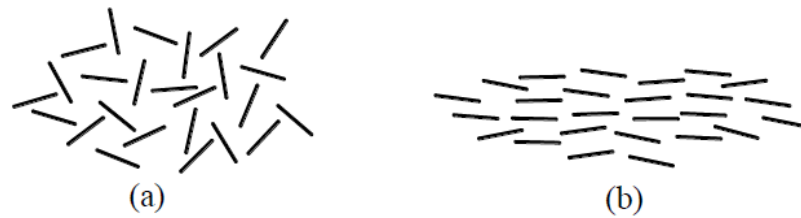


(a) Partículas con textura angular. (b) Partículas con textura redondeada.

Fuente: Apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelos,  
Campos Rodríguez Jorge

La forma de hojuela, el tamaño y la carga eléctrica negativa superficial de las partículas compuestas de minerales de arcilla, da lugar a que estas partículas generen fuerzas de atracción y repulsión entre ellas, originando estructuras que se muestran en la Figura 8.

**Figura 8.** Estructura de las partículas de arcilla sedimentadas



(a) Partículas floculadas. (b) Partículas dispersas.

Fuente: Apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelos, Campos Rodríguez Jorge

Los iones que forman la superficie en hojuelas de los minerales de arcilla son  $O^-$  y  $OH$ , por lo que estas superficies tienen una carga eléctrica negativa. Puesto que las moléculas de agua son bipolares, es decir que tienen un extremo positivo y negativo, la superficie negativa del mineral de arcilla atrae a las moléculas de agua, por lo que se forma una capa de agua que queda unida a la superficie del mineral por medio de un enlace de hidrógeno  $(H_3O)^+$ .

## 2.4. ARCILLAS

### 2.4.1. Minerales constitutivos de las arcillas

Partiendo de los numerosos minerales que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: la arcilla.

La investigación de las propiedades mineralógicas de estos sedimentos, comenzó en épocas recientes (1930) y presenta gran importancia en cuestiones de Ingeniería, pues, a diferencia de los suelos gruesos, el comportamiento mecánico de las arcillas se ve decisivamente influido por su estructura en general y constitución mineralógica en particular.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando, además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales,

también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la alumínica.

La primera está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro oxígenos, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros.

Las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, constituyen una redícula laminar.

Las láminas alumínicas están formadas por redículas de octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor. También ahora es el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la redícula.

De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se clasifican en tres grandes grupos: caolinitas, montmorilonitas e ilitas.

Las caolinitas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) están formadas por una lámina de silícica y otra de alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las redículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caoliníticas serán relativamente estables en presencia del agua.

Las montmorilonitas ( $(\text{OH})_4\text{Si}_3\text{Al}_4\text{Si}_3\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las redículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macro físicamente, en una expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. Estas arcillas aparecen, desdichadamente con frecuencia en

los trabajos de campo; por otra parte, en ocasiones, ayudan al ingeniero en la resolución de ciertos problemas prácticos.

Las ilitas  $((\text{OH})_4 \cdot \text{K}_y(\text{Si}_{3-y} \cdot \text{Al}_y)(\text{Al}_4 \cdot \text{Fe}_4 \cdot \text{Mg}_4 \cdot \text{Mg}_6)\text{O}_{20})$  con  $y$ , por lo general, igual a 1,50) están estructuradas análogamente que las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su expansibilidad es menor que la montmorilonitas y, en general, las arcillas iliticas, se comportan mecánicamente en forma más favorable para el ingeniero. (Juárez y Rico, 1974)

## **2.5. CLASIFICACIÓN DE SUELOS.**

Debido a la gran variedad de suelos que pueden encontrarse en la corteza terrestre es que se han desarrollado varios sistemas de clasificación para poder identificarlos, elaborados de acuerdo a la aplicación que se les da a los mismos. El clasificar un suelo consiste en agrupar al mismo en grupos y/o subgrupos de suelos que presentan un comportamiento semejante con propiedades ingenieriles similares.

Se analizará el sistema de clasificación Unificado SUCS y el sistema de clasificación AASHTO, que son los sistemas de clasificación más utilizados por la mayor parte de los ingenieros de todo el mundo.

El sistema de clasificación AASHTO está especialmente hecho para la construcción de carreteras, en cambio el sistema de clasificación Unificado SUCS, no está limitado a ninguna clase de proyectos en particular y es usado para toda la gama de obras civiles.

Tanto el sistema de clasificación Unificado como el AASHTO consideran como suelo (conjunto de partículas sólidas, con líquido y agua en sus poros) a la parte que pasa por el tamiz N° 8 (75 mm), ya que las partículas más grandes a este diámetro son consideradas como partículas aisladas que ya no forman parte del suelo. (Campos, 2005)

### 2.5.1. Sistema de clasificación unificado (SUCS)

El sistema de clasificación unificado SUCS (Unified Soil Classification System), designación ASTM D 2487, originalmente fue desarrollado por A. Casagrande (1948) para la construcción de aeródromos durante la segunda guerra mundial. Este sistema de clasificación fue posteriormente modificado en 1952 por el mismo autor y el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos quienes hicieron que este sistema sea más aplicable a los propósitos ingenieriles, es decir que ya no era solo aplicable al campo de la aviación. Este sistema de clasificación actualmente goza de amplia aceptación y es el preferido por la mayor parte de los ingenieros en todo el mundo.

El sistema de clasificación SUCS está basado en la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad. Este sistema de clasificación se basa en la gráfica de plasticidad, que fue obtenida por investigaciones realizadas en laboratorio por A. Casagrande (1932).

(Campos, 2005)

**Tabla 7.** Símbolos de identificación.

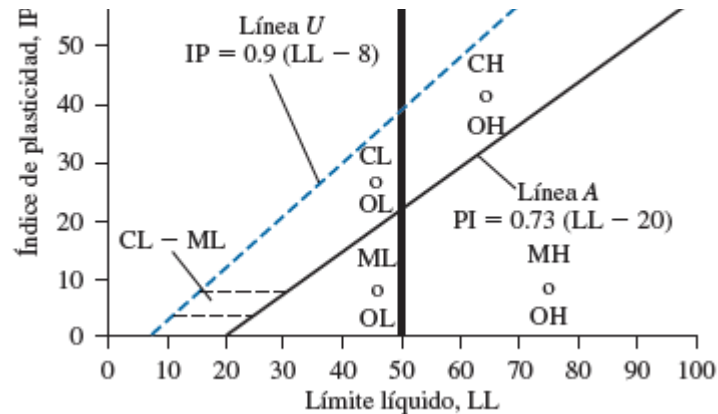
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
G	Grava o suelo gravoso.
S	Arena o suelo arenoso.
W	Bien graduado.
C	Arcilla inorgánica.
P	Mal graduado.
M	Limo inorgánico o arena fina.

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

En la gráfica de plasticidad Figura 14 y en la Tabla 9, se muestra el procedimiento para determinar los símbolos de grupo para varios tipos de suelos. Al clasificar un suelo se debe proporcionar el nombre del grupo que generalmente describe el suelo, junto con el símbolo respectivo.



**Figura 9.** Gráfica de plasticidad.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

### 2.5.2. Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO

El Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO fue propuesto originalmente para el Comité de la Junta de Investigación de Carreteras sobre Clasificación de Materiales para Subrasantes y Carreteras de Tipo Granular (1945). De acuerdo con la forma presente de este sistema, los suelos se pueden clasificar según ocho grupos principales, A-1 a A-8, con base en su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos listados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso, y aquellos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son materiales de grano fino. La turba, el fango y otros suelos altamente orgánicos se clasifican en el grupo A-8 y se identifican mediante una inspección visual.

El sistema de clasificación de la AASHTO (para suelos A-1 a A-7) se presenta en la Tabla 10. Observe que el grupo A-7 incluye dos tipos de suelos. Para el tipo A-7-5, el índice de plasticidad del suelo es menor que o igual al límite líquido menos 30. Para el tipo A-7-6, el índice de plasticidad es mayor que el límite líquido menos 30.

Entre mayor sea el valor del índice de grupo para un suelo dado, más deficiente será el desempeño del suelo como capa subrasante. Un índice de grupo de 20 o mayor indica un material muy deficiente para utilizarlo como capa subrasante. (Braja, 2013)

**Tabla 8.** Sistema de clasificación de suelos AASHTO

<b>Clasificación general</b>	<b>Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)</b>						
<b>Clasificación de grupo</b>	<b>A-1</b>			<b>A-2</b>			
	<b>A-1-a</b>	<b>A-1-b</b>	<b>A-3</b>	<b>A-2-4</b>	<b>A-2-5</b>	<b>A-2-6</b>	<b>A-2-7</b>
Análisis por malla (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx.	-	-	-	-	-	-
Malla núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.	-	-	-	-
Malla núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Para la fracción que pasa malla núm. 40							
Límite líquido (LL)	-	-	-	40 máx.	41 máx.	40 máx.	41 máx.
Índice de plasticidad (IP)	6 máx.		No plástico	10 máx.	10 máx.	11 máx.	11 máx.
Tipo de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava o arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
<b>Clasificación general</b>	<b>Materiales de limo y arcilla (35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)</b>						
<b>Clasificación de grupo</b>		<b>A-4</b>	<b>A-5</b>		<b>A-6</b>	<b>A-7</b>	
Análisis por malla (% que pasa)							
Malla núm. 10		-	-		-	-	
Malla núm. 40		-	-		-	-	
Malla núm. 200		36 mín.	36 mín.		36 mín.	36 mín.	
Para la fracción que pasa malla núm. 40							
Límite líquido (LL)		40 máx.	41 mín.		40 máx.	41 mín.	
Índice de plasticidad (IP)		10 máx.	10 máx.		11 mín.	11 mín.	
Tipo de material		Suelos limosos			Suelos arcillosos		
Clasificación de la capa	Regula o malo						

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

## 2.6. LA CONSOLIDACIÓN

### 2.6.1. Principios de consolidación

Cuando una capa de suelo saturado se somete a un aumento del esfuerzo, la presión del agua intersticial se incrementa repentinamente. En los suelos arenosos que son altamente permeables, el drenaje causado por el aumento en la presión de agua intersticial se completa inmediatamente. Este drenaje de agua intersticial se acompaña de una reducción en el volumen de la masa de suelo, lo que se traduce en asentamiento. Debido al rápido drenaje del agua intersticial en suelos arenosos, el asentamiento elástico y de consolidación ocurren simultáneamente. Cuando una capa de arcilla compresible saturada se somete a un aumento del esfuerzo, el asentamiento elástico se produce inmediatamente. Debido a que la conductividad hidráulica de la arcilla es significativamente menor que la de la arena, el exceso de presión de poros generado por la carga se disipa gradualmente durante un largo periodo. Por lo tanto, el cambio de volumen asociado (es decir, la consolidación) en la arcilla puede continuar por mucho tiempo después del asentamiento elástico.

La deformación dependiente del tiempo de suelo arcilloso saturado puede entenderse mejor teniendo en cuenta un modelo simple que consiste en un cilindro con un resorte en su centro. Sea el área dentro de la sección transversal del cilindro igual a  $A$ . El cilindro está lleno de agua y tiene un pistón impermeable sin fricción unido a un resorte y una válvula, como se muestra en la Figura 10.a. En este momento, si colocamos una carga  $P$  sobre el pistón Figura 10.b, y mantenemos la válvula cerrada, toda la carga será tomada por el agua en el cilindro porque el agua es incompresible. El resorte no pasará por ninguna deformación. El exceso de presión hidrostática en este momento se puede dar como:

$$\Delta u = \frac{P}{A}$$

Donde:

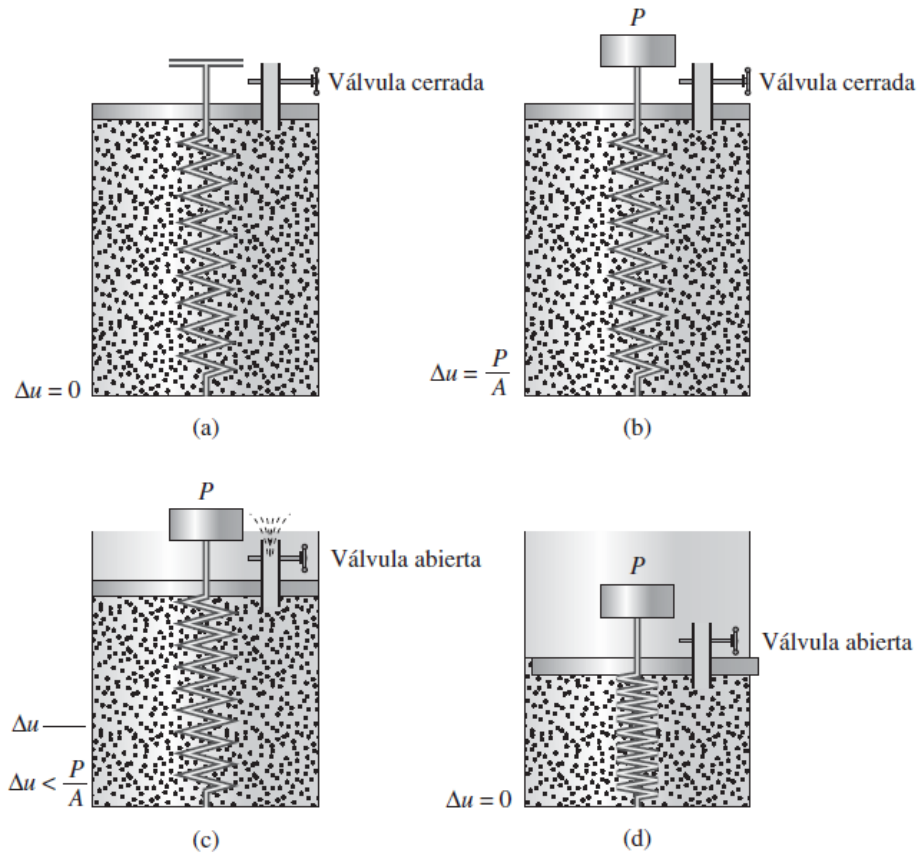
$\Delta u$ = Exceso de presión hidrostática

$P$ = Carga puntual aplicada sobre el pistón

$A$ = Área de la sección transversal del cilindro

Este valor se puede observar en el indicador de presión unido al cilindro.

**Figura 10.** Modelo cilindro, resorte



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

En general, podemos escribir:

$$P = P_s + P_w$$

Donde:

$P$ = Carga ejercida en el cilindro

$P_s$ = Carga soportada por el resorte

$P_w$ = Carga transportada por el agua

De la discusión anterior, podemos ver que cuando la válvula se cierra después de la colocación de la carga P.

$$P_s = 0 \text{ y } P_w = P$$

Ahora, si se abre la válvula, el agua fluirá hacia el exterior Figura 10.c. Este flujo se acompaña de una reducción de la presión hidrostática y un aumento en la compresión del resorte. Por lo tanto, en este momento la ecuación se mantendrá. Sin embargo,

$$P_s = 0 \text{ y } P_w = P \text{ (es decir, } \Delta u \text{ P/A)}$$

Después de algún tiempo el exceso de presión hidrostática se convertirá en cero y el sistema alcanzará un estado de equilibrio, como se muestra en la Figura 10.d. Ahora podemos escribir:

$$P_s = P \text{ y } P_w = 0$$

$$P = P_s + P_w$$

Con esto en mente, podemos analizar la deformación de una capa de arcilla saturada sometida a un aumento del estrés Figura 10.a. Consideremos el caso en el que una capa de arcilla saturada de espesor H que está confinada entre dos capas de arena está siendo sometida a un aumento instantáneo del esfuerzo total  $\Delta\sigma$ . Este incremento del esfuerzo total se transmitirá al agua intersticial y los sólidos del suelo. Esto significa que el esfuerzo total,  $\Delta\sigma$ , se divide en alguna proporción entre el esfuerzo y la presión efectiva del agua del poro. El cambio en el comportamiento del esfuerzo efectivo será similar al del resorte en la Figura 10, y el cambio en el comportamiento de la presión del agua intersticial será similar al del exceso de presión hidrostática de la Figura 2.15. A partir del principio de esfuerzo efectivo, se deduce que:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u$$

Donde:

$\Delta\sigma'$  = Aumento del esfuerzo efectivo

$\Delta u$  = Aumento de la presión de agua intersticial

Dado que la arcilla tiene muy baja conductividad hidráulica y el agua es incompresible, en comparación con la estructura del suelo, en el tiempo  $t = 0$  todo el aumento del esfuerzo  $\Delta\sigma$  será arrastrado por el agua ( $\Delta\sigma = \Delta u$ ) en todas las profundidades Figura 10.b. Ninguno será llevado por la estructura del suelo, es decir, el aumento del esfuerzo efectivo,  $\Delta\sigma' = 0$ .

Después de la aplicación del esfuerzo incremental,  $\Delta\sigma$ , a la capa de arcilla, el agua intersticial comenzará a ser exprimida hacia fuera y drenará en ambas direcciones en las capas de arena. Por este proceso, el exceso de presión de agua intersticial a cualquier profundidad en la capa de arcilla disminuirá gradualmente y el esfuerzo transportado por los sólidos del suelo, (esfuerzo efectivo) se incrementará.

Por lo tanto, en el tiempo  $0 < t < \infty$ .

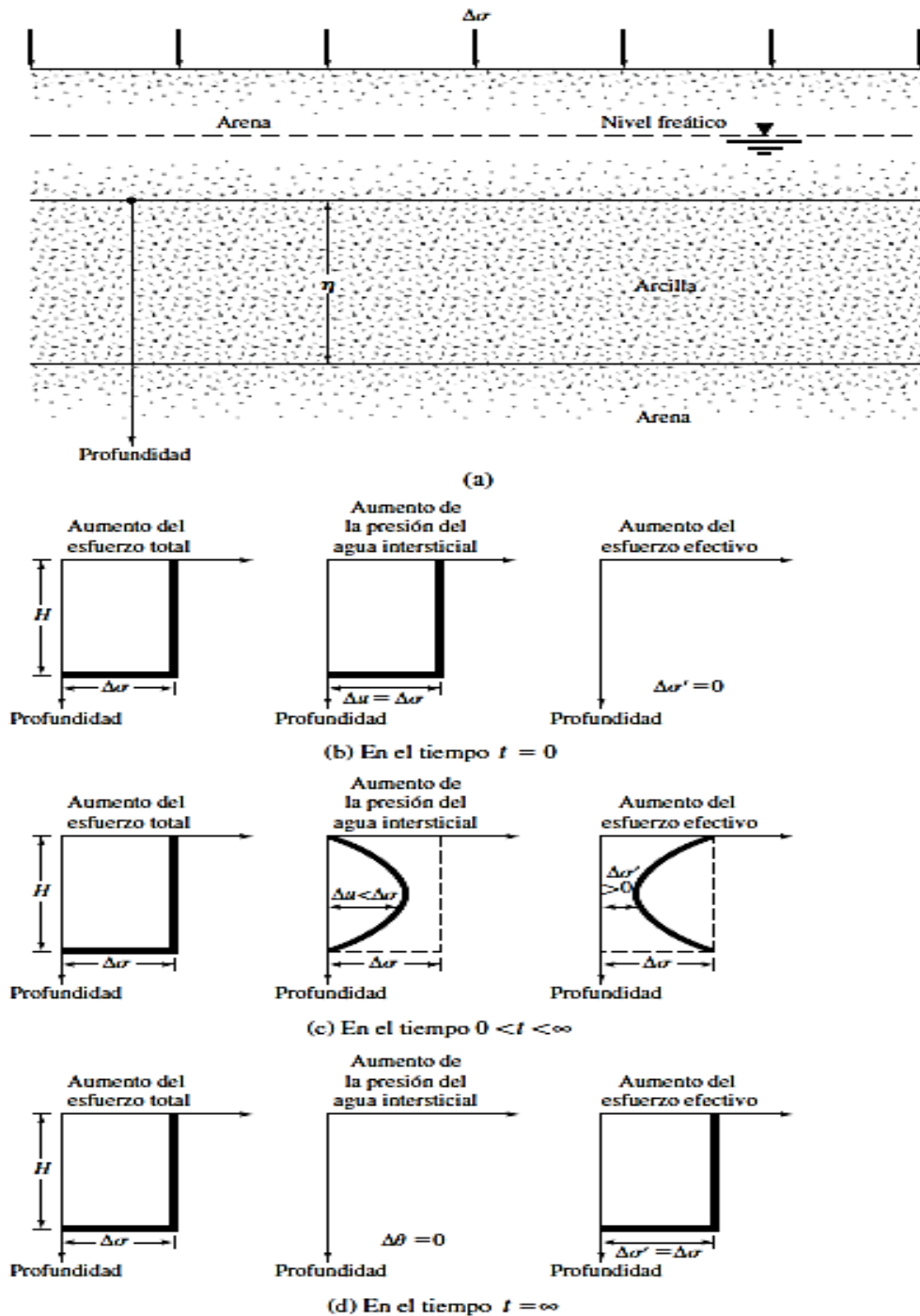
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (\Delta\sigma' > 0 \text{ y } \Delta u < \Delta\sigma)$$

Donde:

$\Delta\sigma' =$  Aumento del esfuerzo efectivo

$\Delta u =$  Aumento de la presión de agua intersticial

**Figura 11.** Variación del esfuerzo total, la presión de agua intersticial y el esfuerzo efectivo en una capa de arcilla drenada en la parte superior y la parte inferior como resultado de un esfuerzo añadido,  $\Delta\sigma$



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

Sin embargo, la magnitud de  $\Delta\sigma'$  y  $\Delta u$  en varias profundidades va a cambiar Figura 16, dependiendo de la distancia mínima del patrón de drenaje de la capa de arena superior o

inferior. Teóricamente, en el tiempo  $t = \infty$ , todo el exceso de presión del agua intersticial se disiparía por el drenaje de todos los puntos de la capa de arcilla, dando así  $\Delta u = 0$ . Entonces, el aumento del esfuerzo total  $\Delta \sigma$  se transportaría por la estructura del suelo Figura 11.d, por lo que

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma'$$

Este proceso gradual de drenaje bajo la aplicación de una carga adicional y la transferencia del exceso de presión del agua intersticial asociada al esfuerzo efectivo provoca el asentamiento dependiente del tiempo (consolidación) en la capa de arcilla.

### **2.6.2. Teoría de consolidación Terzaghi 1925**

Útil para conocer aproximadamente la magnitud del asentamiento de un suelo por cargas, con base en el resultado del ensayo de consolidación (laboratorio).

Hipótesis:

- Estrato de suelo homogéneo, isótropo y de espesor constante.
- Estrato saturado 100 % entre 1 ó 2 superficies más permeables.
- Compresibilidad del agua y los granos, despreciable.
- Acciones similares de masas infinitesimales o masas grandes.
- Compresión unidimensional, en dirección normal a la capa de suelo.
- Validez de la ley de Darcy.
- Valores constantes de las profundidades del suelo (algunas cambian).
- Relación lineal (idealizada) entre relación de vacíos y presión.
- Deformaciones lentas que permitan despreciar las fuerzas de inercia.

Terzaghi (1923) describió la relación esfuerzo-deformación que experimentan los suelos finos cuando, estando saturada, son sometidos a un incremento de carga que cambia las condiciones de esfuerzos dentro de los mismos. Con lo cual Terzaghi definió el comportamiento de dichos suelos, como una relación entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos  $e$ .

Un cambio en el estado de esfuerzos en un suelo compresible produce un cambio en el volumen de los vacíos del mismo, y si dichos vacíos se encuentran llenos de agua se origina a su vez un cambio en el contenido de agua del suelo.



Teniendo esto en mente, Terzaghi definió el fenómeno de consolidación como cualquier proceso en el cual se involucra un decremento en el contenido de agua de un suelo saturado, sin que se presente un reemplazo del agua por aire. (Terzaghi y Peck, 1973)

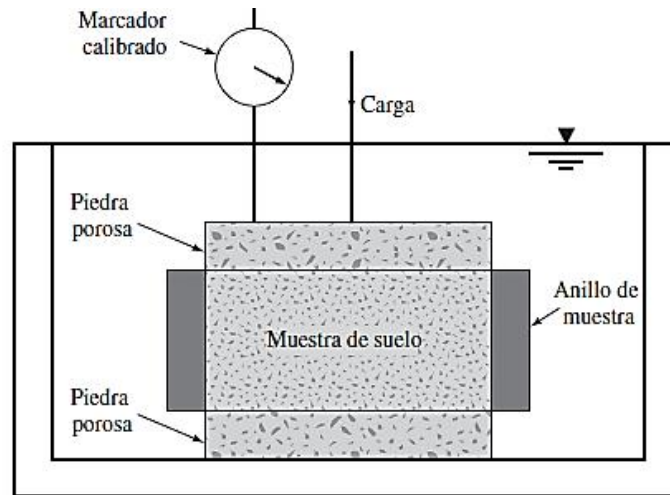
### **2.6.3. Clases de consolidación**

Puede ser PRIMARIA o SECUNDARIA. Primaria, cuando cargado el suelo, la reducción de volumen se debe a la expulsión del agua, fenómeno en el que se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto mineral, esta es la consolidación propiamente dicha, típica del caso de los suelos de Ciudad de México y de la Torre de Pisa, y con la que nace la Mecánica de Suelos (Terzaghi, 1925). Secundaria, cuando la consolidación se da por reajuste del esqueleto mineral y luego de que la carga está casi toda soportada por este y no por el agua. (Duque y Escobar, 2002).

### **2.6.4. Prueba de consolidación unidimensional en laboratorio**

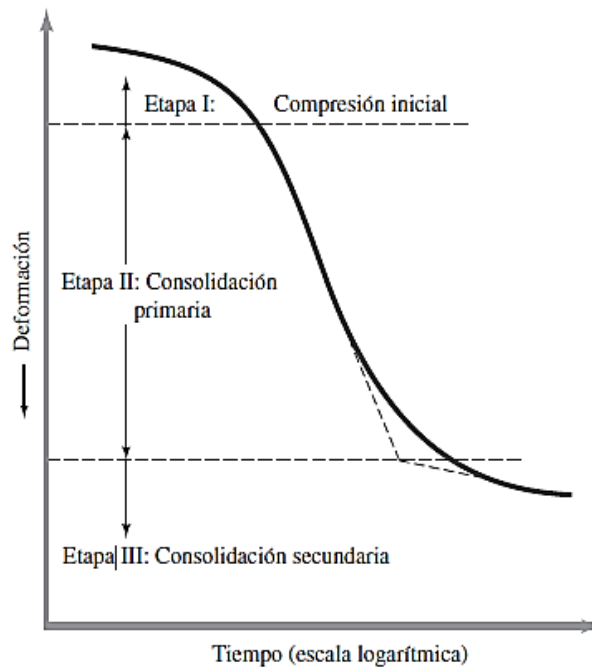
El procedimiento de prueba de consolidación unidimensional fue sugerido por primera vez por Terzaghi (1925). Esta prueba se lleva a cabo en un consolidómetro (a veces referido como un edómetro). La Figura 12. es el diagrama esquemático de un consolidómetro. La muestra de suelo se coloca dentro de un anillo de metal con dos piedras porosas, una en la parte superior de la probeta y otra en la parte inferior. Los especímenes tienen generalmente 63,5 mm de diámetro y 25,4 mm de espesor. La carga de la probeta es aplicada a través de un brazo de palanca y la compresión se mide mediante un micrómetro calibrado. Durante la prueba, la muestra se mantiene bajo el agua. Cada carga generalmente se mantiene durante 24 horas. Después de eso la carga por lo general se duplica, duplicando así la presión sobre la muestra, y se continúa con la medición de la compresión. Al final de la prueba, se determina el peso en seco de la muestra de ensayo.

**Figura 12.** Consolidómetro



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das.

**Figura 13.** Gráfica de deformación en función del tiempo durante una consolidación para un incremento particular de la carga.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das.

A partir del diagrama de la Figura 13 se puede observar que hay tres etapas, que son:

Etapa I: Compresión inicial, que es causada sobre todo por la precarga.

Etapa II: Consolidación primaria, durante la cual el exceso de presión del agua intersticial se transfiere gradualmente en esfuerzo efectivo por la expulsión de la misma.

Etapa III: Consolidación secundaria, se produce después de la disipación total del exceso de presión del agua intersticial, cuando se lleva a cabo alguna deformación de la muestra debido al reajuste plástico del suelo. (Braja, 2013)

### **2.6.5. Método Taylor de consolidación unidimensional**

Puede emplearse un procedimiento alternativo que requiere un gráfico de deformación contra  $\sqrt{t}$  para determinar los puntos del 0 y 100 % de consolidación, así como el coeficiente de consolidación para cada incremento. La parte inicial de la curva se aproxima mediante una línea recta. Se extrapola la línea hasta  $t = 0$ . La correspondiente ordenada de deformación representa el 0 % de la consolidación primaria. Se dibuja una segunda línea recta a través de este punto de manera que la abscisa de esta línea sea 1,15 veces la abscisa de la aproximación en línea recta de la parte inicial de la curva. La intersección de esta nueva línea con la curva de deformación-raíz cuadrada del tiempo corresponde al 90 % de consolidación primaria. La deformación al 100 % de la consolidación primaria es  $1/9$  mayor que la diferencia entre las deformaciones a 0 y 90 % de consolidación. Análogamente, la deformación al 50 % de consolidación primaria es  $5/9$  de la diferencia en las deformaciones entre el 0 y el 90 % de consolidación.

Las deformaciones correspondientes al 50 % y 100 % de consolidación deberán calcularse así:

$$D_{50} = D_0 + \frac{5}{9} * (D_{90} - D_0)$$

$$D_{100} = D_0 + \frac{10}{9} * (D_{90} - D_0)$$

$D_0$  = Deformación al 0 % de la consolidación primaria

$D_{50}$  = Deformación al 50 % de la consolidación primaria

$D_{100}$  = Deformación al 100 % de la consolidación primaria

El coeficiente de consolidación puede hallarse entonces a partir del tiempo del 90 % de consolidación así:

$$C_v = \frac{0.21 * H^2}{t_{90}}$$

Donde:

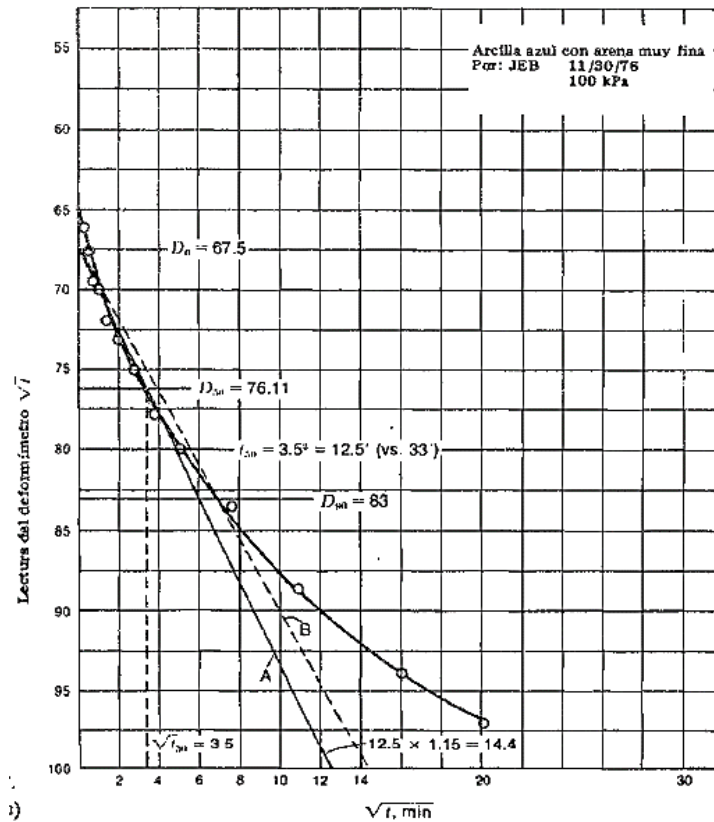
H = Espesor de la muestra en m (pies) para una muestra con drenaje doble.

$T_{90}$  = Tiempo para el 90 % de consolidación en años.

$C_v$  = Coeficiente de consolidación, en  $m^2/año$  ( $pies^2/año$ ).

Si H está en milímetros y t en segundos o minutos, las unidades de  $C_v$  serán  $mm^2/seg$  o  $mm^2/min$  respectivamente y será conveniente la conversión a unidades más adecuadas. Si se desea, puede emplearse también el método de la raíz cuadrada del tiempo para obtener un valor de  $t_{90}$ .

**Figura 14.** Lectura del deformímetro Vs  $\sqrt{\text{Tiempo}}$



Fuente: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, Bowles Joseph E.

### 2.6.6. Asentamiento por consolidación primaria

Después de obtener las gráficas de deformación en función del tiempo para diversas cargas en el laboratorio, es necesario estudiar el cambio en el índice de vacíos de la muestra con presión. A continuación, se presenta un procedimiento paso a paso:

Calcular la altura de sólidos,  $H_s$ , en la muestra de suelo Figura 15:

$$H_s = \frac{W_s}{A * G_s * \gamma_w}$$

Donde:

$G_s$ = Peso seco de la muestra.

$A$  = Área de la muestra.

$G_s$ = Gravedad específica de sólidos del suelo.

$\gamma_w$ = Peso unitario de agua.

Calcular la altura inicial de vacíos,  $H_v$ :

$$H_v = H - H_s$$

Donde:

$H$  = Altura inicial de la muestra.

$H_s$  = Altura de sólidos de las muestras.

Calcular el índice de vacíos inicial,  $e_0$ , de la muestra:

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v * A}{H_s * A} = \frac{H_v}{H_s}$$

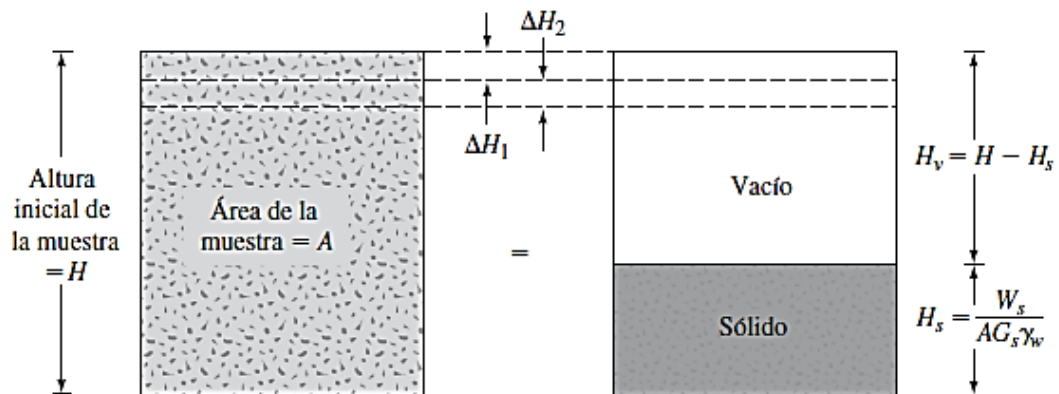
Para la primera carga gradual de  $s_1$  (carga total/unidad de área de la muestra), lo que provoca la deformación  $\Delta H_1$ , calcular el cambio en la relación de vacíos  $\Delta e_1$ :

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

$\Delta H_1$ , se obtiene a partir de las lecturas del dial finales iniciales y para la carga. En este momento la presión efectiva sobre la muestra es:

$$\sigma' = \sigma_1 = \sigma'_1$$

**Figura 15.** Cambio en la altura de la muestra en una prueba de consolidación en una dimensión



Fuente: Mecánica de Suelos Aplicada, Medrano Castillo Rodolfo Crescenciano

Calcular el nuevo índice de vacíos,  $e_1$ , después de la consolidación causada por el incremento de presión  $\sigma_1$ :

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

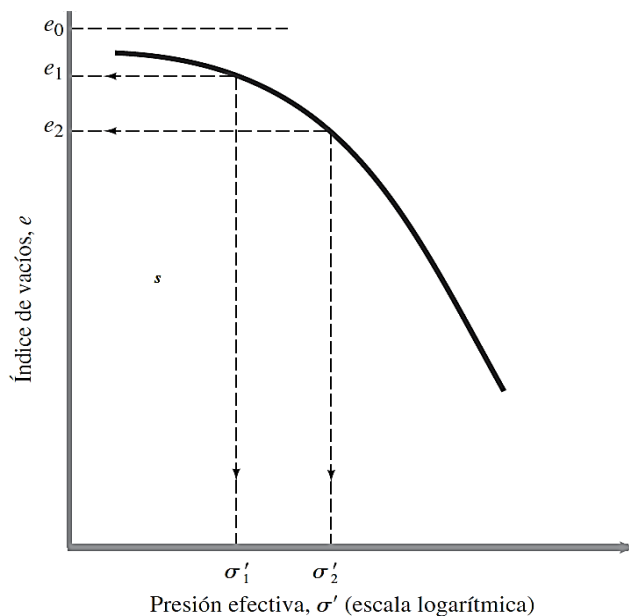
Para la siguiente carga,  $\sigma_2$  (nota:  $\sigma_2$  es igual a la carga acumulada por unidad de área de la muestra), provoca la deformación adicional  $\Delta H_2$ , la relación de vacío  $e_2$ , al final de la consolidación se puede calcular como:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

Tenga en cuenta que, en este momento, la presión efectiva sobre la muestra es  $\sigma' = \sigma_2 = \sigma'_2$ . Procediendo de una manera similar, podemos obtener los índices de vacío al final de la consolidación para todos los incrementos de carga.

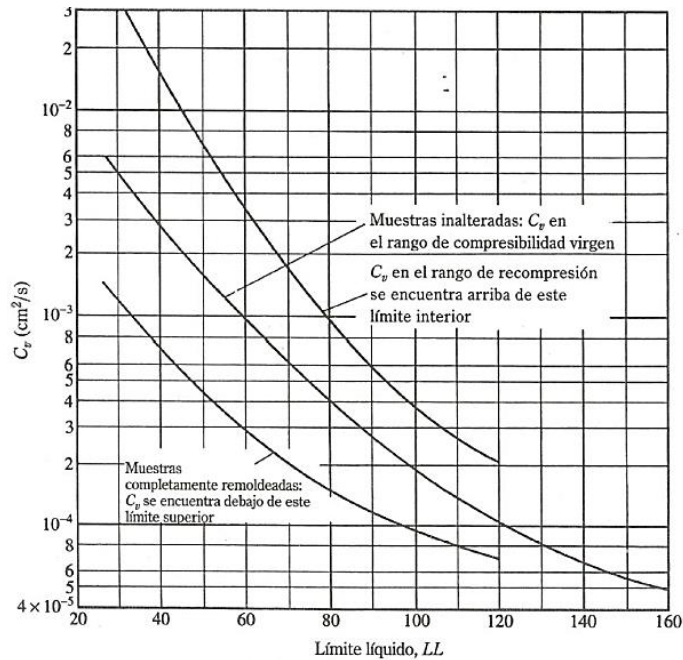
Las presiones efectivas  $\sigma = \sigma'$  y los índices de vacíos correspondientes ( $e$ ) al final de la consolidación son impresos en papel cuadrilado semilogarítmico. La forma típica de este tipo de trama se muestra en la Figura 16. (Campos, 2005).

**Figura 16.** Gráfica típica de  $e$  en función de  $\log \sigma'$



Fuente: Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Sowers & Sowers

**Figura 17.** Rango de  $C_v$  según el Departamento de Marítima de Estados Unidos.



Fuente: Manual de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, Rodríguez, Ángel Muelas

**Tabla 9.** Relación entre diversos parámetros de esfuerzo, deformación en compresión confinada.

Módulo de confinamiento	$D = \frac{(1 - e_0)}{a_v}$
Coefficiente de deformación volumétrica	$m_v = \frac{a_v}{1 + e_{prom}}$
Coefficiente de compresibilidad	$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$
Índice de compresibilidad	$C_c = \frac{a_v * \Delta \sigma'}{0,435}$
Coefficiente de consolidación	$C_v = \frac{(0,848 - H^2_{dr})}{t_{90}}$
Coefficiente de permeabilidad	$k = c_v * m_v * \gamma_w$

Fuente: Manual de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, Rodríguez, Ángel Muelas

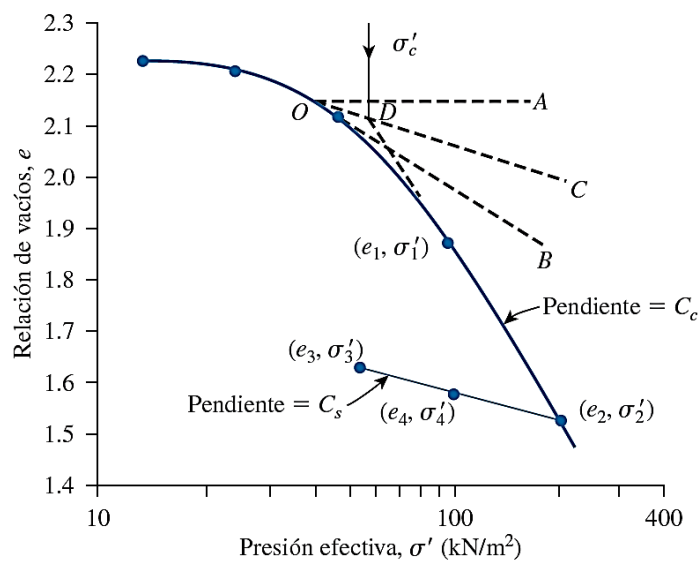


### 2.6.7. Presión de preconsolidación

La presión de preconsolidación,  $\sigma_c'$ , es la presión de sobrecarga máxima después de la efectiva a la que se ha sometido la muestra de suelo. Se puede determinar utilizando un procedimiento gráfico simple propuesto por Casagrande (1936). El procedimiento comprende cinco pasos (consulte la Figura 18):

- Determine el punto O en la curva e-log  $\sigma'$  que tenga la curvatura más pronunciada (es decir, el radio de curvatura menor).
- Trace una línea horizontal OA.
- Trace una línea OB que sea tangente a la curva e-log  $\sigma'$  en O.
- Trace una línea OC que divida en dos partes iguales el ángulo AOB.
- Prolongue la parte de la línea recta de la curva e-log  $\sigma'$  hacia atrás hasta intersectar OC. Este es el punto D. La presión que corresponde a este punto D es la presión de preconsolidación  $\sigma_c'$ .

**Figura 18.** Curva e-log  $\sigma'$  para una arcilla suave del este de San Louis, Illinois.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

Los depósitos naturales de suelos pueden estar normalmente consolidados o sobreconsolidados (o preconsolidados). Si la presión de sobrecarga efectiva presente  $\sigma' = \sigma_0'$  es igual a la presión de preconsolidación  $\sigma_c'$ , el suelo está normalmente consolidado. Sin embargo, si  $\sigma' < \sigma_c'$ , el suelo está sobreconsolidado.

Stas y Kulhawy (1984) correlacionaron la presión de preconsolidación con el índice líquido en la forma siguiente:

$$\frac{\sigma_c'}{P_a} = 10^{(1,11-1062IL)}$$

Donde:

$P_a$  = Presión atmosférica (100 KN/m<sup>2</sup>).

IL = Índice de liquidez.

#### **2.6.8. Determinación del coeficiente de permeabilidad a partir de los datos consolidación.**

El coeficiente de permeabilidad medio que gobierna el flujo del agua durante el intervalo de compresión con un cierto incremento de carga, representado por una curva de consolidación, puede calcularse a partir de la expresión para el factor tiempo T:

$$T = \frac{k(1 + e) * t}{a_v * \gamma_w * H^2}$$

T= Tiempo de consolidación

k= Permeabilidad del extracto de arcilla

e= Relación de vacíos de la muestra de suelo

$a_v$  = Coeficiente de compresibilidad

$\gamma_w$  = Peso específico del agua, 9.81 KN/m<sup>3</sup>

H= Altura de muestra en análisis

Para este objeto puede escogerse cualquier punto de la curva de consolidación. Al punto escogido corresponde un cierto tiempo, t, y un cierto valor del factor tiempo, T, correspondiente al grado de consolidación del punto considerado. Con estos datos y los demás que aparecen en la expresión anterior, también conocidos, puede despejarse a k. Es

deseable, sin embargo, escoger un punto suficientemente alejado del 0 y 100 % de consolidación, por los errores en que puede incurrirse, originados por los procedimientos con que se encontraron esos límites. Si se escoge el punto correspondiente al 50 % de consolidación, además de estar igualmente alejado de ambas fuentes de error, se tiene la ventaja de que el valor de T se recuerda fácilmente, siendo  $T_{50} = 0,2 = 1/5$ , exactamente  $T_{50} = 0,197$ . (Juárez y Rico, 1974)

Por lo tanto, el coeficiente de permeabilidad puede calcularse de la fórmula siguiente, donde todas las cantidades deben expresarse en el sistema C.G.S. de unidades:

$$k = \frac{a_v * H^2 * \gamma_w}{5(1 + e) * t_{50}} \left( \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right)$$

Duque Escobar propone la misma ecuación de forma simplificada.

Dos relaciones básicas:

$$k = c_v * m_v * \gamma_w$$

$k$  = Coeficiente de permeabilidad, en cm/seg

$C_v$  = Coeficiente de consolidación, en  $\text{cm}^2/\text{min}$

$m_v$  = Coeficiente de compresibilidad del volumen

$\gamma_w$  = Peso específico del agua,  $9.81 \text{ KN}/\text{m}^3$

Donde se expresa la permeabilidad en función del coeficiente de consolidación y del coeficiente de compresibilidad volumétrica, evidencias de que la deformación se puede evaluar por el volumen de agua drenada en el tiempo, y donde la permeabilidad se expresa en función del coeficiente de deformación volumétrica  $m_v$ , del tiempo de consolidación  $t$  y del espesor  $H$  de la capa drenante.

El tiempo necesario para la consolidación completa del suelo es directamente proporcional a,  $m_v * H^2$ , e inversamente proporcional a la permeabilidad  $k$ . Entre dos suelos, las mayores diferencias de consolidación se explican por diferencias en el espesor del suelo y la permeabilidad. (Duque y Escobar, 2002)

## **2.7. PERMEABILIDAD**

### **2.7.1. Introducción**

Los suelos tienen vacíos interconectados por donde el agua puede fluir desde los puntos de alta energía a los puntos de baja energía. El estudio del flujo de agua a través de medios porosos del suelo es importante en la mecánica del suelo. Es necesario para la estimación de la cantidad de filtración subterránea bajo diversas condiciones hidráulicas, para la investigación de los problemas que implica el bombeo de agua para construcción subterránea y para la realización de los análisis de estabilidad de presas y estructuras de retención de tierra que están sujetas a fuerzas de filtración. La velocidad de descarga del agua, que es la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo a través de un área de sección unitaria transversal de suelo (en ángulos rectos a la dirección del flujo), es una función de la conductividad hidráulica y del gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica es un parámetro importante para un suelo en el estudio de la filtración.

En este capítulo vamos a discutir los procedimientos para determinar la conductividad hidráulica de los suelos en el laboratorio y en el campo. (Braja, 2013)

### **2.7.2. Flujo laminar y turbulento**

Los problemas relativos al flujo de líquidos en general, pueden dividirse en dos grupos principales: los que se refieren al flujo laminar y aquellos que tratan con flujo turbulento. Un flujo se define como laminar cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí en toda su longitud, excepción hecha del efecto microscópico de mezcla nuclear. El flujo turbulento ocurre cuando la condición anterior no se cumple.

Una línea de flujo se define como la línea ideal que en cada punto tiene la dirección del flujo, en el instante de que se trate; en todo punto el vector velocidad y la línea de flujo que pasa por él, serán tangentes.

Si en un tubo se inserta una fuente puntual de tintura, como se muestra en la Figura 19, se tiene una distinción objetiva de los dos tipos de flujo mencionados observando la trayectoria observada por la tintura, que puede asimilarse a una línea de flujo, si este está establecido.



Donde:

$h$  = Carga total.

$u$  = Presión.

$v$  = Velocidad.

$g$  = Aceleración debida a la gravedad.

$\gamma_w$  = Peso unitario del agua.

$Z$  = Desnivel.

Observe que el desnivel,  $Z$ , es la distancia vertical de un punto dado por encima o por debajo de un plano de referencia. La carga de presión es la presión del agua  $u$  en ese punto, dividida entre el peso unitario de agua  $\gamma_w$ .

Si la ecuación de Bernoulli se aplica al flujo de agua a través de un medio de suelo poroso, el término que contiene la velocidad de carga puede despreciarse debido a que la velocidad de filtración es pequeña. A continuación, la altura total en cualquier punto se puede representar adecuadamente por:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z$$

Se muestra la relación entre la presión, la elevación y las cargas totales para el flujo de agua a través del suelo. Tubos abiertos llamados piezómetros se instalan en los puntos A y B. Los niveles a los que el agua se eleva en estos tubos situados en los puntos A y B se conocen como niveles piezométricos de los puntos A y B, respectivamente. La presión de carga en un punto es la altura de la columna vertical de agua en el piezómetro instalado en ese punto.

La pérdida de carga entre dos puntos, A y B, se puede dar por:

$$\Delta h = h_A - h_B = \left( \frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A \right) - \left( \frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B \right)$$

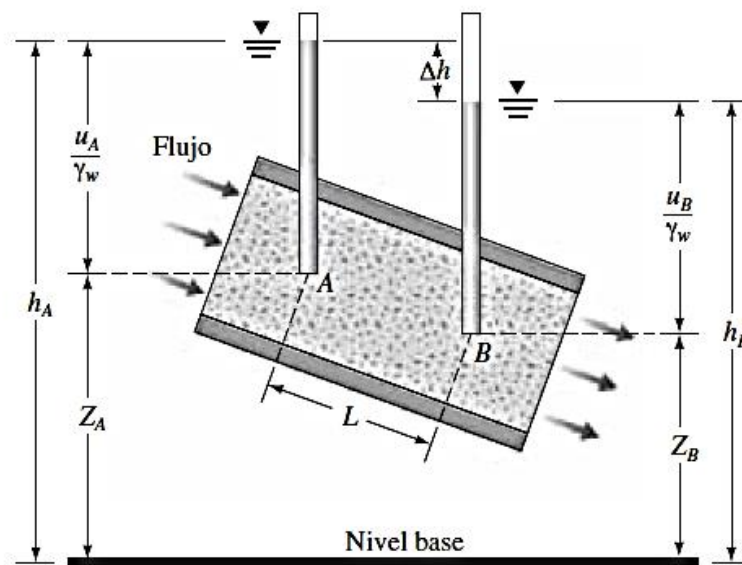
Donde:

$\Delta h$  = Carga de altura, que es la distancia a un plano de comparación o referencia.

$\frac{u_A}{\gamma_w}$  = Carga de presión, que es la presión en el sistema  $p$  dividido entre el peso específico del fluido  $\gamma_w$ .

$Z_A$  = Desnivel de nivel de un punto.

**Figura 20.** Presión, elevación y cargas totales para el flujo del agua a través de un suelo



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

La pérdida de carga,  $\Delta h$ , puede expresarse en forma adimensional como:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

$i$  = Gradiente hidráulico

$L$  = Distancia entre los puntos A y B, es decir, la longitud de flujo sobre el que ocurre la pérdida de carga.

En general, la variación de la velocidad,  $v$ , con el gradiente hidráulico,  $i$ , es como se muestra en la figura 20. Esta gráfica se divide en tres zonas:

1. Zona de flujo laminar (zona I).
2. Zona de transición (zona II).
3. Zona de flujo turbulento (zona III).

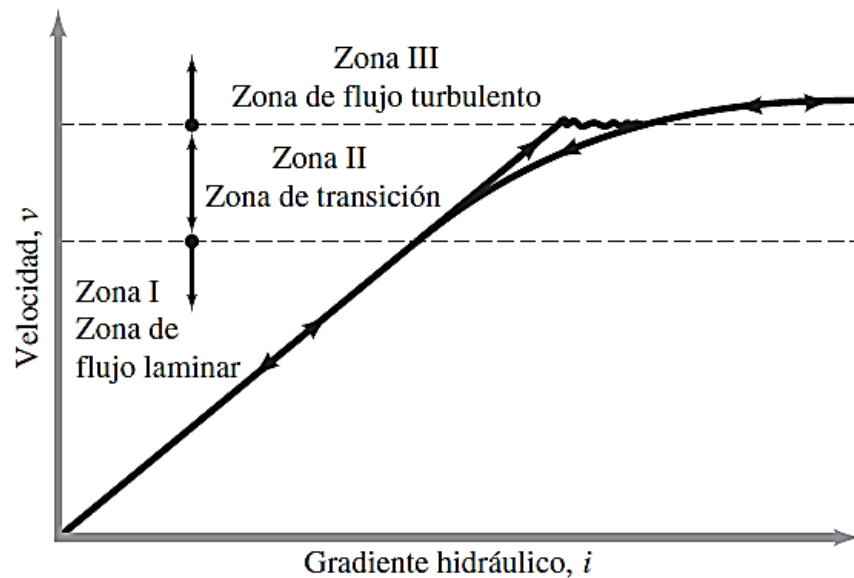
Cuando el gradiente hidráulico se incrementa gradualmente, el flujo sigue siendo laminar en las zonas I y II, y la velocidad,  $v$ , tiene una relación lineal con el gradiente. En un gradiente hidráulico superior, el flujo se vuelve turbulento (zona III). Cuando el gradiente hidráulico disminuye, existen condiciones de flujo laminar sólo en la zona I.

En la mayoría de los suelos, el flujo de agua a través de los espacios vacíos se puede considerar laminar, por lo que:

$$v \propto i$$

En roca fracturada, gravas y arenas muy gruesas, pueden existir condiciones de flujo turbulento y la ecuación puede no ser válida.

**Figura 21.** Naturaleza de la variación de  $v$  con el gradiente hidráulico,  $i$



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das.



#### 2.7.4. Ecuación de Darcy

En 1856, Henri Philibert Gaspard Darcy publicó una ecuación empírica simple para la velocidad de descarga del agua a través de los suelos saturados. Esta ecuación se basa principalmente en las observaciones que Darcy hace sobre el flujo de agua a través de arenas limpias y se da como:

$$v = k * i$$

Donde:

$v$  = Velocidad de descarga, que es la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo a través de un área de sección transversal unitaria bruta de suelo en ángulo recto con la dirección del flujo.

$k$  = Conductividad hidráulica (también conocida como coeficiente de permeabilidad).

$i$  = Gradiente hidráulico entre dos puntos.

La conductividad hidráulica se expresa en cm/s o m/s, y la descarga es en m<sup>3</sup>/s. Debe señalarse que, en unidades del SI, la longitud se expresa en mm o m, por lo que, en ese sentido, la conductividad hidráulica debe ser expresada en mm/s en lugar de cm/s. Sin embargo, los ingenieros geotécnicos siguen utilizando cm/s como la unidad para la conductividad hidráulica.

Observe que la ecuación anterior es similar a la ecuación posterior; ambas son válidas para las condiciones de flujo laminar y aplicables para una amplia gama de suelos. En la ecuación,  $v$  es la velocidad de descarga de agua con base en el área de la sección transversal bruta de suelo. Sin embargo, la velocidad real de agua (es decir, la velocidad de filtración) a través de los espacios vacíos es mayor que  $v$ . Se puede deducir una relación entre la velocidad de descarga y la velocidad de filtración haciendo referencia a la Figura 20, que muestra un suelo de longitud  $L$  con una sección transversal de área bruta  $A$ . Si la cantidad de agua que fluye a través del suelo por unidad de tiempo es  $q$ , entonces:

$$q = v * A = A_v * v_s$$

Donde:

$v_s$  = Velocidad de filtración.

$A_v$  = Área de vacíos en la sección transversal de la muestra.

### 2.7.5. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica de los suelos depende de varios factores: la viscosidad del fluido, la distribución de tamaño de poro, distribución de tamaño de grano, la relación de vacíos, la rugosidad de las partículas minerales y el grado de saturación del suelo. En suelos arcillosos la estructura juega un papel importante en la conductividad hidráulica. Otros factores importantes que afectan a la conductividad hidráulica de arcillas son la concentración iónica y el espesor de las capas de agua contenidas en las partículas de arcilla.

El valor de la conductividad hidráulica,  $k$ , varía entre los diferentes suelos. Algunos valores típicos para suelos saturados se dan en la Tabla 10. La conductividad hidráulica de los suelos no saturados es menor y aumenta rápidamente con el grado de saturación. La conductividad hidráulica de un suelo también está relacionada con las propiedades del fluido que fluye a través de él por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\gamma_w}{n} * \check{k}$$

Donde:

$\gamma_w$  = Peso unitario del agua.

$n$  = Coeficiente de viscosidad del fluido.

$\check{k}$  = Permeabilidad absoluta.

**Tabla 10.** Valores típicos de conductividad hidráulica para suelos saturados

<b>Tipos de suelo</b>	<b>k (cm/seg)</b>
Grava limpia	100-1
Arena gruesa	1,0-0,01
Arena fina	0,01-0,001
Arcilla limosa	0,001-0,00001
Arcilla limosa	<0,000001

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

La permeabilidad absoluta,  $k$ , se expresa en unidades de longitud al cuadrado (es decir,  $\text{cm}^2$ ). La ecuación mencionada anteriormente mostró que la conductividad hidráulica es una función del peso unitario y la viscosidad del agua, que es a su vez una función de la temperatura a la que se lleva a cabo la prueba. Por lo tanto, de la ecuación:

$$\frac{k_{T_1}}{k_{T_2}} = \left( \frac{\eta_{T_2}}{\eta_{T_1}} \right) \left( \frac{\gamma_{u(T_1)}}{\gamma_{u(T_2)}} \right)$$

Donde:

$k_{T_1}, k_{T_2}$  = Conductividad hidráulica a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

$\eta_{T_1}, \eta_{T_2}$  = Viscosidad del fluido a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

$\gamma_{u(T_1)}, \gamma_{u(T_2)}$  = Unidad de peso de agua a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

Esto es una convención para expresar el valor de  $k$  a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Dentro de la gama de temperaturas de prueba, podemos suponer que  $\gamma_{u(T_1)}, \gamma_{u(T_2)}$

Por lo tanto, de la ecuación:

$$k_{20^\circ\text{C}} = \left( \frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}} \right) * k_{T^\circ\text{C}}$$

La variación de  $\eta_{T^\circ\text{C}}/\eta_{20^\circ\text{C}}$ , con la temperatura de prueba  $T$  que varía de  $15$  a  $30^\circ\text{C}$  se da en la Tabla 13.

**Tabla 11.** Variación de  $\eta(T^\circ\text{C})/\eta(20^\circ\text{C})$

Temperatura $T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}}$	Temperatura $T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}}$
15	1,135	23	0,931
16	1,106	24	0,910
17	1,077	25	0,889
18	1,051	26	0,869
19	1,025	27	0,850
20	1,000	28	0,832
21	0,976	29	0,814
22	0,953	30	0,797

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

**Tabla 12.** Valores típicos del coeficiente de permeabilidad.

	100	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
<b>Drenaje</b>	<b>Bueno</b>						<b>Pobre</b>	<b>Prácticamente impermeable</b>			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava				Arena muy fina, limos orgánicos e inorgánicos, Mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada.			Suelos "impermeables", es decir arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición.		
		Suelos "impermeables" modificados por la vegetación o por la descomposición									
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ", por ensayos de bombeo se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.										
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No requiere mayor experiencia.										
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtiene buenos resultados	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos se requiere mucha experiencia				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.					
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Solo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.						Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos, se necesita mucha experiencia.				

Fuente: Mecánica de Suelos, Juárez y Rico S. F.

### 2.7.6. Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo

El coeficiente de permeabilidad de un suelo es un dato cuya determinación correcta es de fundamental importancia para la formación del criterio del proyectista en algunos problemas de mecánica de suelos y, en muchos casos, para la elaboración de sus cálculos.

Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: unos "directos", así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros "indirectos", proporcionados, en forma secundaria, por

pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines. Estos métodos son los siguientes:

a) Directos:

1. Permeámetro de carga constante.
2. Permeámetro de carga variable.
3. Prueba directa de los suelos en el lugar.

b) Indirectos:

1. Cálculo a partir de la curva granulométrica.
2. Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
3. Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

El uso del permeámetro de carga constante ofrece el método más simple para determinar el coeficiente de permeabilidad de un suelo y se recomienda ser utilizado en suelos poco permeables; puede ser usado, por ejemplo: en limos o arenas medianamente cementadas. El permeámetro de carga variable puede ser usado para determinar el coeficiente de permeabilidad en suelos finos y gruesos, el principio básico es el mismo en ambos métodos, solo con la diferencia de la aplicación de las fórmulas para obtener los resultados, ya que en el permeámetro de carga variable se utiliza un volumen determinado de líquido, haciendo intervenir la diferencia de alturas del tubo alimentador.

Las pruebas directas en campo consisten básicamente en la barrenación de pozos sobre el terreno que se desea conocer su permeabilidad; este tipo de pruebas son muy usadas en la hidráulica de captaciones, proporcionando un valor de la permeabilidad media del estrato en estudio. Los métodos existentes para este tipo de pruebas fundamentan su teoría en la observación de los abatimientos del líquido en el pozo en un tiempo determinado, el abatimiento puede ser por bombeo en estratos abajo del nivel freático o por infiltración del líquido en suelos no saturados. (Juárez y Rico, 1974)

### **2.7.7. Ensayos de laboratorio para determinar la conductividad hidráulica**

Determinar la conductividad hidráulica mediante ensayos en laboratorio es la forma más común, práctica y confiable, donde se sigue la premisa que todo ensayo en laboratorio reproduzca las mismas condiciones de campo. Para lo cual, se extraen apropiadamente muestras de suelo de tal manera que los resultados obtenidos en laboratorio sean representativos del tipo de suelo que se tiene en campo. Según al tamaño de las partículas del suelo, se han ideado dos permeámetros que se utilizan para determinar la conductividad hidráulica.

#### **2.7.7.1. Ensayo de carga variable**

El ensayo de carga variable, es otro método para determinar la conductividad hidráulica de un suelo en laboratorio, este permeámetro que se muestra en la Figura 9, generalmente es usado para suelos de grano fino como ser arenas finas, limos y arcillas.

En estos suelos, el flujo de agua que circula a través de estos es demasiado lento como para poder hacer mediciones precisas con el permeámetro de carga constante, por lo que el permeámetro de carga variable puede medir conductividades hidráulicas comprendidas entre  $10^{-4} < k < 10^{-8}$  m/s. En un cilindro de unos 100 mm de diámetro se introduce la muestra representativa de suelo, donde los extremos superior e inferior están protegidos por una piedra porosa. Al igual que en el ensayo de carga constante, es importante que la muestra de suelo esté completamente saturada, para lo cual se sigue un procedimiento similar de saturación al anteriormente descrito.

La muestra confinada en el cilindro, se la introduce en un reservorio anegado de agua que cuenta con un vertedor de nivel constante. Luego, se conecta un tubo de carga en el extremo superior del cilindro que contiene la muestra de suelo. La prueba se lleva a cabo llenando el tubo de carga con agua, permitiendo así que el agua desairada pase a través de la muestra de suelo por un tiempo (t). Se registra el nivel de la columna de agua en el tubo de carga al empezar y al finalizar el ensayo.

En algunos casos puede darse la posibilidad de no disponerse de tubos de diámetro variado, en ese caso lo que se hace es hacer variar la altura inicial de la columna de agua en el tubo a elevaciones diferentes. Sin embargo, deben efectuarse algunas correcciones.

En la Figura 9, se muestra el permeámetro de carga variable de forma simplificada. Según la ley de Darcy, el caudal que circula por el sistema será:

$$q = k * i * A$$

Donde:

q= Tasa de flujo del agua

k= coeficiente de permeabilidad

i= Gradiente hidráulico unitario

A= Área de la sección transversal de la muestra de suelo

Para un tiempo t, el agua del tubo de carga desciende de un nivel  $h_1$  hasta un nivel  $h_2$ . Puede decirse entonces que una tasa de flujo q entre los niveles  $h_1$  y  $h_2$  circula por el sistema, hasta rebalsar en el reservorio inferior. Por lo tanto, si el nivel en la columna se reduce un  $dh$  en un tiempo  $dt$  entonces se tendrá que:

$$q = -a * \frac{dh}{dt}$$

Donde:

q = Caudal de agua que circula a través del sistema.

a = Área de la sección transversal del tubo de la columna de agua.

El signo negativo indica la dirección del flujo de agua respecto al sistema de coordenadas asumido, por continuidad se sabe que la cantidad total de agua que circula por el sistema será igual a la cantidad que circulará progresivamente en un tipo dado, por lo tanto:

$$k * A * i = -a * \frac{dh}{dt}$$

Donde:

k= coeficiente de permeabilidad

a= área de la sección transversal de la bureta

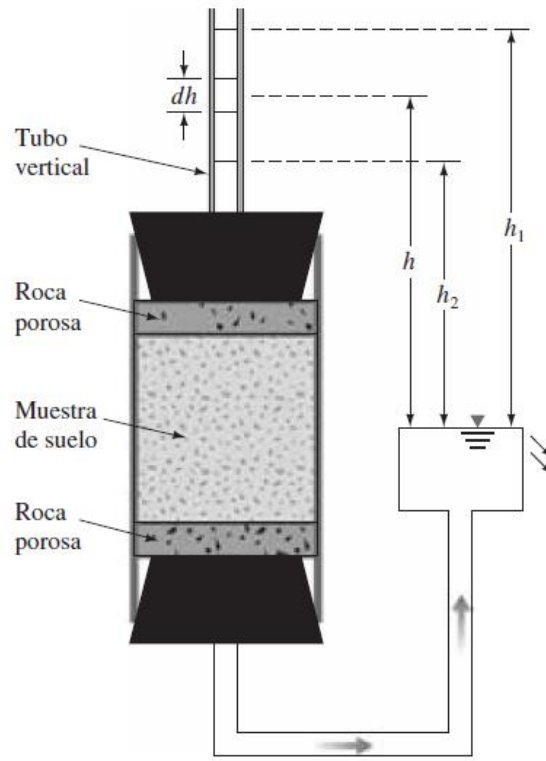
A= área de la sección transversal de la muestra de suelos

i= gradiente hidráulico unitario

dh= diferencia de alturas piezométricas

dt= diferencia de tiempos en el ensayo

**Figura 22.** Prueba de permeabilidad de carga variable



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M, Das

El gradiente hidráulico ( $i$ ) del sistema, se expresa como:

$$i = \frac{h}{L}$$

Reemplazando el gradiente, se tendrá que:

$$k * A * i = -a * \frac{dh}{dt}$$

Donde:

$k$ = coeficiente de permeabilidad

$a$ = área de la sección transversal de la bureta

$A$ = área de la sección transversal de la muestra de suelos

$i$ = gradiente hidráulico unitario

$dh$ = diferencia de alturas piezometricas

$dt$ = diferencia de tiempos en el ensayo



Reordenando e integrando, se tiene que:

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = \frac{k * A}{a * L} * \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$-\ln * \frac{h_2}{h_1} = \frac{k * A}{a * L} * (t_2 - t_1)$$

Despejando, la conductividad hidráulica será:

$$k = \frac{a * L * \ln * \left( \frac{h_1}{h_2} \right)}{A * (t_2 - t_1)}$$

Donde:

k = Conductividad hidráulica.

L = Longitud de la muestra.

a = Área de la sección transversal del tubo.

h<sub>1</sub> = Nivel inicial del agua en el tubo al empezar el ensayo.

h<sub>2</sub> = Nivel final del agua en el tubo al finalizar el ensayo.

A = Área de la sección transversal de la muestra de suelo.

t<sub>1</sub> = Tiempo al iniciar el ensayo, cuando el nivel de agua en el tubo está en h<sub>1</sub>.

t<sub>2</sub> = Tiempo al finalizar el ensayo, cuando el nivel de agua en el tubo está en h<sub>2</sub>.

(Bowles 1990).

## **2.8. PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA**

### **2.8.1. Estadística Descriptiva**

La estadística descriptiva es la ciencia que estudia a los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos.

Se considera que el estudio de un conjunto de datos es descriptivo, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

### **2.8.2. Distribución de frecuencia**

Las distribuciones de frecuencia se exponen, por lo general al inicio del estudio de los métodos estadísticos, debido a que proveen un método de organización de los datos que facilitan su comprensión y una base para simplificar el cálculo de medidas representativas de la población.

Una distribución de frecuencias consiste en la agrupación en diversas categorías o clases de las observaciones tomadas de una población, indicando el número de elementos que pertenecen a cada clase, así como la porción del total de datos que le corresponde a cada una de esas clases. Esta agrupación de los datos permite realizar un mejor análisis del comportamiento de los mismos e inclusive permite llegar a conclusiones sobre su distribución.

La distribución de frecuencias puede ser discreta o continua, según la variable sea cuantitativa discreta o cuantitativa continua.

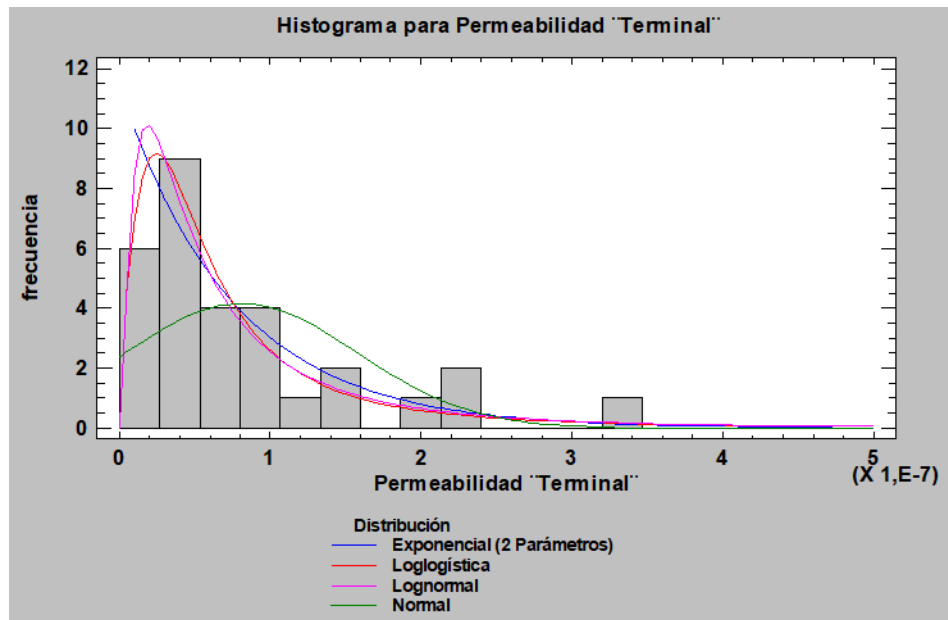
La representación gráfica de una distribución de frecuencias depende del tipo de datos que la constituya. Los datos agrupados en intervalos correspondientes a un carácter cuantitativo, pueden ser representados mediante un histograma.

Se llama histograma a una representación de rectángulos sobre un sistema de ejes coordenados XY. La altura de los rectángulos será proporcional a la frecuencia de clase. El ancho será proporcional a la amplitud de clase. Los rectángulos deben estar unidos entre sí.

Entonces sobre el eje de ordenadas (OY) se indica la frecuencia de clase, sobre el eje de abscisas (OX) se sitúan las marcas de clases, en la parte central de la base de los rectángulos.

Se emplean los histogramas para representar a una clasificación de datos que es como usualmente se expresan los datos de variable continua, o también a una gran cantidad de datos de variable discreta.

**Figura 23.** Histograma de frecuencia



Fuente: Elaboración propia

### 2.8.3. Conceptos básicos de las medias de tendencia central

#### 2.8.3.1. Media

La media (aritmética), por lo general, es la medida numérica más importante que se utiliza para describir datos; comúnmente se la conoce como promedio. Es la medida de tendencia central que se calcula al sumar los valores y dividir el total entre el número de valores.

$$\text{Media} = \frac{\sum x}{n}$$

$\sum x$  = Suma de todos los valores de la muestra.

n = Número de valores muestrales.

### **2.8.3.2. Mediana**

La mediana de un conjunto de datos es la medida de tendencia central que implica el valor intermedio, cuando los valores de los datos originales se presentan en orden de magnitud creciente (o decreciente).

Una desventaja de la media es su sensibilidad a cada valor, de tal forma que una puntuación excepcional puede afectarla de manera drástica. La mediana resuelve, en gran medida, esa desventaja. La mediana es un “valor intermedio”, ya que la mitad de los valores de los datos están por debajo de la mediana y la otra mitad por arriba de ella.

Para calcular la mediana, primero se ordenan los valores (se acomodan en orden) y luego se sigue uno de los siguientes dos procedimientos:

Si el número de valores es impar, la mediana es el número que se localiza exactamente a la mitad de la lista.

Si el número de valores es par, la mediana se obtiene calculando la media de los dos números que están a la mitad.

### **2.8.3.3. Moda**

La moda de un conjunto de datos es el valor que se presenta con mayor frecuencia.

Cuando dos valores se presentan con la misma frecuencia y ésta es la más alta, ambos valores son modas, por lo que el conjunto de datos es bimodal.

Cuando más de dos valores se presentan con la misma frecuencia y ésta es la más alta, todos los valores son modas, por lo que el conjunto de datos es multimodal.

Cuando ningún valor se repite, se dice que no hay moda.

### **2.8.4. Conceptos básicos de las medidas de dispersión**

Indican cuán dispersos o concentrados están los datos. Los más usuales son las que indican la concentración de los valores del conjunto de datos alrededor del valor medio, los más

importantes son la desviación media, varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el recuento estándar.

#### **2.8.4.1. Rango**

El rango de un conjunto de datos es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo.

#### **2.8.4.2. Desviación estándar**

Esta medida nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. La desviación estándar nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza

#### **2.8.4.3. Varianza**

Se define como la media de las diferencias cuadráticas de  $n$  puntuaciones con respecto a su media aritmética.

### **2.8.5. Concepto básico de las medias de posición**

#### **2.8.5.1. Asimetría**

Es una medida de forma de una distribución que permite identificar y describir la manera cómo los datos tienden a reunirse de acuerdo con la frecuencia con que se hallen dentro de la distribución. Permite identificar las características de la distribución de datos sin necesidad de generar el gráfico. Compara la simetría de una curva de frecuencias, respecto a la curva normal.

Tipos de asimetría:

Asimetría negativa o a la izquierda: Se da cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte izquierda de la media. Este tipo de distribución presenta un alargamiento o sesgo hacia la izquierda.

Simétrica: Se da cuando en una distribución se distribuye aproximadamente la misma cantidad de los datos a ambos lados de la media aritmética. No tiene alargamiento o sesgo.

Asimetría positiva o a la derecha: Se da cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte derecha de la media aritmética. Este tipo de distribución presenta un alargamiento o sesgo hacia la derecha.

### **2.8.5.2. Curtosis**

La curtosis mide el grado de agudeza o achatamiento de una distribución con relación a la distribución normal, es decir, mide cuan puntiaguda es una distribución. Compara el perfil de una curva de frecuencia, respecto a la curva normal.

Tipos de curtosis:

Leptocúrtica= Existe una gran concentración.

Mesocúrtica= Existe una concentración normal.

Platicúrtica= Existe una baja concentración.

### **2.8.6. Estadística inferencial**

La estadística inferencial es la ciencia que estudia a los métodos que permiten generalizar o tomar decisiones en base a la información particular o parcial que presenta la estadística descriptiva. Se considera que el estudio de datos es inferencial, cuando se trata de inferir o predecir conclusiones de tal conjunto de datos. Sin embargo, cualquier generalización o predicción no será absoluta, estando su validez restringida por cierta probabilidad.

#### **2.8.6.1. Distribución continua de probabilidad**

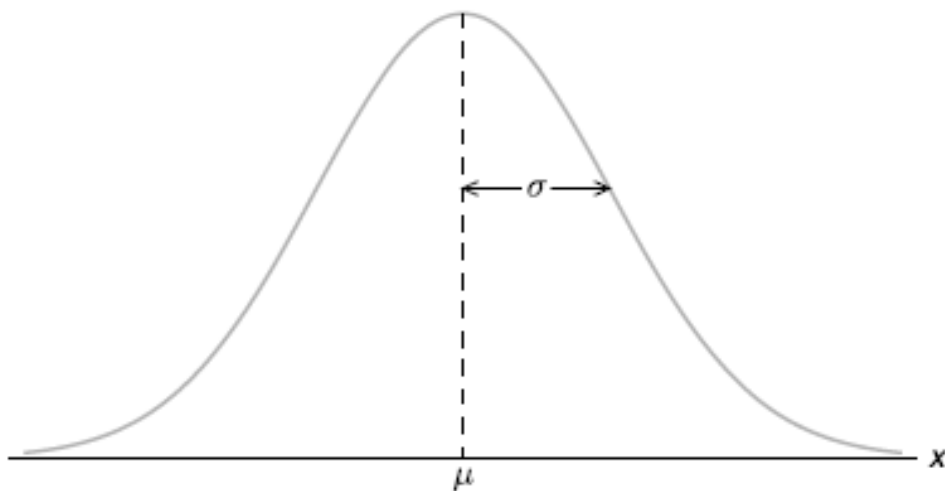
##### **Distribución normal**

La distribución continua de probabilidad más importante en todo el campo de la estadística es la distribución normal. Su gráfica, que se denomina curva normal, es la curva con forma de campana, la cual describe aproximadamente muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. Las mediciones físicas en áreas como los

experimentos meteorológicos, estudios de lluvia y mediciones de partes fabricadas a menudo se explican más que adecuadamente con una distribución normal. Además, los errores en las mediciones científicas se aproximan extremadamente bien mediante una distribución normal. En 1733, Abraham De Moivre desarrolló la ecuación matemática de la curva normal. Ésta ofrece una base sobre la que se fundamenta gran parte de la teoría de la estadística inductiva.

La distribución normal a menudo se denomina distribución gaussiana, en honor de Karl Friedrich Gauss (1777-1855), quien también derivó su ecuación a partir de un estudio de errores en mediciones repetidas de la misma cantidad.

**Figura 24.** La curva normal



Fuente: Elaboración propia

### **Distribución gama y exponencial**

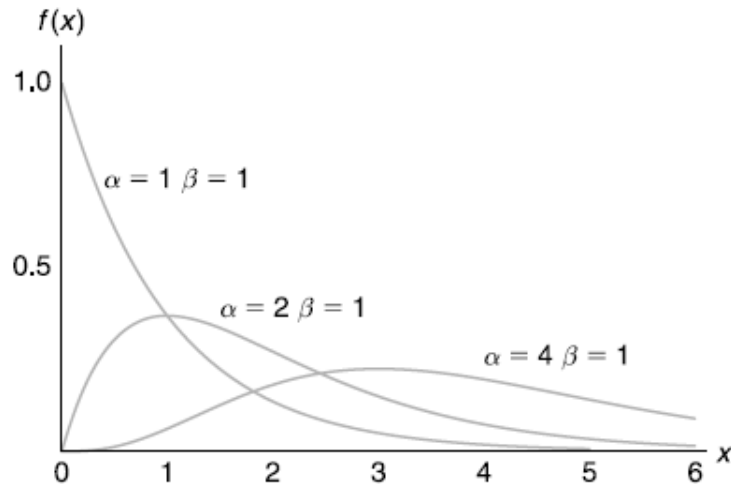
Aunque la distribución normal se puede utilizar para resolver muchos problemas en ingeniería y en la ciencia, hay aún numerosas situaciones que requieren diferentes tipos de funciones de densidad. Dos de estas funciones de densidad, las distribuciones gamma y exponencial, se estudiarán en esta sección.

Resulta que la distribución exponencial es un caso especial de la distribución gamma.

Ambas encuentran un gran número de aplicaciones. Las distribuciones exponenciales y gamma juegan un papel importante en la teoría de colas y en problemas de confiabilidad.

Los tiempos entre llegadas en instalaciones de servicio, y los tiempos de operación antes del fallo de partes componentes y sistemas eléctricos, a menudo quedan bien modelados mediante la distribución exponencial. La relación entre la distribución gamma y la exponencial permite que la gamma se involucre en tipos de problemas similares.

**Figura 25.** Distribución gama



Fuente: Elaboración propia.

### 2.8.6.2. Prueba de hipótesis

Hay dos tipos de análisis estadísticos que pueden realizarse para probar hipótesis: los análisis paramétricos y los no paramétricos. Cada tipo posee sus características y presuposiciones que lo sustentan; la elección de qué clase de análisis efectuar depende de los supuestos. De igual forma, cabe destacar que en una misma investigación es posible llevar a cabo análisis paramétricos para algunas hipótesis y variables, y análisis no paramétricos para otras. Asimismo, los análisis a realizar dependen del planteamiento, tipo de hipótesis y el nivel de medición de las variables que las conforman.

#### Análisis paramétrico

Para realizar análisis paramétrico debe partirse de los siguientes supuestos:

- 1.- La distribución poblacional de la variable dependiente es normal.



2.- El nivel de medición de las variables es por intervalos o razón.

3.- Cuando dos o más poblaciones son estudiadas, tienen una varianza homogénea.

### **Análisis no paramétrico**

Las pruebas no paramétricas son aquellas que se encargan de analizar datos que no tienen una distribución particular y se basan en una hipótesis, pero los datos no están organizados de forma normal. Aunque tienen algunas limitaciones, cuentan con resultados estadísticos ordenados que facilitan su comprensión

#### **2.8.6.3. Prueba de Anderson Darling**

El estadístico Anderson-Darling mide qué tan bien siguen los datos una distribución específica. Para un conjunto de datos y distribución en particular, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será este estadístico. Por ejemplo, usted puede utilizar el estadístico de Anderson-Darling para determinar si los datos cumplen el supuesto de normalidad para una prueba t.

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

$H_0$  = Los datos siguen una distribución especificada

$H_1$  = Los datos no siguen una distribución especificada

Utilice el valor p correspondiente (si está disponible) para probar si los datos provienen de la distribución elegida. Si el valor p es menor que un nivel de significancia elegido (por lo general 0,05 o 0,10), entonces rechace la hipótesis nula de que los datos provienen de esa distribución. Minitab no siempre muestra un valor p para la prueba de Anderson-Darling, porque este no existe matemáticamente para ciertos casos.

También puede utilizar el estadístico de Anderson-Darling para comparar el ajuste de varias distribuciones con el fin de determinar cuál es la mejor. Sin embargo, para concluir que una distribución es la mejor, el estadístico de Anderson-Darling debe ser sustancialmente menor que los demás. Cuando los estadísticos están cercanos entre sí, se deben usar criterios adicionales, como las gráficas de probabilidad, para elegir entre ellos.

#### 2.8.6.4. Prueba t de Student

En estadística, una prueba t de Student, es cualquier prueba en la que el estadístico utilizado tiene una distribución t de Student si la hipótesis nula es cierta. Se aplica cuando la población estudiada sigue una distribución normal pero el tamaño de muestra es demasiado pequeño como para que el estadístico en el que está basada la inferencia esté normalmente distribuido, utilizándose una estimación de la desviación típica en lugar del valor real. Es utilizado en análisis discriminante.

Entre los usos más frecuentes de las pruebas t se encuentran:

El test de posición de muestra única por el cual se comprueba si la media de una población que se conoce posee una distribución normal, tiene un valor especificado en una hipótesis nula.

El test de posición para dos muestras, por el cual se comprueba si las medias de dos poblaciones distribuidas en forma normal son iguales.

Todos estos test son usualmente llamados test t de Student, a pesar de que, estrictamente hablando, tal nombre solo debería ser utilizado si las varianzas de las poblaciones estudiadas pueden ser asumidas como iguales; la forma de los ensayos que se utilizan cuando esta asunción se deja de lado suelen ser llamadas a veces como prueba t de Welch. Estas pruebas suelen ser comúnmente nombradas como pruebas t desapareadas o muestras independientes, debido a que tienen su aplicación más típica cuando las unidades estadísticas que definen a ambas muestras que están siendo comparadas no se superponen.

El test de hipótesis nula por el cual se demuestra que la diferencia entre dos respuestas medidas en las mismas unidades estadísticas es cero.

La mayor parte de las pruebas estadísticas t tienen la forma  $T = \frac{Z}{s}$ , donde z y s son funciones de los datos estudiados. Típicamente, z se diseña de forma tal que resulte sensible a la hipótesis alternativa, mientras que s es un parámetro de escala que permite que la distribución de T pueda ser determinada.

Las suposiciones subyacentes en una prueba t son:

Que  $z$  sigue una distribución normal bajo la hipótesis nula.

$ps^2$  sigue una distribución  $\chi^2$  con  $p$  grados de libertad bajo la hipótesis nula, y donde  $p$  es una constante positiva, donde  $z$  y  $s$  son estadísticamente independientes.

En una prueba t específica, estas condiciones son consecuencias de la población que está siendo estudiada, y de la forma en que los datos han sido muestreados.

Para una prueba t de comparación de medias de dos muestras independientes, deberíamos realizar las siguientes suposiciones:

Cada una de las dos poblaciones que están siendo comparadas sigue una distribución normal. Esto puede ser demostrado utilizando una prueba de normalidad, tales como una prueba Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov, o puede ser determinado gráficamente por medio de un gráfico de cuantiles normales Q-Q plot.

Si se está utilizando la definición original de Student sobre su prueba t, las dos poblaciones a ser comparadas deben poseer las mismas varianzas, esto se puede comprobar utilizando la prueba F de igualdad de varianzas, una prueba de Levene, una prueba de Bartlett, o una prueba de Brown-Forsythe. Si los tamaños muestrales de los dos grupos comparados son iguales, la prueba original de Student es altamente resistente a la presencia de varianzas desiguales.

#### **2.8.6.5. Prueba W de Mann-Whitney**

El test de Mann Whitney Wilcoxon (WMW), también conocido como Wilcoxon Rank-sum, es un test no paramétrico que contrasta si dos muestras proceden de poblaciones equidistribuidas.

La idea en la que se fundamenta este test es la siguiente: si las dos muestras comparadas proceden de la misma población, al juntar todas las observaciones y ordenarlas de menor a mayor, cabría esperar que las observaciones de una y otra muestra estuviesen intercaladas aleatoriamente. Por lo contrario, si una de las muestras pertenece a una población con valores mayores o menores que la otra población, al ordenar las

observaciones, éstas tenderán a agruparse de modo que las de una muestra queden por encima de las de la otra.

#### **2.8.6.6. Regresión y correlación**

El análisis de regresión trata de establecer la forma de la relación entre variables, es decir se trata de encontrar una relación funcional, que para el caso de dos variables será de la forma  $Y = f(x)$ , de manera que se pueda calcular el valor de una variable de acuerdo al valor que tome la otra variable.

El análisis de correlación trata de establecer el grado de relación entre dos variables, es decir se trata de medir cuan relacionadas están entre sí las variables.

#### **Diagrama de dispersión**

A los datos de una tabla, expresados como puntos en el plano coordenado se llama diagrama de dispersión. Las coordenadas rectangulares están conformadas por dos rectas perpendicularmente dispuestas. La recta horizontal se llama eje de abscisas, la recta vertical se llama eje de ordenadas. Todo punto en el plano se expresa como  $(X, Y)$ ; en forma general un punto conocido se designa por  $(X_i, Y_i)$ . Al conjunto de puntos en el plano se lo llama también nube de puntos.

#### **Regresión**

El análisis de regresión procura conocer una ecuación o función que exprese la relación entre dos variables, sin embargo, debido a que existiera diversidad de ecuaciones posibles, debe buscarse aquella que mejor represente la relación.

#### **Regresión lineal simple**

Cuando a los puntos de un diagrama de dispersión se trata de expresarlos por una recta, se llama regresión lineal simple. De acuerdo al diagrama de dispersión, donde se ubicaron todos los puntos conocidos, se aprecia que es posible insertar una recta que estará razonablemente cercana a todos los puntos. Es decir que es posible representar a todos los

puntos por la ecuación de una recta. Cuando se presenta un diagrama de dispersión de este tipo se dice que hay una relación lineal.

### **Regresión no lineal**

La regresión no lineal es un método para encontrar un modelo no lineal para la relación entre la variable dependiente y un conjunto de variables independientes. A diferencia de la regresión lineal tradicional, que está restringida a la estimación de modelos lineales, la regresión no lineal puede estimar modelos con relaciones arbitrarias entre las variables independientes y las dependientes. Esto se lleva a cabo usando algoritmos de estimación iterativos.

### **Ecuaciones de curvas de tendencia**

Otras formas de ecuaciones generales con las cuales se puede procurar el ajuste de curvas de un diagrama de dispersión son:

Lineal (Línea recta)	$Y = a_0 + a_1 \cdot X$
Lineal múltiple (Plano)	$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2$
Curva cuadrática (Parábola)	$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2$
Curva cúbica	$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3$
Hipérbola	$Y = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot X}$
Curva exponencial	$Y = a \cdot e^{b \cdot x}$
Curva potencial	$Y = a \cdot X^b$

Para elegir la ecuación a emplear, es conveniente trazar previamente el diagrama de dispersión, para observar su tendencia general y de acuerdo a la forma obtenida decidir.

Una decisión más precisa se obtiene luego de calcular en cada caso sus coeficientes de correlación.

## **Coefficiente de estimación**

El coeficiente de estimación, calcula el error típico de Y. Propiamente mide la magnitud de error cometido al calcular un valor de Y para un cierto valor de X de acuerdo a una ecuación de regresión. Al coeficiente de estimación se lo llama también error típico XY, o error típico de estimación.

Si Y es la variable dependiente de una ecuación de regresión, el coeficiente de estimación simple se define como:

$$S_{Y.X} = \sqrt{\frac{\Sigma(Y - Y_{Est})^2}{N-2}}$$

Donde:

Y = Dato inicial de esta variable.

$Y_{Est}$  = Valor de Y obtenido en la ecuación.

N = Número de datos de la muestra.

## **Correlación**

El análisis de correlación trata de establecer el grado de relación entre dos variables, es decir se trata de medir cuan dependiente es una variable de la otra. Se entiende que existe correlación entre dos variables, cuando es evidente que al variar una de ellas, también se produce variación de la otra. Cuando se trata de la relación entre dos variables, se llama correlación simple. A la relación entre tres o más variables se llama correlación múltiple. Cuando la relación entre dos variables se representa por una recta se la llama correlación lineal. Si la relación se representa por una curva cualquiera, se tiene una correlación no lineal. Si de un conjunto de puntos, se traza su diagrama de dispersión, es posible observar las tendencias que muestran, para concluir razonablemente cuál es el tipo de correlación que muestran.

## Coefficiente de correlación

Para medir el grado de relación existente entre variables, se usa el coeficiente de correlación. Si entre las variables X, Y logra establecerse una relación funcional de la forma  $F=(X)$ :

$$R = \pm \sqrt{\frac{\Sigma(Y_{Est} - \bar{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}}$$

Donde:

Y = Dato inicial de esta variable.

$\bar{Y}$  = Media aritmética.

$Y_{Est}$  = Valor de Y obtenido en la ecuación.

Interpretación: El coeficiente R de puede variar de -1 a +1, donde:

-1,00 = Correlación negativa perfecta.

-0,90 = Correlación negativa muy fuerte.

-0,75 = Correlación negativa considerable.

-0,50 = Correlación negativa media.

-0,25 = Correlación negativa débil.

0,00 = No existe correlación alguna entre las variables.

+0,10 = Correlación positiva muy débil.

+0,25 = Correlación positiva débil.

+0,50 = Correlación positiva media.

+0,75 = Correlación positiva considerable.

+0,90 = Correlación positiva muy fuerte.

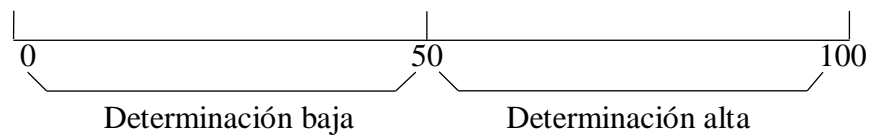
+0,10 = Correlación positiva perfecta.

## Coeficiente de determinación

Para efectuar comparaciones, se emplea el coeficiente de determinación. El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación:  $R^2$ .

El coeficiente de determinación es un número positivo que varía entre 0 y 1, permite indicar el grado de certeza con que una variable depende de la otra. Al multiplicar por 100 el coeficiente de determinación será un porcentaje de validez con que se afirma que una variable depende de otra. (Carrasco, 2007)

**Tabla 13.** Interpretación del coeficiente de determinación



Fuente: Estadística y Probabilidades, Víctor Chungara Castro



**CAPÍTULO III**  
**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

La medición de la permeabilidad, se determinó en el laboratorio utilizando muestras inalteradas de distintos suelos arcillosos; para las pruebas de consolidación y permeabilidad, se obtuvieron terrones de suelo inalterados, los mismos fueron extraídos de diferentes lugares del departamento de Tarija, provincia Cercado.

Posteriormente se desempeñó un trabajo artesanal de tallado, donde se trabajaron las muestras, para lo cual se tomó en cuenta el sentido de la estratificación in situ que tenía el suelo, mismo que fue tomado al momento de la extracción de las muestras, con el propósito de obtener resultados representativos y sobre todo reales del coeficiente de permeabilidad ‘ $k$ ’.

Se efectuaron los ensayos de caracterización, donde se estableció trabajar con cinco tipos de suelos finos diferentes, que de acuerdo a la clasificación SUSC son: CH, CL, MH, ML, ML-CL; con los mismos se realizaron los ensayos de consolidación que se desempeñó de forma satisfactoria utilizando el método de Taylor para obtener la consolidación primaria; paralelamente se saturaron las muestras y se desarrolló el ensayo de permeabilidad utilizando el método de carga variable.

#### **3.2. ZONA DE ESTUDIO**

En los sectores donde se establecieron las zonas de estudio se pudo encontrar y verificar que son suelos con un alto nivel de sensibilidad a la erosión, realizando una inspección visual; por todos los barrios, se observó que el material que predomina en el valle central de la ciudad de Tarija son los suelos arcillosos, al mismo tiempo se pudo evidenciar que muchas de las viviendas, sufrían asentamientos en sus fundaciones provocando fisuras en paredes de algunas viviendas.

### **3.2.1. Criterios de selección de muestras**

El presente trabajo de investigación, fue aplicado específicamente a suelos finos, razón por la cual se tenía el objetivo de identificar lugares en los cuales predominaba el suelo arcilloso; para tal objetivo se llevó a cabo la identificación visual y manual tomando en cuenta técnicas que recomienda la norma ASTM D 2488, para la identificación de suelos finos in situ.

En ese sentido se utilizó muestras de suelos machacados y pulverizados, con el fin de realizar la prueba de tenacidad, la cual nos ayudó como orientación al momento de seleccionar las muestras.

#### **3.2.1.1. Tenacidad consistencia cerca del límite plástico**

Una de las técnicas recomendadas por la norma ASTM D2488, es la prueba de tenacidad, la cual consiste en pulverizar una cantidad de 10 cm<sup>3</sup> de suelo, amasar con la palma de las manos hasta que el mismo alcance una consistencia de masilla, luego rolar sobre una superficie plana hasta conseguir una moldura cilíndrica de 3 mm. Se amasa y se vuelve a rolar varias veces hasta que se ponga el espécimen tieso, donde pierde su plasticidad y se desmorona cuando alcanza su límite plástico.

De acuerdo a la norma, el comportamiento del ensayo in situ obedece a tres alternativas, que se mencionan a continuación, las mismas nos permite tener una referencia del tipo de suelo que se está analizando.

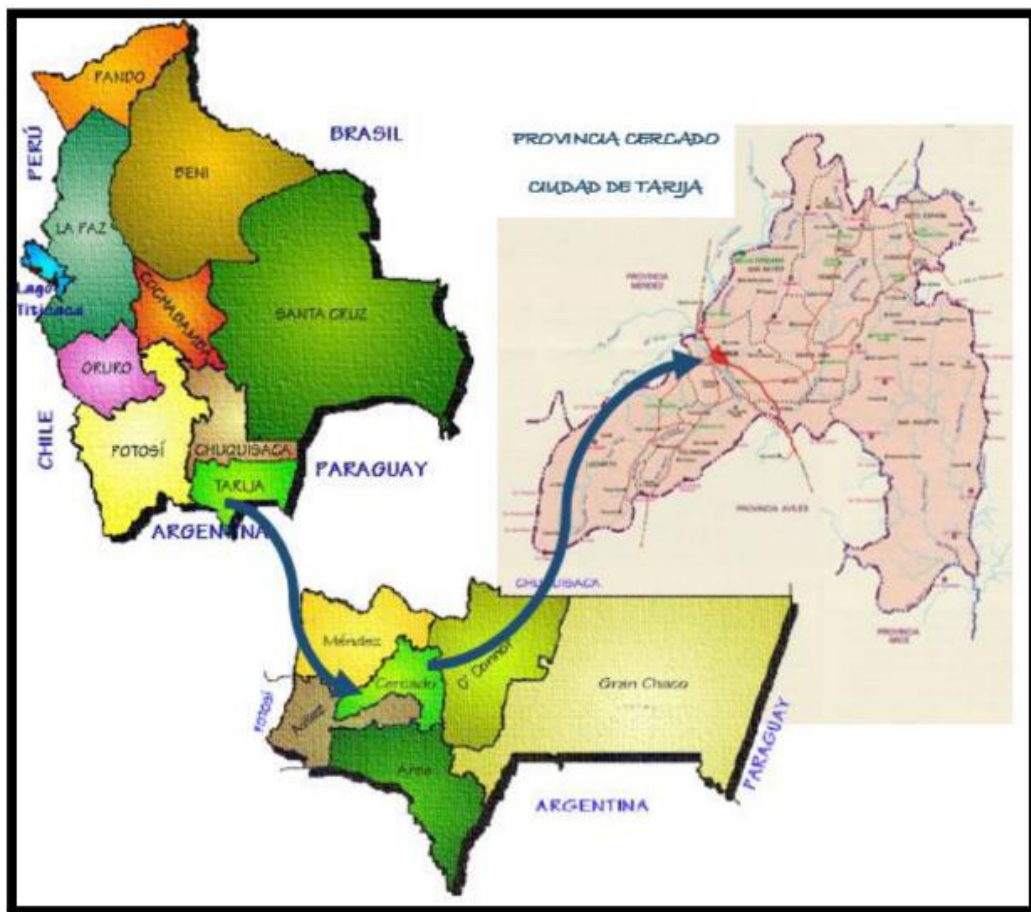
- a) Plasticidad baja, cuando se rola e inmediatamente se desmorona (ejemplos: limos, arenas arcillosas)
- b) Plasticidad media, cuando se rola el suelo y el rollito al ser presionado con los dedos se deshace inmediatamente (ejemplos: mezclas de arcillas y limos, arenas arcillosas)
- c) Plasticidad elevada, cuando se rola el suelo y al ser presionado el rollito no se quiebra ante una presión del dedo fuerte (ejemplo: arcilla)

### 3.2.2. Descripción y ubicación de los suelos estudiados

Se realizó una inspección a los barrios en estudio, haciendo observaciones e identificaciones visuales de la zona, estableciendo que el material que predomina estos suelos es el arcilloso característico de los valles de Tarija.

Se pudo reconocer diferentes tipos de suelos finos como ser, limos inorgánicos, arcillas inorgánicas de alta plasticidad, limos inorgánicos arenosos y arcillosos ligeramente plásticos y arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad.

**Imagen 1.** Mapa político de Bolivia, Departamento de Tarija y Provincia Cercado.



Fuente: [www.educa.com.bo](http://www.educa.com.bo)

Los lugares de recolección de las muestras para nuestra caracterización e investigación fueron los siguientes; barrios Torrecillas, Constructor, San Jorge II, San Blas y Los Chapacos.

**3.2.2.1. Fotos satelitales de Google Earth de los barrios de extracción de muestras.**

**Imagen 2.** Barrio San Jorge II de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

**Imagen 3.** Barrio Los Chapacos de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

**Imagen 4.** Barrió Torrecillas de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

**Imagen 5.** Barrió El Constructor de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

**Imagen 6.** Barrio San Blas de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

### 3.2.3. Coordenadas de las zonas de estudio

**Tabla 14.** Coordenadas de los barrios de estudio

Barrio	Coordenadas		Altura
	Latitud "S"	Longitud "N"	"m"
Los Chapacos	21°29'57,97"S	64°44'14,03"O	1938
Torrecillas	21°33'23,76"S	64°40'14,80"O	1861
Constructor	21°31'8,44"S	64°42'55,28"O	1902
San Blas	21°35'26,60"S	64°42'21,57"O	1862
San Jorge II	21°33'27,89"S	64°41'08,86"O	1866

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

#### 3.3.1. Programa estratégico de trabajo

Para determinar la caracterización y la permeabilidad de las muestras de suelos arcillosos, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio.

**Figura 26.** Programa estratégico de trabajo



Fuente: Elaboración propia



### **3.3.2. Extracción de muestras**

Para la extracción de la muestra se tomó en cuenta el documento referencial NL T203.

#### **3.3.2.1. Introducción**

El proceso para la obtención de las muestras de suelo, es la parte esencial de la presente investigación puesto que de ella depende el comportamiento y desarrollo de las pruebas de consolidación y permeabilidad, en ese sentido se busca que la muestra sea representativa del terreno. Un muestreo adecuado es de primordial importancia, a fin de alcanzar resultados razonablemente dignos de crédito.

Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas. Se dice que una muestra es:

Alterada, cuando no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraba en el terreno de donde procede y se recolecta a medida que se va realizando el muestreo. Inalterada, es aquella muestra que preserva, en la medida de lo posible, la estructura y el contenido de humedad para que represente realmente las condiciones de campo.

Para el presente trabajo de Proyecto de Grado, las muestras con las que se trabajó son de tipo:

Alterada o perturbada, para los ensayos de contenido de humedad, granulometría, peso específico, sedimentación por el método del hidrómetro límites de Atrrerberg.

Inalterada, para realizar los ensayos de consolidación y permeabilidad.

#### **3.3.2.2. Objetivos**

Obtener muestras de suelos cohesivos que conserven la estructura y humedad que tienen en su estado natural, cuando pueden tomarse superficialmente o de una profundidad a la que se llega por excavación a cielo abierto o de una galería.

Las dimensiones, forma y demás características de las muestras inalteradas, dependen del tipo de ensayo al cual van a estar sometidas.

### **3.3.2.3. Toma de muestras**

Básicamente hay tres procedimientos generales para tomar este tipo de muestras:

- a) Muestras en bloque o muestra-trozo, tomadas de la superficie del terreno, del fondo de un pozo o del piso de una galería.
- b) Muestras en bloque, tomadas de una pared vertical de un pozo o galería.
- c) Muestras cilíndricas

La extracción de muestras para la presente investigación, fue en base a la norma NL T203, la misma nos recomienda tres formas distintas para obtener muestras inalteradas; de acuerdo a las condiciones del terreno las muestras fueron tomadas de una pared vertical u corte de excavaciones que se realizaba en el lugar.

### **3.3.2.4. Equipo utilizado**

Se deben elegir las herramientas cortantes más adecuadas para cada tipo de suelo

Herramientas para excavar: Pico, pala, barreta, etc.

Bolsas, ya sean plásticas de lona, táper de plástico, Film plástico.

Herramientas para tallar la muestra: Cuchillos, martillo, cincel, lijas, sierra.

Moldes cilíndricos, con borde afilado y firme.

Papel estañado, cuerda y demás elementos para envolver.

Material para la identificación, incluye los elementos necesarios, tales como rótulos y marcadores para identificar adecuadamente las muestras.

### **3.3.2.5. Procedimiento de extracción de la muestra**

El procedimiento para la obtención de las muestras en bloque, tomadas de una pared vertical o corte de un pozo o galería, se describe a continuación:

Se optó por tomar las muestras en lugares donde se realizaban excavaciones de terreno, seguidamente se identificó bloques de terrones inalterados en las paredes de los cortes; con la ayuda de la barreta se aflojaron los terrones para luego ser extraído con la mayor precaución posible, evitando algún tipo de golpe, es importante mencionar que se orientó el bloque de acuerdo a la estratificación del suelo, al mismo tiempo se realizó un control en cuanto a la profundidad, a la que se encontraban las muestras, con ese propósito se registró las profundidades de extracción, tomando en cuenta que la altura mínima según

la norma española de edificación NBE-AE-88, es de tres metros para fundar en suelos arcillosos.

Se tomó una cantidad de 500 gr de suelo alterado, al momento de la extracción en campo, para determinar el contenido de agua en el terreno. Para lo cual se utilizó bolsas plásticas y un táper hermético de plástico con su etiqueta de identificación, que ayudó a la muestra mantener la humedad natural, hasta trasladarla al laboratorio.

Una vez extraídos los terrones de suelos, se realizó el trabajo artesanal de tallado; para el ensayo de permeabilidad se necesitaban 25 moldes cilíndricos, de 3 pulgadas de diámetro y una altura aproximada de 13 cm, así mismo para el ensayo edométrico se necesitó 30 galletas cuadradas de 6 cm de lado con un espesor aproximado de 2.5 cm; el trabajo de tallado se realizó tomando siempre la referencia marcada de la estratificación de suelo en sentido vertical, para lo cual se utilizó herramientas de corte, como: cuchillos, martillo, cincel, lijas, sierra. etc. Es preciso mencionar que este trabajo fue realizado con la mayor precaución posible, puesto que del mismo depende la validez de los resultados.

Una vez talladas las muestras se procedió a envolverlas con el papel estañado y film plástico, con el propósito de mantener las características de suelo, así mismo se las identificó con sus respectivas etiquetas.

**Tabla 15.** Resumen del registro de profundidad de extracción de las muestras

<b>Barrio</b>	<b>Profundidad de extracción de muestras.</b>
	<b>“m”</b>
Los Chapacos	3,50
Torrecillas	4,10
Constructor	4,00
San Blas	4,34
San Jorge II	7,25

Fuente: Elaboración propia

Las muestras para la prueba de consolidación deben mantener en lo posible, su estructura intacta, con el fin de no perder sus características in situ. El ensayo de consolidación se realiza para determinar ciertos parámetros que se utilizan para predecir la velocidad y la magnitud del asentamiento de estructuras fundadas sobre suelos arcillosos; en ese sentido y de acuerdo a la norma española de edificación NBE-AE-88, la misma nos recomienda que para suelos finos se debe tener una profundidad de fundación de entre, tres a cuatro metros; para tal efecto al momento de realizar la extracción de muestras se tomó en cuenta este parámetro.

**Tabla 16.** Presiones admisibles en el terreno de cimentaciones

Naturaleza del terreno	Presión admisible en kg/cm <sup>2</sup> , para profundidad de cimentación en metros de:				
	0	0,5	1	2	>3
1. Rocas (1)					
No estratificadas	30	40	50	60	60
Estratificadas	10	12	16	20	20
2. Terrenos sin cohesión (2)					
Graveras	-	4	5	6,3	8
Arenosos gruesos	-	2,5	3,2	4	5
Arenosos finos	-	1,6	2	2,5	3,2
3. Terrenos coherentes					
Arcillosos duros	-	-	4	4	4
Arcillosos semiduros	-	-	2	2	2
Arcillosos blandos	-	-	1	1	1
Arcillosos fluidos	-	-	0,5	0,5	0,5
4. Terrenos deficientes	En general resistencia nula, salvo que se determine experimentalmente el valor admisible.				
Fangos					
Terrenos orgánicos Rellenos sin consolidar					
OBSERVACIONES:					
(1) a) Los valores que se indican corresponden a rocas sanas, pudiendo tener alguna grieta. b) Para rocas meteorizadas o muy agrietadas las tensiones se reducirán prudencialmente.					
(2) a) Los valores indicados se refieren a terrenos consolidados que requieren el uso del pico para removerlos. b) Los valores indicados corresponden a una anchura de cimiento igual o superior a 1 m. En caso de anchuras inferiores, la presión se multiplicará por la anchura del cimiento expresada en metros.					

Fuente: Norma Española de Edificación. "NBE-AE-88"

**Imagen 7. Extracción y Tallado de muestras.**



Identificación visual del lugar de extracción de las muestras



Excavaciones de terreno



Desprendimiento de terrones in situ



Transporte de material alterado en un recipiente hermético



Tallado artesanal de muestras para el ensayo de permeabilidad



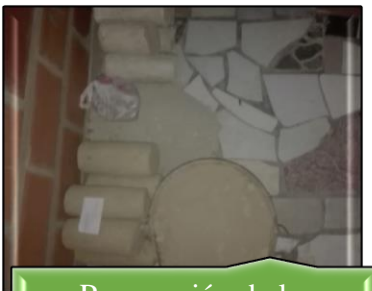
Transporte de muestras



Transporte de muestras



Preparación de muestras para el tallado



Preparación de las muestras



Herramientas utilizadas para el tallado.



Tallado de muestras para el ensayo de consolidación



Sellado de muestras con papel estañado.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3. Determinación en laboratorio del contenido de humedad de suelo

Para la determinación del contenido de humedad de las muestras en estudio se tomó en cuenta el documento referencial ASTM D2216.

#### 3.3.3.1. Introducción:

El contenido de humedad, se define como la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y que luego de someterlo a elevadas temperaturas se puede conocer su valor, el mismo se representa en porcentajes.

#### 3.3.3.2. Objetivo:

Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca, y mezclas de suelo-agregado por peso. El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material. Este método no da resultados verdaderamente representativos para materiales que contengan cantidades significativas de haloisita, montmorillonita, o minerales de yeso; suelos altamente orgánicos o materiales en los cuales el agua de los poros contiene sólidos disueltos (como sales en el caso de depósitos marinos).

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se desarrolla en el ANEXO I.

**Tabla 17.** Resumen de los resultados del porcentaje de humedad en los suelos

Barrio	Contenido de humedad
	“%”
Los Chapacos	5,76
Torrecillas	1,43
Constructor	1,98
San Blas	4,34
San Jorge II	7,25

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 8.** Determinación del contenido de humedad.



Fuente: Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO I.

### **3.3.4. Análisis granulométrico por tamizado**

Para el análisis granulométrico por tamizado de las muestras en estudio se tomó en cuenta el documento referencial ASTM D422; AASHTO T88.

#### **3.3.4.1. Introducción**

La granulometría mecánica de los suelos, no es más que el fraccionamiento de una muestra de suelo, en varias partes considerando el tamaño de las partículas de suelo.

Esto se lo realiza de acuerdo a la disposición de una serie de tamices de bronce que tiene la forma de una canasta circular, pero que en el fondo es constituido de una malla metálica de abertura cuadrada.

#### **3.3.4.2. Objetivos**

Este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz #200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

**Tabla 18.** Resumen de los resultados de la granulometría

<b>Granulometría</b>				
<b>Barrio</b>	<b>% que pasa del total N°4</b>	<b>% que pasa del total N°10</b>	<b>% que pasa del total N°40</b>	<b>% que pasa del total N°200</b>
Los Chapacos	100	100	99,96	99,85
Torrecillas	100	100	99,77	80,39
Constructo	100	100	99,96	99,01
San Blas	100	100	99,85	97,10
San Jorge II	100	100	99,98	99,21

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 9.**Granulometría por tamizado



Fuente: Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO I.



### **3.3.5. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro**

Para el análisis granulométrico por medio del hidrómetro de las muestras en análisis, se tomó en cuenta el documento referencial ASTM D422.

#### **3.3.5.1. Introducción**

El método del hidrómetro ayuda a determinar la distribución del tamaño de las partículas del suelo, es decir las partículas que pasan la abertura de 0,0075 mm. Está basado en la ley de Stokes la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera.

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños.

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas, suelos dispersos, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo, para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelo que para el tamiz de 2.00 mm (N° 10) para suelos granulares. Cuando se quiere más precisión el análisis del hidrómetro se debe realizar a la fracción del suelo que pase en el tamiz de 75 mm (N° 200).

#### **3.3.5.2. Objetivos**

- Determinar la distribución granulométrica del material que pasa el tamiz (N° 200), basándose a la relación de velocidad de una esfera que cae libremente a través de un fluido y su diámetro
- Establecer el (%) de limo y de arcilla de una muestra de suelo

**Tabla 19.** Resumen de los resultados del análisis granulométrico a través del hidrómetro.

<b>Hidrómetro</b>		
<b>Barrio</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Limo</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>
Los Chapacos	31,40	68,45
Torrecillas	17,21	63,18
El Constructor	19,71	79,30
San Blas	13,54	83,56
San Jorge II	30,26	68,95

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 10.** Granulométrica por medio del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

### 3.3.6. Determinación del peso específico de los suelos

Para la determinación del peso específico de las muestras se tomó en cuenta el documento referencial ASTM D854; AASHTO T100.

#### 3.3.6.1. Introducción

La densidad de los sólidos es conocida como la densidad relativa del suelo y se la conoce como la siguiente expresión  $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$

#### 3.3.6.2. Objetivos

Este método establece el procedimiento para determinar, mediante un picnómetro, la densidad de partículas sólidas de suelos compuestos por partículas menores que 5 mm.

**Tabla 20.** Resumen de los resultados del peso específico de los suelos

<b>Barrios.</b>	<b>Peso específico</b>
	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
Los Chapacos	2,730
Torrecillas	2,697
El Constructor	2,695
San Blas	2,674
San Jorge II	2,686

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 11.** Determinación del peso específico de los sólidos.



Fuente: Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

### **3.3.7. Determinación del límite líquido de los suelos**

Para la terminación del límite líquido de las muestras se tomó en cuenta el documento referencial ASTM D4318; AASHTO T89.

#### **3.3.7.1. Introducción**

El límite líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remodelado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remodelada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

#### **3.3.7.2. Objetivos**

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

**Imagen 12.** Determinación del límite plástico.



Fuente:

Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

### **3.3.8. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos**

Para la determinación del límite plástico e índice de plasticidad de las muestras se tomó en cuenta el documento referencial D4318; AASHTO T90.

#### **3.3.8.1. Introducción**

El límite plástico es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1 cm. de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

#### **3.3.8.2. Objetivos**

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

**Tabla 21.** Resumen de los resultados de los límites de consistencia

Barrio	Límites de Atterberg		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Los Chapacos	51	27	25
Torrecillas	27	22	5
El Constructor	34	21	12
San Blas	29	26	3
San Jorge II	54	32	22

Fuente: Elaboración propia

**Imagen 13.** Determinación del límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO 1

### 3.3.9. Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS.

El proceso de clasificación se realizó de acuerdo a la norma ASTM D2487

#### 3.3.9.1. Introducción

Esta norma describe un sistema para clasificar suelos minerales y orgánico-minerales para propósitos de Ingeniería basados en la determinación en el laboratorio de las características del tamaño de las partículas, límite líquido, e índice de plasticidad y deberá ser usado cuando se requiera una clasificación precisa

#### 3.3.9.2. Objetivos

Desarrollar una forma sistemática de describir, caracterizar y clasificar los suelos.  
Agrupar los suelos de acuerdo a sus características y propiedades geotécnicas similares.  
Correlaciones entre categorías de clasificación y propiedades geotécnicas relevantes

**Tabla 22.** Resumen de los resultados de clasificación de suelos

<b>Clasificación y descripción de las muestras</b>			
<b>Barrios.</b>	<b>SUCS</b>	<b>AASHTO</b>	<b>Descripción</b>
Los Chapacos	CH	A-7-5 <sup>(16)</sup>	Arcilla inorgánica de alta plasticidad, arcillas francas.
Torrecillas	ML-CL	A-4 <sup>(8)</sup>	Arcilla de Baja Plasticidad, limo de baja plasticidad.
El Constructor	CL	A-6 <sup>(9)</sup>	Arcilla inorgánica de baja o mediana plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
San Blas	ML	A-4 <sup>(8)</sup>	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos
San Jorge II	MH	A-7-5 <sup>(16)</sup>	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.

Fuente: Elaboración propia

Nota: El procedimiento y la descripción de la práctica se verán en el ANEXO I.

### **3.4. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.**

#### **3.4.1. Permeámetro de carga variable.**

El ensayo de permeabilidad de carga variable, viene referenciado a través del ensayo permeabilidad de suelos granulares, carga constante ASTM D2434; AASHTO T215, así mismo en el manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil de Joseph E. Bowles, se describe el procedimiento de forma detallada de este método.

##### **3.4.1.1. Introducción**

La permeabilidad es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él, una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable, de tal forma el parámetro que determina esta propiedad es el coeficiente de permeabilidad "k", y se basa en la aplicación de la ley de Darcy.

##### **3.4.1.2. Objetivos**

Este método de ensayo cubre un procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos (arenas finas tales como limos y arcillas).

##### **3.4.1.3. Equipos y material utilizado**

El equipo de permeabilidad con el que cuenta el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, está diseñado para las determinaciones en laboratorio de la permeabilidad de suelos de grano fino o de grano grueso para un flujo laminar de agua donde las muestras pueden ser remoldeadas o compactadas.

El permeámetro es un equipo de carga descendente, considerando que el funcionamiento del mismo se basa fundamentalmente en el desplazamiento vertical de la carga hidráulica que se aplica.



**Imagen 14.** Equipos de permeabilidad.



Fuente: Elaboración propia

El permeámetro deberá contar con:

Un disco poroso o una malla reforzada adecuada para el fondo, con una permeabilidad mayor que la de la muestra de suelo, pero con aberturas suficientemente pequeñas para impedir el movimiento de partículas

**Imagen 15.** Discos porosos



Fuente: Elaboración propia

Tomas de manómetros para medir la pérdida de carga,  $h$ , sobre una longitud,  $L$ , apoyada sobre una base firme de aluminio.

**Imagen 16.** Pedestal metálico.



Fuente: Elaboración propia

Piedra porosa en la cual se apoya un resorte adherido a la parte superior de la tapa del equipo, o cualquier otro dispositivo, para aplicar una ligera presión de resorte, de 22 a 44 N (5 a 10 lbf) de carga total, cuando la placa superior se halla colocada en su sitio. Esto mantendrá el peso unitario y el volumen del suelo sin cambio durante la saturación y durante el ensayo de permeabilidad.

**Imagen 17.** Tapa superior del equipo.



Fuente: Elaboración propia

Cámara acrílica, tiene la función de contener la muestra, al momento de saturar y realizar el ensayo de permeabilidad.

**Imagen 18.** Celda acrílica transparente



Fuente: Elaboración propia

Las características físicas del equipo son las siguientes:

Altura de molde = 20 cm.

Diámetro interno de molde = 7,62 cm – 3 pulg.

#### 3.4.1.4. Preparación de la muestra

Con el objetivo de obtener valores representativos y reales del coeficiente de permeabilidad, las muestras con las que se trabajaron fueron de tipo inalteradas.

El proceso de tallado se efectuó tomando siempre el sentido de la estratificación del suelo in situ, con la ayuda de una espátula, lijás, cuchillos se va tallando un bastón de 7,62 cm de diámetro y una altura de 13 cm aproximadamente, se envuelve este en papel flim plástico y papel de aluminio para conservar la humedad natural y posteriormente llevarlo al laboratorio.

**Imagen 19.** Muestra preparada para ser ensayada



Fuente: Elaboración propia.

#### **3.4.1.5. Procedimiento de laboratorio.**

El procedimiento en el laboratorio para el ensayo de permeabilidad por el método de carga variable, fue desarrollado en dos etapas, la primera viene dada por la saturación de la muestra, y la segunda por el desarrollo experimental del método (ensayo de carga variable).

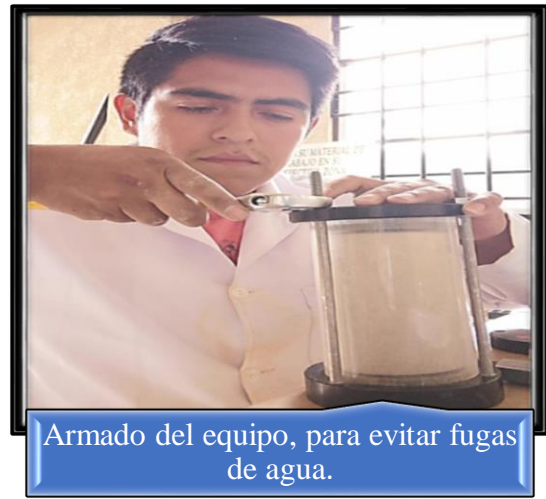
Primera etapa:

Una vez trasladadas las muestras al laboratorio de suelos de la Universidad Juan Misael Saracho, se procedió a retirar el papel aluminio y film plástico de cada una de las muestras, con el fin de realizar un registro detallado en cuanto a dimensiones y pesos.

Posteriormente se colocó la muestra dentro de la celda acrílica, con sus respectivas piedras porosas y papel filtro, ensamblamos el equipo con la ayuda de tres tuercas y un collarín que presiona la base y la celda acrílica, asegurándose de no tener presencia de fugas, inmediatamente se conecta la manguera y la válvula de entrada de agua para empezar la etapa de saturación, misma que duró 30 días aproximadamente.

Al principio de la saturación se observó a través de la celda acrílica transparente, cómo el agua tomaba posesión de los espacios vacíos de la muestra; en ese sentido se controló el nivel de agua que abastecía al embudo manteniendo el mismo a un nivel constante, así mismo después de la primera semana se purga el sistema abriendo y cerrando las válvulas de desaire con el propósito de eliminar todas las burbujas de aire atrapadas en el equipo.

**Imagen 20.** Muestra preparada para ser ensayada en el equipo



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un control periódico de dos semanas para poder verificar si el agua pasa hasta el extremo inferior de la masa de suelo, abriendo la válvula inferior del equipo; fue entonces que se observó, que la muestra al cabo de 4 semanas, mostraba una pequeña cantidad constante de agua que pasa la muestra considerando la misma saturada,

Se debe tomar en cuenta que el grado de saturación de un suelo influye de manera importante sobre su permeabilidad en general, cuanto mayor sea el grado de saturación, mayor será la permeabilidad. Esto puede explicarse debido a que en suelos no saturados se presenta el fenómeno de succión (absorción y capilaridad). De ahí la importancia de obtener grados de saturación elevados al momento de realizar cualquier prueba de permeabilidad.

Segunda etapa:

Después de la etapa de saturación se realizó el primer ensayo, para lo cual se purga el sistema, abriendo y cerrando la válvula anterior hasta garantizar que se eliminan todas las burbujas de aire en las mangueras y el equipo.

Se llenó la bureta (o tubería de entrada) hasta una altura conveniente para medir la cabeza hidráulica a través de la muestra y obtener  $h_1$ .

Seguidamente se inició el flujo de agua y se puso en marcha simultáneamente el cronómetro, dejando que el agua corra a través de la muestra hasta que la bureta (o tubería de entrada) se encuentre casi vacía, se registró el tiempo transcurrido, obteniendo la cabeza hidráulica  $h_2$ , así mismo se tomó la temperatura del ensayo.

**Imagen 21.** Muestra preparada para ser ensayada en laboratorio



Fuente: Elaboración propia.

Es recomendable volver a llenar la bureta (o tubería de entrada) de agua y repetir el ensayo cinco veces adicionales. Utilizar en lo posible los mismos valores para  $h_1$  y  $h_2$  y obtener los tiempos transcurridos correspondientes.

Para cada ensayo se calculó el coeficiente de permeabilidad “ $k$ ”, a la temperatura del ensayo.

Es importante uniformizar las condiciones del ensayo; para tal efecto se realizó la corrección por viscosidad del agua, que recomienda el manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, Bowles Joseph E, partiendo de la Tabla 6.

### 3.4.1.6. Cálculos para la determinación del coeficiente de permeabilidad "k"

El coeficiente de permeabilidad se determina a través de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{a * L}{A * t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Donde:

a= Área de la sección transversal de la bureta o tubería de entrada, cm<sup>2</sup>.

A= Área seccional de la muestra de suelo, en cm<sup>2</sup>.

h<sub>1</sub>= Cabeza hidráulica a través de la muestra al comienzo de experimento (t = 0)

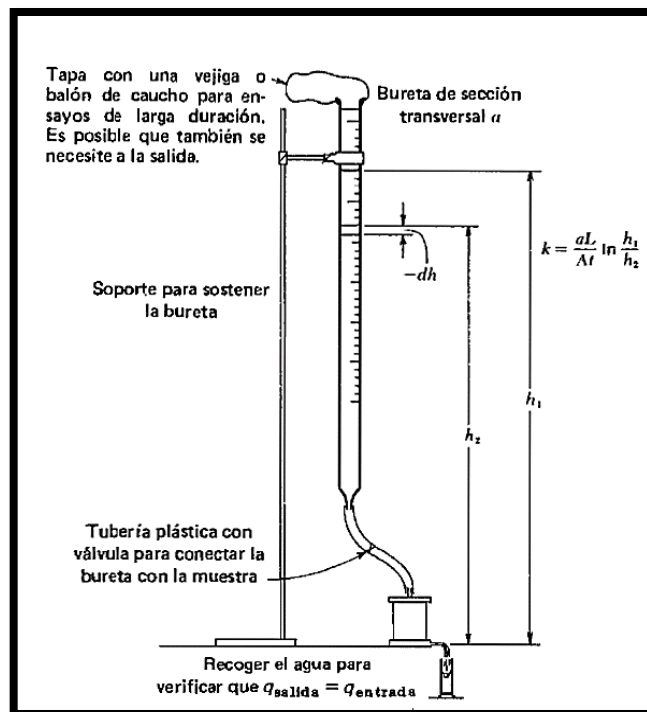
h<sub>2</sub>= Cabeza hidráulica a través de la muestra al final del ensayo (t = t ensayo)

L = Longitud de la muestra en cm

t = Tiempo transcurrido durante el experimento, en segundos

In= Logaritmo natural (en base 2,718)

**Imagen 22.** Detalles del montaje para el ensayo de cabeza variable



Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, Bowles Joseph E



El flujo de un fluido a través de un medio poroso, no solo está condicionado por las características del medio (porosidad, geometría de los granos, etc.), sino también por ciertas características que a continuación se describe:

Un factor influyente en la determinación del coeficiente de permeabilidad, es la temperatura del agua, ya que influye sobre la viscosidad dinámica. Es por esta razón que se debe medir y controlar a una temperatura estándar de 20 °C. Si no es posible controlarla con la siguiente ecuación se puede hacer una corrección:

$$k_{20} = k_e \frac{\eta_e}{\eta_{20}}$$

Donde:

$k_{20}$ = Coeficiente de permeabilidad a la temperatura de 20 °C.

$k_e$ = Coeficiente de permeabilidad a la temperatura de ensayo.

$\eta_{20}$ = Viscosidad cinemática del agua a la temperatura de 20 °C.

**Tabla 23.** Corrección por viscosidad

°C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	1,301	1,298	1,294	1,290	1,287	1,284	1,280	1,276	1,272	1,269
11	1,265	1,262	1,258	1,255	1,251	1,248	1,244	1,241	1,237	1,234
12	1,230	1,227	1,223	1,220	1,217	1,214	1,210	1,207	1,204	1,200
13	1,197	1,194	1,191	1,187	1,184	1,181	1,178	1,175	1,171	1,168
14	1,166	1,162	1,159	1,158	1,153	1,150	1,147	1,144	1,141	1,138
15	1,135	1,132	1,129	1,126	1,134	1,120	1,117	1,114	1,111	1,109
16	1,106	1,103	1,100	1,097	1,094	1,092	1,089	1,086	1,080	1,080
17	1,0774	1,0747	1,072	1,069	1,067	1,064	1,051	1,059	1,056	1,053
18	1,051	1,048	1,045	1,043	1,040	1,038	1,035	1,033	1,030	1,027
19	1,025	1,022	1,020	1,017	1,015	1,012	1,010	1,007	1,005	1,003
20	1,000	0,998	0,995	0,993	0,990	0,988	0,986	0,983	0,981	0,979
21	0,976	0,974	0,972	0,969	0,967	0,965	0,962	0,960	0,958	0,955
22	0,953	0,951	0,949	0,947	0,944	0,942	0,940	0,932	0,936	0,933
23	0,931	0,929	0,927	0,925	0,923	0,920	0,918	0,916	0,914	0,912
24	0,910	0,908	0,906	0,904	0,902	0,900	0,898	0,895	0,893	0,981
25	0,889	0,887	0,886	0,883	0,881	0,879	0,877	0,875	0,873	0,871
26	0,869	0,868	0,866	0,864	0,862	0,860	0,858	0,856	0,854	0,852
27	0,850	0,848	0,847	0,845	0,843	0,841	0,839	0,837	0,836	0,834
28	0,832	0,830	0,828	0,826	0,825	0,823	0,821	0,819	0,818	0,816
29	0,814	0,812	0,811	0,809	0,807	0,805	0,804	0,802	0,800	0,798
30	0,797	0,795	0,793	0,792	0,790	0,788	0,787	0,785	0,783	0,782
31	0,780	0,779	0,777	0,775	0,774	0,772	0,771	0,769	0,167	0,766
32	0,764	0,763	0,761	0,760	0,758	0,758	0,765	0,753	0,752	0,750
33	0,749	0,747	0,746	0,744	0,743	0,741	0,740	0,738	0,736	0,735
34	0,733	0,732	0,731	0,729	0,728	0,726	0,725	0,723	0,722	0,720
35	0,719	0,718	0,716	0,715	0,713	0,712	0,711	0,709	0,708	0,706

Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, Bowles Joseph E

**Tabla 24.** Resumen de los resultados de permeabilidad por el método de carga variable, permeámetro de carga descendente.

<b>Método carga variable</b>			
<b>Barrio.</b>	<b>Muestra</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Permeabilidad</b>
	<b>Nº</b>	<b>Nº</b>	<b>K20°C - "cm/seg"</b>
Los Chapacos	1-A	1	1,492E-07
	1-B	2	1,476E-07
	1-C	3	1,172E-07
	1-D	4	1,191E-07
	1-E	5	1,225E-07
Torrecillas	2-A	1	3,321E-06
	2-B	2	2,689E-06
	2-C	3	1,966E-06
	2-D	4	2,459E-06
	2-E	5	2,460E-06
El Constructor	3-A	1	1,273E-06
	3-B	2	1,245E-06
	3-C	3	1,390E-06
	3-D	4	1,273E-06
	3-E	5	1,572E-06
San Blas	4-A	1	1,823E-05
	4-B	2	1,667E-05
	4-C	3	1,627E-05
	4-D	4	2,226E-05
	4-E	5	2,181E-05
San Jorge II	5-A	1	6,578E-08
	5-B	2	6,538E-08
	5-C	3	5,818E-08
	5-D	4	6,377E-08
	5-E	5	7,046E-08

Fuente: Elaboración propia

### **3.4.2. Ensayo de consolidación unidimensional de los suelos**

Documento referencial ASTM D2435; AASHTO T216

#### **3.4.2.1. Introducción**

El proceso de consolidación, se brinda en los suelos finos, limos y arcillas; donde un suelo saturado ofrece una resistencia al incremento de carga extrema, considerando el reparto de cargas entre el agua y el suelo a través del tiempo.

Cuando a una muestra saturada se le aplica un incremento de carga, en primera instancia es el agua que resiste el incremento de carga, luego poco a poco el agua drenará en ambos sentidos y la carga se transfiere al suelo, que al finalizar el proceso será el responsable de soportar las cargas aplicadas.

En la consolidación se establecen las siguientes etapas:

- 1.-Consolidación inicial. - Reducción casi instantánea en el volumen de la masa de un suelo bajo una carga aplicada, que precede a la consolidación primaria, debido principalmente a la expulsión y compresión del aire contenido en los vacíos del suelo.
2. Consolidación primaria. - Reducción en el volumen de la masa de un suelo originada por la aplicación de una carga permanente y la expulsión del agua de los vacíos, acompañada por una transferencia de carga del agua a las partículas sólidas del suelo.
3. Consolidación secundaria. - Reducción en el volumen de la masa del suelo, causada por la aplicación de una carga permanente y el acomodo de la estructura interna de su masa, luego de que la mayor parte de la carga ha sido transferida a las partículas sólidas del suelo.

### 3.4.2.2. Objetivos

El presente método se refiere al procedimiento para determinar la tasa y la magnitud de la consolidación de muestras de suelos cuando se confinan lateralmente y se cargan y drenan axialmente

### 3.4.2.3. Equipo y material utilizado

Consolidómetro.- El aparato utilizado para realizar este ensayo se denomina edómetro o consolidómetro y aplica el principio introducido por Terzaghi de la compresión de una muestra, es un dispositivo que mantiene una muestra de suelo dentro de un anillo confinada lateralmente, el cual está apoyado sobre una base del equipo, con piedras porosas sobre cada cara de la muestra, proporcionar medios para sumergir la muestra en agua, aplicar la carga vertical, y medir el cambio de espesor de la misma.

**Imagen 23.** Equipo de consolidación del laboratorio de suelos de la Universidad Juan Misael Saracho



Fuente: Elaboración propia.

Deformímetro. - Instrumentos y herramienta para medir el cambio de espesor de la muestra con una precisión de 0,0025 mm. (0.0001").

**Imagen 24.** Dial o deformímetro



Fuente: Elaboración propia.

Equipo de carga. - El dispositivo de carga debe ser adecuado para aplicar cargas verticales a la muestra, como se muestra en la Figura 24. El dispositivo deberá ser capaz de mantener las cargas especificadas durante periodos prolongados con una precisión de ( $\pm$ ) 0.5 % de la carga aplicada.

**Imagen 25.** Equipo de carga



Fuente: Elaboración propia

La norma ASTM D2435 recomienda que las piedras porosas podrán ser de carburo de sílice, o de óxido de aluminio, o de un metal perforado que no sea atacado ni por el suelo, ni por la humedad del mismo.

Se utilizó un cronómetro para lecturar el deformímetro en los tiempos establecidos.

**Imagen 26.** Muestra preparada para ser ensayada



Fuente: Elaboración propia.

Balanza de sensibilidad de 0,01 gr, instrumento de laboratorio que mide el peso de las muestras de suelo, así mismo se utilizó un horno, que pueda mantener una temperatura uniforme de 110 °C, utilizado para secar las muestras una vez ensayada.

**Imagen 27.** Muestra seca después de ser ensayada



Fuente: Elaboración propia

#### **3.4.2.4. Preparación de la muestra**

Al momento de preparar las muestras para el ensayo de consolidación unidimensional, se tomó una fracción de arcilla inalterada, la cual fue trabajada de forma artesanal, tratando que la muestra encaje dentro de los muestreadores del equipo.

Para tal efecto se utilizó, sierras metálicas, reglas con borde cortante, lijas de diferentes medidas, perfilando la muestra siempre en sentido vertical, considerando la estratificación del terreno, así mismo se enrasó de la forma más precisa la parte superior e inferior de la muestra, para que así la fuerza actúe homogéneamente sobre todo el área de la muestra.



**Imagen 28.** Preparación de las muestras para el ensayo de edométrico



Fuente: Elaboración propia

#### **3.4.2.5. Procedimiento en laboratorio**

Una vez preparadas las muestras de suelo, éstas han sido trasladadas al laboratorio de suelos con la mayor precaución posible, evitando golpes o movimientos bruscos.

Se retiró el papel aluminio y film plástico de las muestras, y se tomó el registro del peso de la muestra y sus dimensiones.

Con mucho cuidado se procedió a colocar cuidadosamente el papel filtro y piedras porosas saturadas en las caras superior e inferior de la muestra de suelo; verificando que las piedras porosas no tengan contacto con el anillo.

Delicadamente, a fin de evitar movimientos del anillo y de las piedras porosas en la cazuela, se ubicó ésta sobre la plataforma del banco de consolidación, se centró cuidadosamente la piedra porosa superior bajo el marco de carga, se apoyó sobre ésta el deformímetro, y se ajustó el equipo.

Posteriormente se agregó agua dentro del envase mayor, dejando cubierta a la muestra que se encuentra encajada en el equipo, esto se hace con la finalidad de que la muestra absorba la humedad hasta alcanzar el grado de saturación constante.

Se dejó saturar la muestra en el equipo por 24 horas aproximadamente, con el propósito de contrarrestar el proceso de expansión, se cargó el equipo con pesos pequeños (1/2, a 1kilogramo), procurando mantener el deformímetro en cero durante el proceso de saturación.

Se aplicó el primer incremento de carga y simultáneamente se registró las lecturas de deformación de los tiempos de la Tabla 27.

**Tabla 25.** Tiempos registrados en el edómetro

<b>Tiempos (t).</b>														
Minutos	0,07	0,25	0,50	1,00	1,56	2,25	3,06	4,00	5,06	6,25	7,56	9,00	12,50	16,00
Raíz de (t)	0,26	0,50	0,71	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,54	4,00

Fuente: Elaboración propia

Considerando el método gráfico que plantea Taylor, el mismo solo considera la consolidación primaria a través de gráficas donde se determina los valores de  $D_o$  y  $D_{90}$ ; una vez calculado el  $D_{100}$  a través de la ecuación  $d_{100} = d_o + \frac{10}{9} * (d_{90} - d_o)$  se puede observar que la muestra ha llegado a lo que fue su consolidación primaria; de esta manera se va aumentando los pesos de forma secuencial y en el proceso verificando la consolidación primaria para cada peso.

Para culminar el ensayo, se retiró la muestra del equipo, y se la llevo a un horno con una temperatura de 110 °C, para su secado. Posteriormente se registró el peso de la muestra seca.

Después del ensayo, se desarma el equipo, la muestra se desecha y los accesorios (piedra, resorte, base y tapa) se lavan con mucho cuidado para garantizar que el equipo tenga un buen funcionamiento y perdure para el beneficio del laboratorio de suelos de la Universidad Juan Misael Saracho.

**Imagen 29.** Ensayo edométrico.



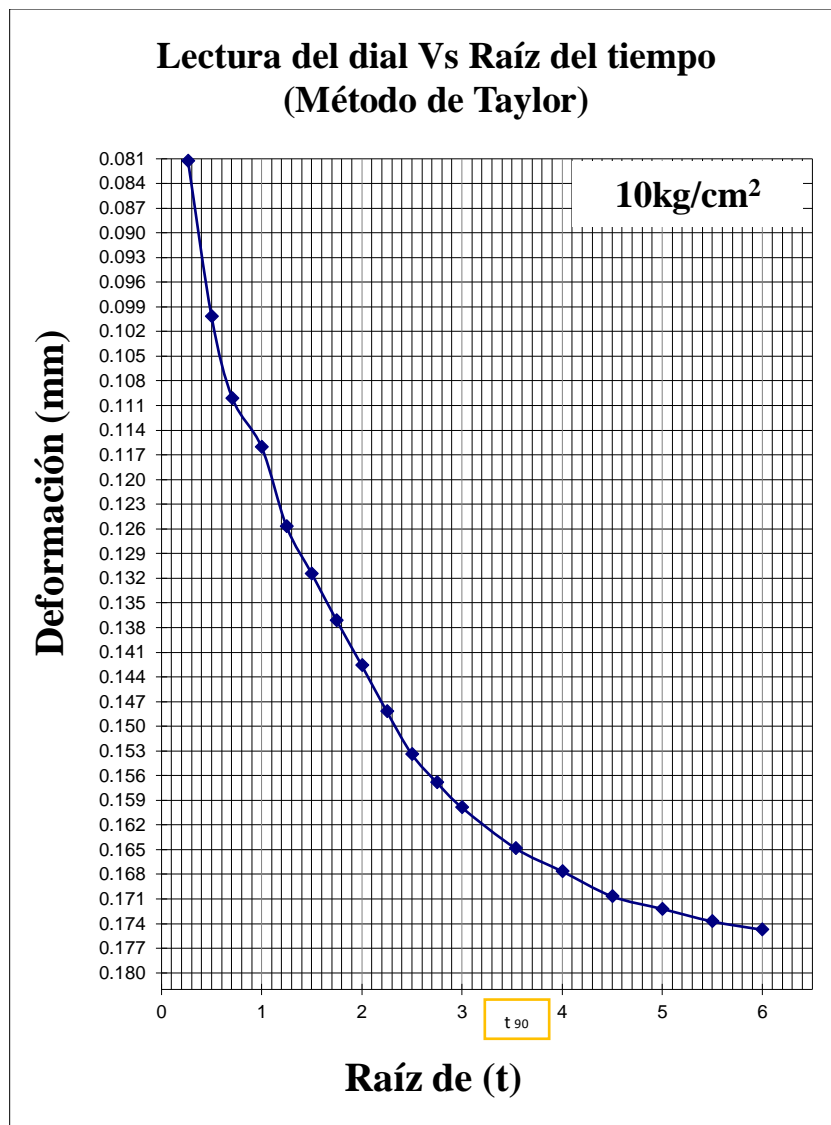
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2.6. Determinación indirecta del coeficiente de permeabilidad "k" a través del ensayo edométrico.

Cálculo del coeficiente de consolidación mediante el método de Taylor.

Taylor propuso un método gráfico para obtener el tiempo de consolidación primaria, partiendo del ensayo edométrico, el cual consiste en determinar la consolidación primaria para un porcentaje de consolidación del 90 %, a partir de la curva deformación Vs  $\sqrt{t_{min}}$ ,

**Figura 27.** Curva teórica de consolidación

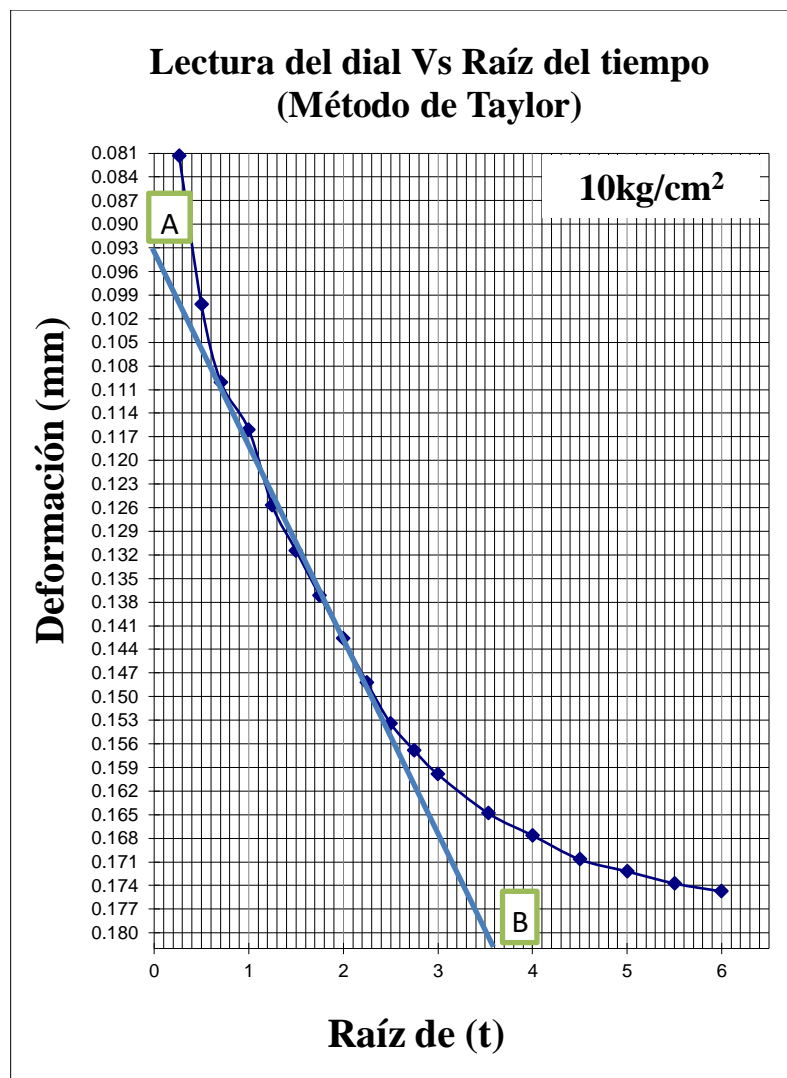


Fuente: Elaboración propia

Para obtener la deformación y el tiempo correspondiente al 90 % de la consolidación primaria, a partir de la gráfica de Deformación Vs  $\sqrt{t_{min}}$  se procedió de la siguiente manera:

1.- Dibujar la línea recta que mejor se ajuste a la recta extendiéndose hasta insertar ambos ejes, despreciando los primeros puntos que corresponden al acomodamiento de la probeta y del sistema de aplicación de carga. Llamamos A, al punto de intersección con el eje de las deformaciones, es decir representa el 0 % de la consolidación, y B, al punto de intersección con el eje  $\sqrt{t_{min}}$ , como se observa en la Figura 28.

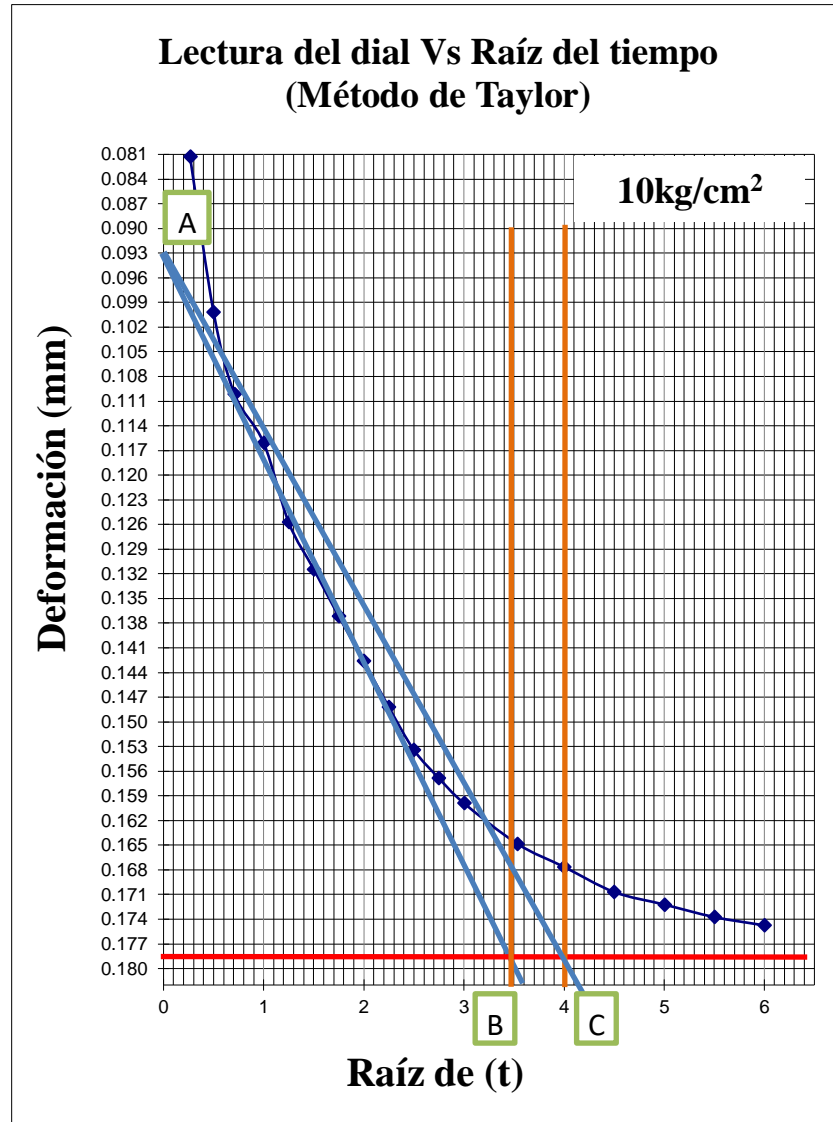
**Figura 28.** Primer orden, consolidación por el método de Taylor



Fuente: Elaboración propia

2.- Denominando X, a la distancia sobre el eje de la raíz cuadrada del tiempo, entre el origen y el punto B, buscamos el punto C, de abscisa igual a 1.15 veces de X, (Figura 29).

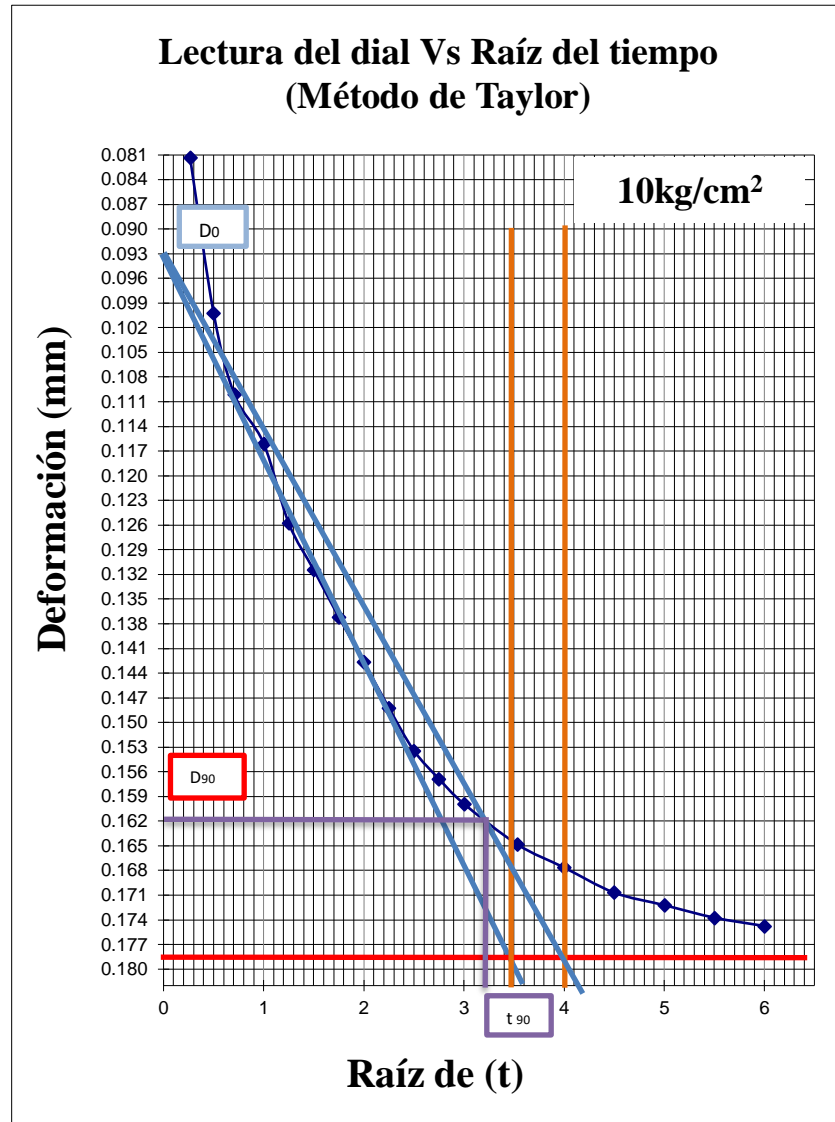
**Figura 29.** Segundo orden, consolidación por el método de Taylor



Fuente: Elaboración propia

3.- Trazar la recta AC. El punto donde AC interceptan a la curva de consolidación, tiene como abscisa la raíz de tiempo al cual ocurre el 90 % de la consolidación ( $t_{90}$ ).

**Figura 30.** Tercer orden, consolidación por el método de Taylor



Fuente: Elaboración propia

4.- Con  $t_{90}$  calculado y el factor tiempo  $T_{90}$  obtenidos de las curvas teóricas, según el drenaje de la muestra en laboratorio para un grado de consolidación de 90 %, se obtiene el coeficiente de consolidación  $C_v$  como:

$$C_v = \frac{T_v * H_{dr}^2}{t_{90}}$$

La altura  $H_{dr}^2$ , es la máxima distancia que recorre el agua en el ensayo. En general, el ensayo se realiza permitiendo el drenaje por ambas caras de la muestra de manera de acelerar los tiempos de consolidación, por lo que  $H_{dr}^2$ , es la mitad de la altura de la muestra en ese escalón de carga.

#### Curva de comprensibilidad

Para cada incremento de carga aplicada se tiene finalmente un valor de relación de vacíos y otro de presión correspondiente, actuante sobre el espécimen. Al finalizar el ensayo de consolidación (una vez aplicadas todas las cargas), se tienen valores que permiten construir una curva de comprensibilidad, la cual tiene como abscisas el valor de las presiones, en escala natural o logarítmica y como ordenadas los correspondientes valores de la relación de vacíos, en escala aritmética (Das, 2013).

Procedimiento para trazar la curva de comprensibilidad:

1.- Calcular la altura de sólidos  $H_s$  en el espécimen de suelo

$$2H_o = \frac{m_d}{G_s * A * \rho_w} \text{ (mm).}$$

Donde:

$2H_o$  = Altura de sólidos, en cm.

$m_d$  = Masa de los sólidos, en gr.

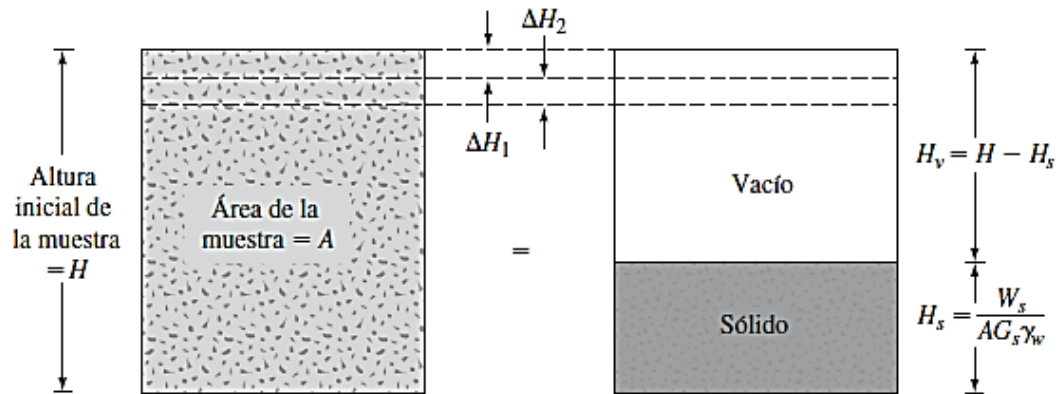
$\rho_w$  = Densidad del agua, en gr/cm<sup>3</sup>.

$G_s$  = Densidad específica del suelo, en gr/cm<sup>3</sup>.

$A$  = Área de la muestra, en cm<sup>2</sup>.



**Figura 31.** Cambio en la altura de la muestra en una prueba de consolidación en una dimensión



Fuente: Mecánica de Suelos Aplicada, Medrano Castillo Rodolfo Crescenciano

2.- Cálculo de la altura de vacíos  $H_v$ :

$$H_v = H - H_s$$

Donde:

$2H$  = Altura final de la muestra, en cm.

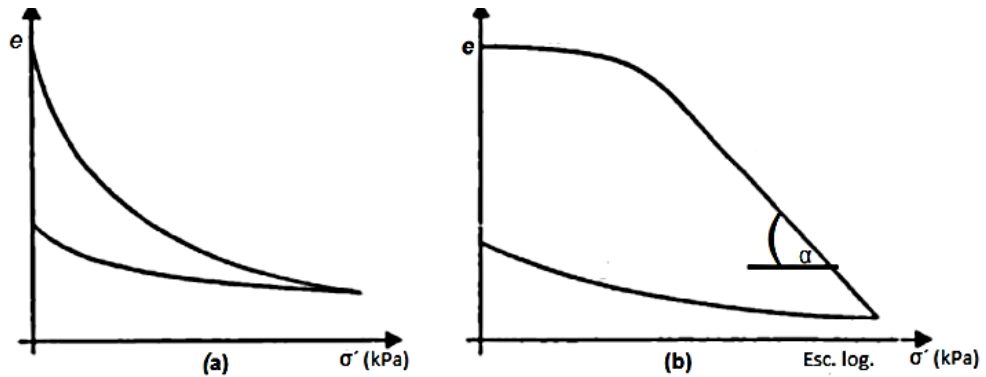
La altura final de la muestra en cada escalón de carga será.  $2H_0$  menos la deformación acumulada del espécimen, hasta el escalón en estudio.

3.- Cálculo de la relación de vacíos:

$$e = \frac{H_v}{H_s}$$

En las siguientes figuras podemos apreciar la forma típica de la curva de compresibilidad, en escala semilogarítmica, y en escala aritmética, en ella se define el índice de compresión y el coeficiente de compresibilidad

**Figura 32.** Curva típica de compresibilidad.



a) Representación aritmética b) Representación semilogarítmica

Fuente: Mecánica de Suelos, Juárez & Rico

Índice de compresión “ $C_c$ ”: la misma se define como la pendiente de la curva de compresibilidad, en escala logarítmica.

$$C_c = \tan \alpha$$

Coefficiente de compresibilidad “ $a_v$ ” La cual se define como la pendiente de la curva de compresibilidad, en escala aritmética.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$$

Una vez obtenidos los valores del coeficiente de consolidación  $C_v$  y los diferentes coeficientes, se procedió a calcular el coeficiente de permeabilidad con la ayuda de la siguiente expresión:

Para cada escalón de carga se obtiene una curva de consolidación en la cual podemos determinar, como ya se explicó, el tiempo para el cual se obtiene el 90 % de la consolidación primaria  $t_{90}$ , según el método de Taylor (Norma ASTM D2435). El factor tiempo para el 90 % de consolidación viene dado por la siguiente expresión:

$$T_v = \frac{k(1 + e) * t_{90}}{a_v * \gamma_w * H_{dr}^2}$$

Correlacionando expresiones, se tiene:

$$\frac{C_v * t_{90}}{H_{dr}^2} = \frac{k(1 + e) * t_{90}}{a_v * \gamma_w * H_{dr}^2}$$

Trabajando esta expresión y despejando k obtenemos:

$$k = \frac{C_v * a_v * \gamma_w}{(1 + e)}$$

Anteriormente se definió que el índice de compresibilidad del volumen como:

$$m_v = \frac{a_v}{(1 + e_{prom})}$$

Por lo cual el valor de la permeabilidad viene dado por la siguiente expresión:

$$k = C_v * m_v * \gamma_w$$

Donde:

$C_v$  = Coeficiente de consolidación, en  $\text{cm}^2/\text{min}$ .

$m_v$  = Coeficiente de compresibilidad del volumen.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua,  $9.81 \text{ KN/m}^3$ .

**Tabla 26.** Resumen de los resultados de permeabilidad por el método edométrico

<b>Método edométrico</b>			
<b>Barrio.</b>	<b>Muestra</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Permeabilidad a 20°c</b>
	<b>N.º</b>	<b>N.º</b>	<b>K20°C - "cm/seg"</b>
Los Chapacos	1-A	1	8,15E-08
	1-B	2	7,74E-08
	1-C	3	8,29E-08
	1-D	4	8,42E-08
	1-E	5	8,06E-08
Torrecillas	2-A	1	1,93E-07
	2-B	2	1,65E-07
	2-C	3	2,52E-07
	2-D	4	6,44E-01
	2-E	5	6,41E-01
El Constructor	3-A	1	7,87E-08
	3-B	2	8,27E-08
	3-C	3	7,94E-08
	3-D	4	8,05E-08
	3-E	5	8,46E-08
San Blas	4-A	1	1,37E-07
	4-B	2	1,76E-07
	4-C	3	1,93E-07
	4-D	4	2,06E-07
	4-E	5	1,70E-07
San Jorge II	5-A	1	8,34E-08
	5-B	2	8,30E-08
	5-C	3	8,93E-08
	5-D	4	7,06E-08
	5-E	5	8,37E-08

Fuente: Elaboración propia

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE**  
**RESULTADOS**

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN.**

En el presente capítulo, se efectúa la presentación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorio. En un primer plano se presenta un resumen de los valores en forma ponderada de las propiedades índice, de estado y comportamiento que presentaron las 5 muestras de suelo en estudio; posteriormente se efectuó un análisis estadístico a las variables dependientes analizadas, con el propósito de identificar medidas de tendencia central medidas de forma y variabilidad entre de las variables.

Haciendo uso de las teorías estadísticas se realiza la comparación del coeficiente de permeabilidad obtenido por el método de carga variable y el ensayo edométrico, con el fin de identificar características similares entre variables y obtener un grado de semejanza entre los resultados.

## 4.2. RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

**Tabla 27.** Parámetros de granulometría, plasticidad, peso específico y permeabilidades promedio de las muestras estudiadas.

Resumen de los ensayos de laboratorio															
BARRIO.	Contenido de humedad w (%)	Granulometría		Hidrómetro		Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	Límites de consistencia			Clasificación SUCS		Muestra	Ensayo	Ensayo de consolidación	Ensayo de carga variable
		% que pasa N°40	% que pasa N°200	% de limo	% de arcilla		LL (%)	LP (%)	IP (%)	Simbología	Descripción				
														N°	N°
Los Chapacos	5,76	99,96	99,85	68,45	31,40	2,73	51	27	25	CH	Arcilla de alta plasticidad	1-A	1	8,155E-08	1,492E-07
												1-B	2	7,735E-08	1,476E-07
												1-C	3	8,287E-08	1,172E-07
												1-D	4	8,424E-08	1,191E-07
												1-E	5	8,056E-08	1,225E-07
Torrecillas	1,43	99,77	80,39	63,18	17,21	2,70	27	22	5	ML-CL	Arcilla y limo de baja plasticidad	2-A	1	1,934E-07	3,321E-06
												2-B	2	1,645E-07	2,689E-06
												2-C	3	2,520E-07	1,966E-06
												2-D	4	6,441E-01	2,459E-06
												2-E	5	6,414E-01	2,460E-06
Constructor.	1,98	99,96	99,01	79,30	19,71	2,69	34	21	12	CL	Arcilla de baja plasticidad	3-A	1	7,874E-08	1,273E-06
												3-B	2	8,273E-08	1,245E-06
												3-C	3	7,942E-08	1,390E-06
												3-D	4	8,047E-08	1,273E-06
												3-E	5	8,460E-08	1,572E-06
San Blas.	4,34	99,85	97,10	83,56	13,54	2,67	29	26	3	ML	Limo de baja plasticidad	4-A	1	1,370E-07	1,823E-05
												4-B	2	1,764E-07	1,667E-05
												4-C	3	1,927E-07	1,627E-05
												4-D	4	2,062E-07	2,226E-05
												4-E	5	1,699E-07	2,181E-05
San Jorge II.	7,25	99,98	99,21	68,95	30,26	2,69	54	32	22	MH	Limo de alta plasticidad.	5-A	1	8,338E-08	6,578E-08
												5-B	2	8,300E-08	6,538E-08
												5-C	3	8,930E-08	5,818E-08
												5-D	4	7,062E-08	6,377E-08
												5-E	5	8,369E-08	7,046E-08

Fuente: Elaboración propia

### **4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Tomando en cuenta que la estadística es una herramienta que no puede faltar en el análisis de datos provenientes de una investigación, porque desde la concepción de la idea de lo que se va a investigar, pasando por la definición de objetivos, hipótesis, variables, recolección de los datos, organización, revisión, clasificación, tabulación y producción de los resultados para su análisis y posibles propuestas o soluciones a lo planteado, resulta importante saber dar un uso apropiado a las diferentes medidas y modelos estadísticos para el mencionado análisis a fin de que los resultados obtenidos representen un verdadero aporte a la solución de los problemas inherentes al campo en donde se desarrollan las actividades propias a las diferentes investigaciones (Bauce, 2000).

En ese sentido podemos decir que el análisis de datos estadísticos es el proceso que nos permite interpretar los datos numéricos que disponemos de una mejor manera; para tal efecto en el presente trabajo de investigación se llevó el análisis descriptivo de los datos, para poder obtener una visualización resumida en los datos en análisis, tomando como referencia las medias de posición, dispersión y de forma, que nos recomienda el doctor Ronald E. Walpole, a través de sus textos probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia.

Con el propósito de identificar la distribución de probabilidad a la cual se ajusta de mejor manera nuestra serie de datos, se realizó la prueba de bondad de ajuste propuesta por Anderson-Darling, la cual determina qué también siguen el conjunto de datos a una distribución específica.

Es importante mencionar que, para el presente trabajo, el aporte más notable de la estadística es que la misma brinde una confiabilidad a los resultados del edómetro a través de una comparación de valores de la permeabilidad, obtenida por el método de carga variable y el ensayo de consolidación unidimensional.

A continuación, se presenta un resumen del análisis estadístico de las variables aleatorias continuas de permeabilidad, misma que procede de cinco lugares diferentes, y está dividida a su vez en los dos métodos experimentales: Método de carga variable y el ensayo edométrico.



**4.3.1. Análisis estadísticos de la variable continua permeabilidad, método de carga variable.**

En este apartado se efectuará el análisis estadístico de las variables continuas permeabilidad de los cinco tipos de suelos finos en estudio, mismos que han sido obtenidos mediante el ensayo de permeabilidad por el método de carga variable.

**4.3.1.1. Los Chapacos**

**Tabla 28.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el método de carga variable procedente del barrio Los Chapacos

<b>Método carga variable</b>			
<b>Barrio</b>	<b>Muestra</b>	<b>Permeabilidad "20°C"</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>
	<b>Nº</b>	<b>"cm/seg"</b>	<b>"cm/seg"</b>
Los Chapacos	1-A	1,550E-07	1,492E-07
		1,870E-07	
		1,567E-07	
		1,229E-07	
		1,244E-07	
	1-B	1,780E-07	1,476E-07
		1,457E-07	
		1,177E-07	
		1,478E-07	
		1,486E-07	
	1-C	1,126E-07	1,172E-07
		1,130E-07	
		1,380E-07	
		1,109E-07	
		1,114E-07	
	1-D	1,118E-07	1,191E-07
		1,181E-07	
		1,214E-07	
		1,219E-07	
		1,224E-07	
1-E	1,229E-07	1,225E-07	
	1,234E-07		
	1,383E-07		
	1,137E-07		
	1,142E-07		

Fuente: Elaboración propia

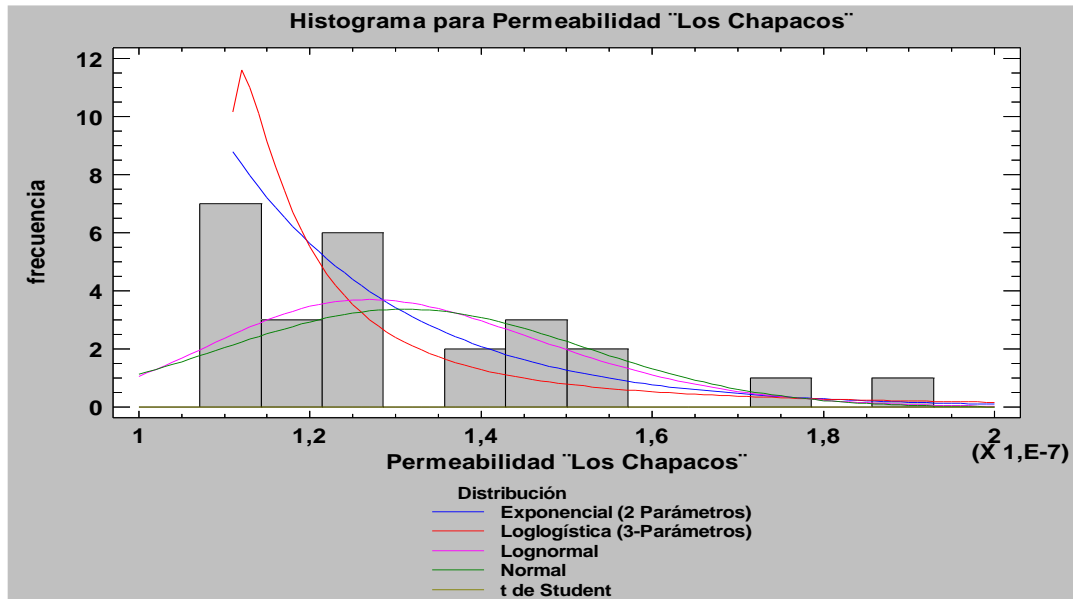
En la Tabla 29 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 25 valores, con un mínimo de  $1,109E-7$  y un máximo de  $1,87E-7$ . Así mismo se incluyen medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 29.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio Los Chapacos

Recuento	25
Promedio	$1,311E-7$
Mediana	$1,229E-7$
Desviación estándar	$2,114E-8$
Coefficiente de variación	16 %
Mínimo	$1,109E-7$
Máximo	$1,870E-7$
Rango	$7,610E-8$
Sesgo estandarizado	2,620
Curtosis estandarizada	1,040

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics.

**Figura 33.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del método de carga variable, Los Chapacos



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

En esta sección se va a determinar qué distribución es la que mejor se ajusta a la serie de datos de la variable permeabilidad obtenida por el método de carga variable, según el test de bondad de ajuste propuesto por Anderson-Darling (AD).

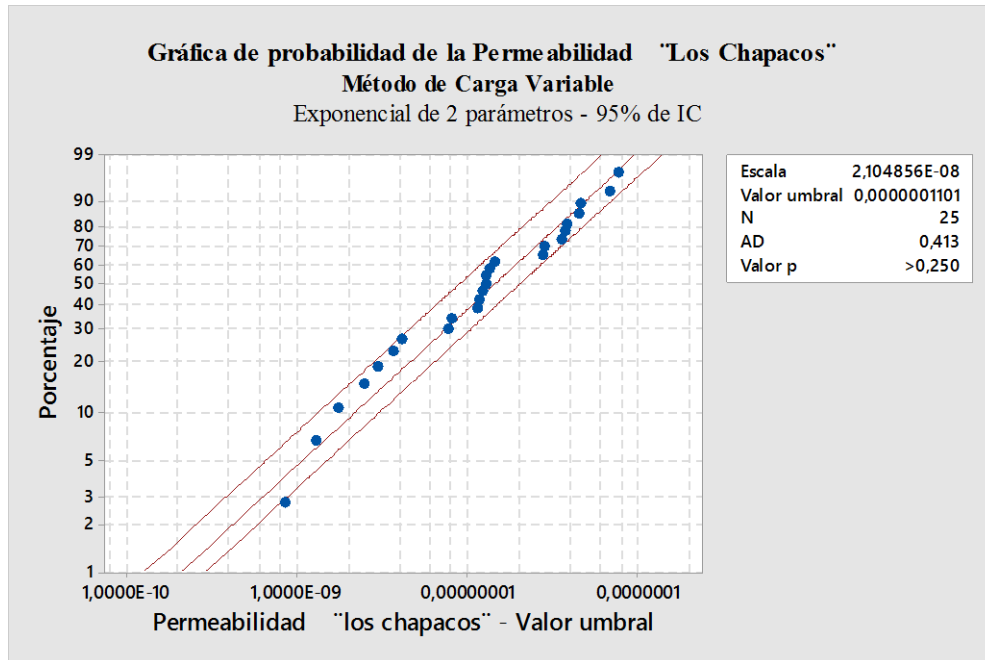
**Tabla 30.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling, para la variable permeabilidad proveniente del barrio Los Chapacos.

Distribución	AD	P
Normal	1,467	<0,005
Lognormal	1,217	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	0,413	>0,250
Weibull de 3 parámetros	2,049	<0,005
Valor extremo por máximos	1,061	<0,010
Loglogística	1,123	<0,005
Lognormal de 3 parámetros	1,497	<0,005

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la exponencial de 2 parámetros con un coeficiente AD de 0,413, y un test de ajuste  $P > 0,250$ .

**Figura 34.** Distribución estadística Exponencial de 2 parámetros para la variable permeabilidad obtenida por el método de carga variable, Los Chapacos



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

La confiabilidad de los resultados en laboratorio, es sin duda la parte más importante de una investigación, surge de la necesidad de estimar cuan confiables son los resultados que se obtuvieron en los ensayos en análisis; en ese sentido se realizó un análisis comparativo entre el coeficiente de variación que tomaron los parámetros de permeabilidad obtenidos por el método de carga variable y el ensayo edométrico, tomando como referencia comparativa los intervalos más frecuentes del coeficiente de variación que puede tener el parámetro permeabilidad, propuesto por el cuerpo de ingenieros del ejército de EEUU 1999, para el análisis de riesgo en ingeniería geotécnica, en apoyo a estudios de planificación de proyectos.

**Tabla 31.** Coeficiente de variación para el análisis de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio Los Chapacos.

<b>Método carga variable</b>		
<b>Barrio</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>	<b>Coeficiente de variación</b>
	<b>“cm/seg”</b>	<b>“%”</b>
Los Chapacos	1,492E-07	16
	1,476E-07	
	1,172E-07	
	1,191E-07	
	1,225E-07	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32.** Valores típicos de coeficiente de variación

<b>Parámetro</b>	<b>Coeficiente de variación (%)</b>
Cohesión	40 (20 a 80)
Ángulo de fricción efectivo	3,7-9,3 arenas y 7,5-10,1 arcillas
Resistencia no drenada de arcillas	13-40
Coeficiente de permeabilidad (k)	20-90
Coeficiente de consolidación (Cv)	33-68
Presión de preconsolidación (Pp)	10-35
Índice de compresión (Cc)	10-37

Fuente: Análisis de riesgo en ingeniería geotécnica, para apoyo de estudios de planificación, 1999.

Considerando los valores típicos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad “k”, oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido, podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del método de carga variable para el barrio Los Chapacos, son confiables con un coeficiente de variación del 16 %, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible.

#### 4.3.1.2. Torrecillas.

**Tabla 33.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el método de carga variable procedente del barrio Torrecillas

<b>Método carga variable</b>			
<b>Barrio</b>	<b>Muestra</b>	<b>Permeabilidad "20°c"</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>
	<b>N°</b>	<b>"cm/seg"</b>	<b>"cm/seg"</b>
Torrecillas	2-A	2,435E-06	3,321E-06
		2,416E-06	
		2,938E-06	
		3,647E-06	
		5,170E-06	
	2-B	2,768E-06	2,689E-06
		2,603E-06	
		2,310E-06	
		2,728E-06	
		3,037E-06	
	2-C	2,163E-06	1,966E-06
		2,262E-06	
		2,206E-06	
		2,160E-06	
		1,038E-06	
	2-D	2,220E-06	2,459E-06
		2,000E-06	
		2,244E-06	
		2,649E-06	
		3,183E-06	
	2-E	2,281E-06	2,460E-06
		2,057E-06	
		2,504E-06	
		2,700E-06	
		2,760E-06	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 34 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 25 valores, con un mínimo de 1.038E-6 y un máximo de 5.17E-6. Así mismo incluye medidas de tendencia central,

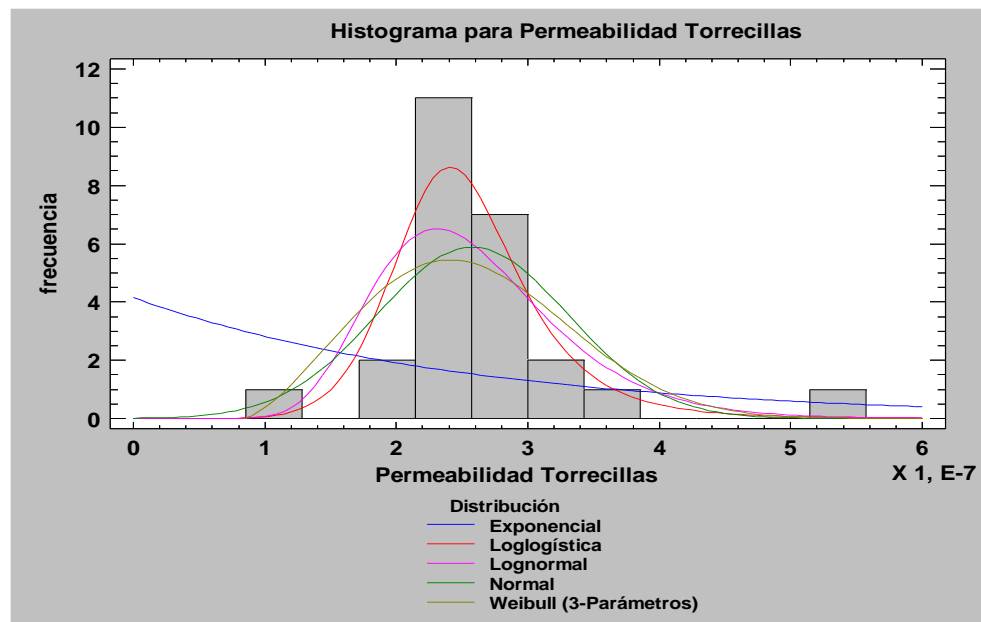
medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 34.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio Torrecillas.

Recuento	25
Promedio	2,579E-6
Mediana	2,435E-6
Desviación estándar	7,273E-7
Coficiente de variación	28 %
Mínimo	1,038E-6
Máximo	5,17E-6
Rango	4,132E-6
Sesgo estandarizado	3,515
Curtosis estandarizada	6,769

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 35.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del método de carga variable, Torrecillas



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

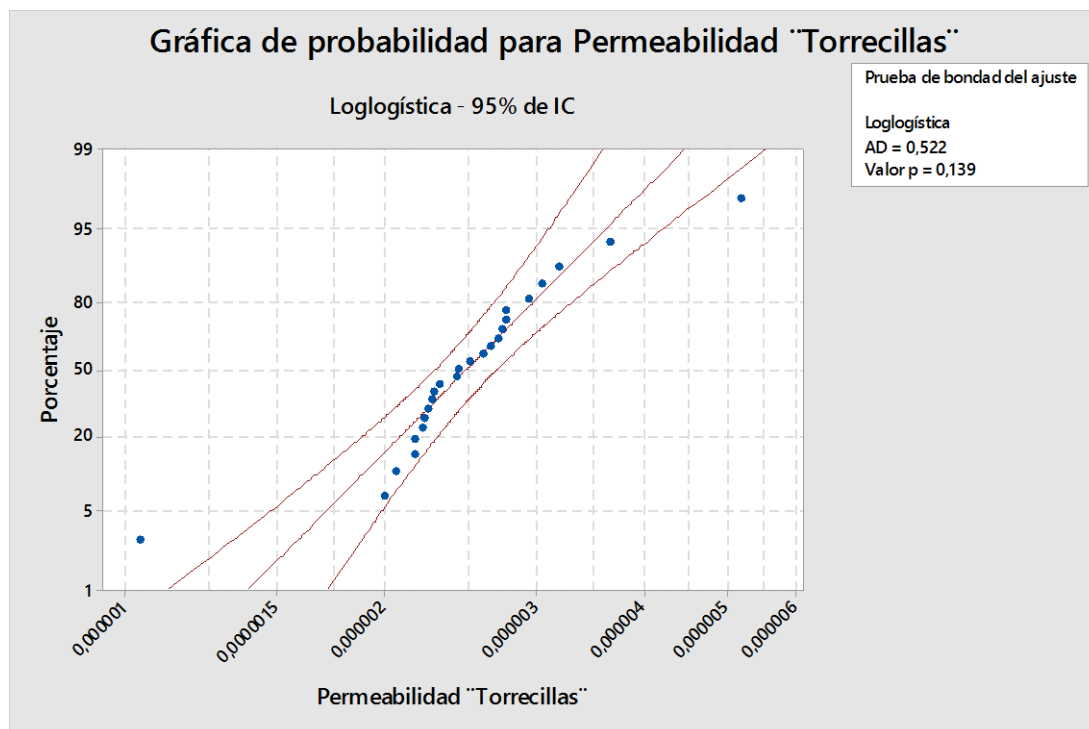
**Tabla 35.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio Torrecillas

Distribución	AD	P
Normal	1,432	<0,005
Lognormal	1,137	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	4,881	<0,010
Weibull de 3 parámetros	3,013	<0,005
Valor extremo por máximos	1,224	<0,010
Loglogística	0,522	>0,138
Lognormal de 3 parámetros	1,497	<0,005

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución loglogística con un coeficiente AD de 0,522, y un test de ajuste  $P > 0,138$

**Figura 36.** Distribución estadística Loglogística para la variable permeabilidad obtenida por el método de carga variable, Torrecillas



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.



De similar manera la confiabilidad de los datos de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio Torrecillas se la determinó a través de la comparación del coeficiente de variación tal como se muestra a continuación.

**Tabla 36.** Coeficiente de variación para el análisis de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio Torrecillas

<b>Método carga variable</b>		
<b>Barrio</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>	<b>Coeficiente de variación</b>
	<b>“cm/seg”</b>	<b>“%”</b>
Torrecillas	3,321E-06	28
	2,689E-06	
	1,966E-06	
	2,459E-06	
	2,460E-06	

Fuente: Elaboración propia

Considerando los valores tipos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad “k”, oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del método de carga variable para el barrio Torrecillas, son confiables con un coeficiente de variación del 28 %, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible.

#### 4.3.1.3. El Constructor

**Tabla 37.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el método de carga variable procedente del barrio El Constructor

<b>Método carga variable</b>			
<b>Barrio</b>	<b>Muestra</b>	<b>Permeabilidad "20°C"</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>
	<b>Nº</b>	<b>"cm/seg"</b>	<b>"cm/seg"</b>
El Constructor	3-A	1,246E-06	1,273E-06
		1,309E-06	
		1,139E-06	
		1,285E-06	
		1,388E-06	
	3-B	1,365E-06	1,245E-06
		1,171E-06	
		1,154E-06	
		1,256E-06	
		1,280E-06	
	3-C	1,411E-06	1,390E-06
		1,384E-06	
		1,355E-06	
		1,435E-06	
		1,368E-06	
	3-D	1,246E-06	1,273E-06
		1,309E-06	
		1,154E-06	
		1,270E-06	
		1,388E-06	
3-E	1,991E-06	1,572E-06	
	1,826E-06		
	1,324E-06		
	1,183E-06		
	1,687E-06		
	1,418E-06		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 38 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 26 valores, con un mínimo de 1,139E-6 y un máximo de 1,991E-6. Así mismo incluye medidas de tendencia central,

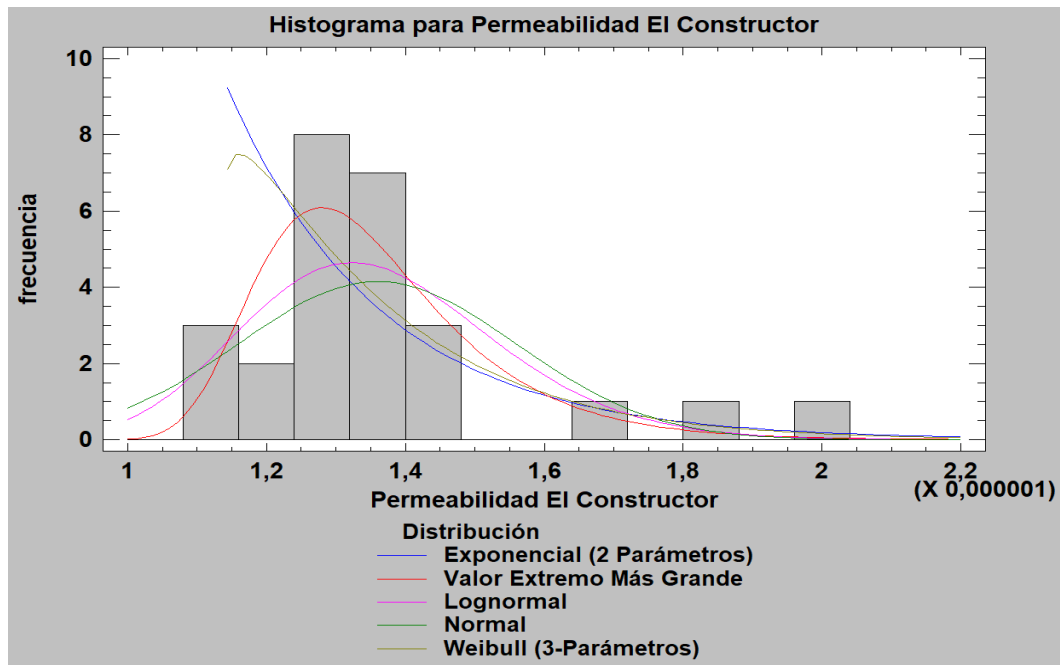
medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 38.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio El Constructor

Recuento	26
Promedio	1,359E-6
Mediana	1,317E-6
Desviación estándar	2,000E-7
Coefficiente de variación	15 %
Mínimo	1,139E-6
Máximo	1,991E-6
Rango	8,520E-7
Sesgo estandarizado	3,873
Curtosis estandarizada	3,971

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics.

**Figura 37.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del método de carga variable, El Constructor



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

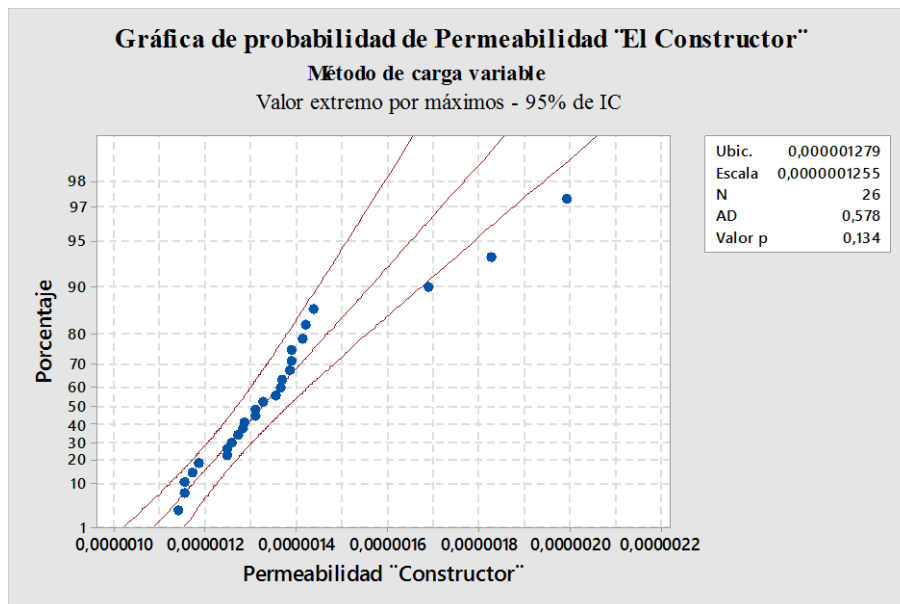
**Tabla 39.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio El Constructor.

Distribución	AD	P
Normal	1,718	<0,005
Lognormal	1,193	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	0,888	<0,101
Weibull de 3 parámetros	3,027	<0,005
Valor extremo por máximos	0,578	>0,134
Loglogística	0,685	<0,043
Lognormal de 3 parámetros	0,953	<0,005

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución valor extremo por máximos con un coeficiente AD de 0,578, y un test de ajuste  $P > 0,134$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 38.** Distribución estadística, Valor extremo por máximos para la variable permeabilidad obtenida por el método de carga variable, El Constructor



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

De similar manera la confiabilidad de los datos de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio El Constructor, se la determinó a través de la comparación del coeficiente de variación tal como se muestra a continuación.

**Tabla 40.** Coeficiente de variación para el análisis de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio El Constructor.

<b>Método carga variable</b>		
<b>Barrio</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>	<b>Coeficiente de variación</b>
	<b>“cm/seg”.</b>	<b>“%”.</b>
El Constructor	1,273E-06	15
	1,245E-06	
	1,390E-06	
	1,273E-06	
	1,572E-06	

Fuente: Elaboración propia

Considerando los valores típicos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad “k”, oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del método de carga variable para el barrio El Constructor, son confiables con un coeficiente de variación del 15 %, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible recomendado.

#### 4.3.1.4. San Blas.

**Tabla 41.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el método de carga variable procedente del barrio San Blas

<b>Método carga variable</b>			
<b>Barrio</b>	<b>Muestra</b>	<b>Permeabilidad "20°c"</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>
	<b>Nº</b>	<b>"cm/seg"</b>	<b>"cm/seg"</b>
San Blas	4-A	1,991E-05	1,823E-05
		1,774E-05	
		1,727E-05	
		1,826E-05	
		1,794E-05	
	4-B	1,744E-05	1,667E-05
		1,689E-05	
		1,645E-05	
		1,624E-05	
		1,630E-05	
	4-C	1,711E-05	1,627E-05
		1,589E-05	
		1,633E-05	
		1,620E-05	
		1,581E-05	
	4-D	2,211E-05	2,226E-05
		2,222E-05	
		2,255E-05	
		2,238E-05	
		2,202E-05	
	4-E	2,226E-05	2,181E-05
		2,200E-05	
		2,169E-05	
		2,151E-05	
		2,161E-05	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 42 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 25 valores, con un mínimo de 1,581E-5 y un máximo de 2,255E-5. Así mismo incluye medidas de tendencia central,

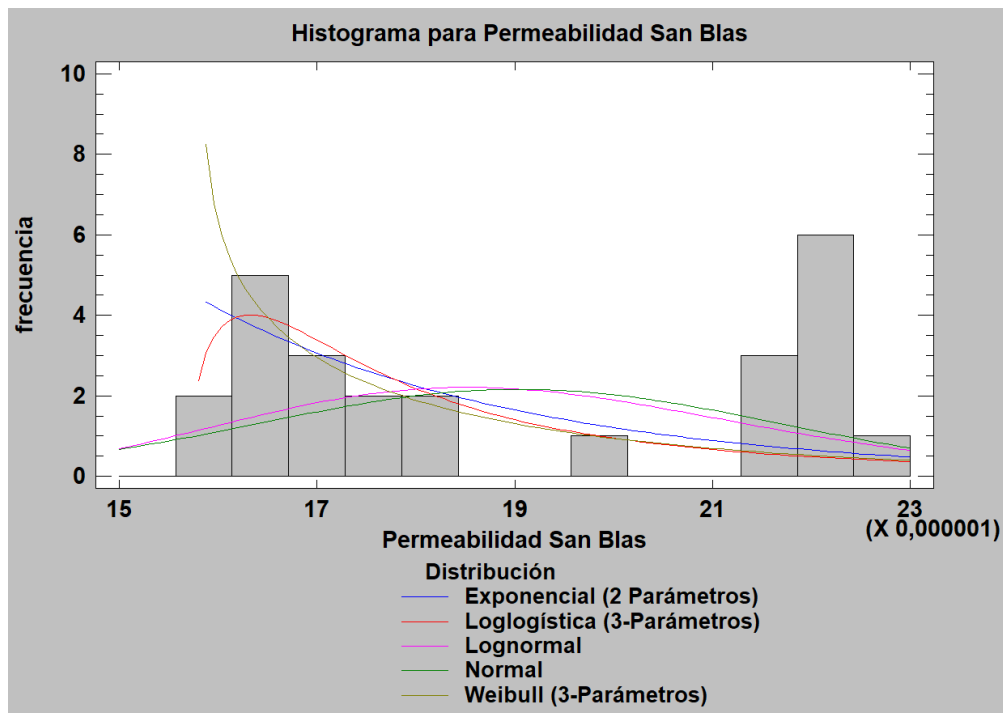
medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 42.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio San Blas

Recuento	25
Promedio	1,837E-5
Mediana	1,784E-5
Coefficiente de variación	23 %
Desviación estándar	2,316E-6
Mínimo	1,148E-6
Máximo	2,255E-5
Rango	2,113E-5
Sesgo estandarizado	-4,987
Curtosis estandarizada	9,377

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 39.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del método de carga variable, San Blas



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

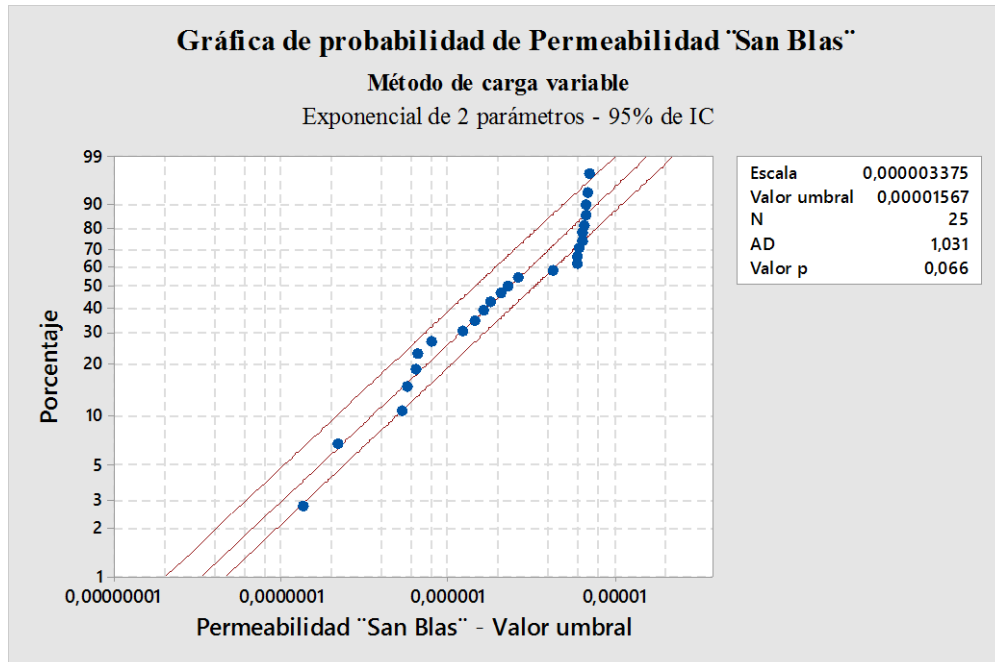
**Tabla 43.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio San Blas

Distribución	AD	P
Normal	1,787	<0,005
Lognormal	1,686	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	1,031	>0,066
Weibull de 3 parámetros	2,004	<0,005
Valor extremo por máximos	1,652	<0,010
Loglogística	1.628	<0,005
Lognormal de 3 parámetros	1,878	<0,007

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución exponencial de 2 parámetros con un coeficiente AD de 1,031, y un test de ajuste  $P > 0,066$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 40.** Distribución estadística, Exponencial de 2 parámetros para la variable permeabilidad obtenida por el método de carga variable, San Blas



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.



De similar manera la confiabilidad de los datos de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio San Blas se la determinó a través de la comparación del coeficiente de variación tal como se muestra a continuación.

**Tabla 44.** Coeficiente de variación para el análisis de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio San Blas

<b>Método carga variable</b>		
<b>Barrio</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
	<b>“cm/seg”</b>	<b>“%”</b>
San Blas	1,823E-05	14
	1,667E-05	
	1,627E-05	
	2,226E-05	
	2,181E-05	

Fuente: Elaboración propia

Considerando los valores tipos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad “k”, oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del método de carga variable para el barrio San Blas, son confiables con un coeficiente de variación del 14 %, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible.

#### 4.3.1.5. San Jorge II

**Tabla 45.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el método de carga variable procedente del barrio San Jorge II

<b>Método carga variable</b>			
<b>Barrio.</b>	<b>Muestra</b>	<b>Permeabilidad "20°c"</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>
	<b>Nº</b>	<b>"cm/seg"</b>	<b>"cm/seg"</b>
San Jorge II	5-A	6,924E-08	6,578E-08
		5,903E-08	
		5,972E-08	
		6,974E-08	
		7,118E-08	
	5-B	5,448E-08	6,538E-08
		7,155E-08	
		7,097E-08	
		7,332E-08	
		5,660E-08	
	5-C	4,894E-08	5,818E-08
		6,013E-08	
		6,866E-08	
		5,877E-08	
		5,439E-08	
	5-D	4,915E-08	6,377E-08
		7,393E-08	
		7,185E-08	
		6,756E-08	
		5,637E-08	
	5-E	7,339E-08	7,046E-08
		6,405E-08	
		7,392E-08	
		6,781E-08	
		7,314E-08	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 46 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 25 valores, con un mínimo de 4,894E-8 y un máximo de 7,393E-8. Así mismo incluye medidas de tendencia central,

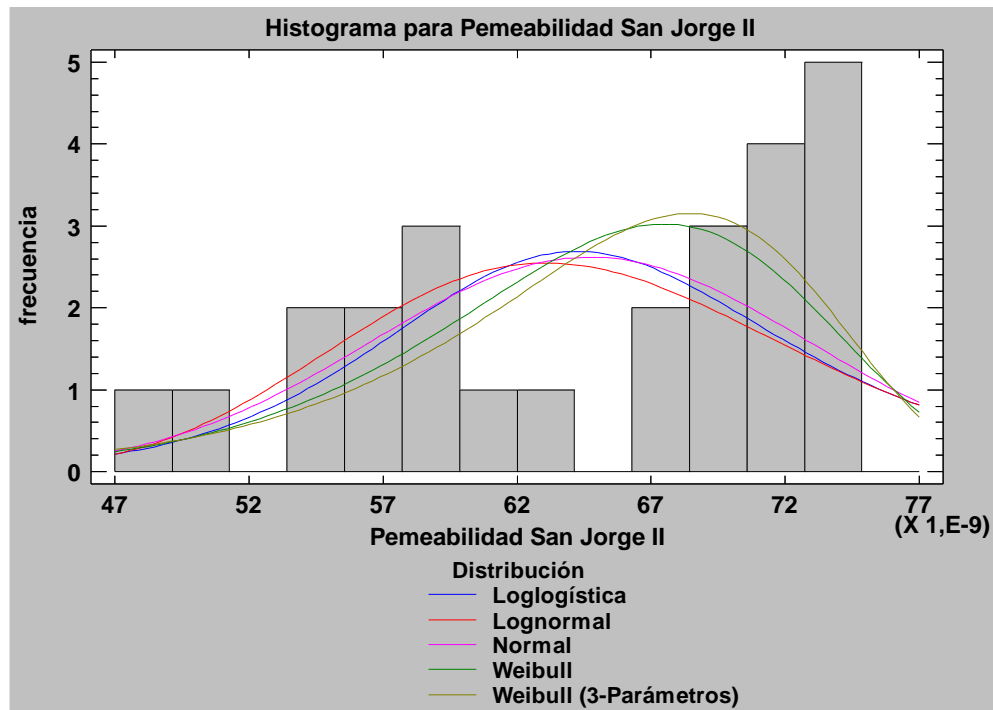
medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 46.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio San Jorge II

Recuento	25
Promedio	6,47156E-8
Mediana	6,781E-8
Desviación estándar	8,16366E-9
Coefficiente de variación	13 %
Mínimo	4,894E-8
Máximo	7,393E-8
Rango	2,499E-8
Sesgo estandarizado	-1,125
Curtosis estandarizada	-1,080

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 41.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del método de carga variable, San Jorge II



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphic

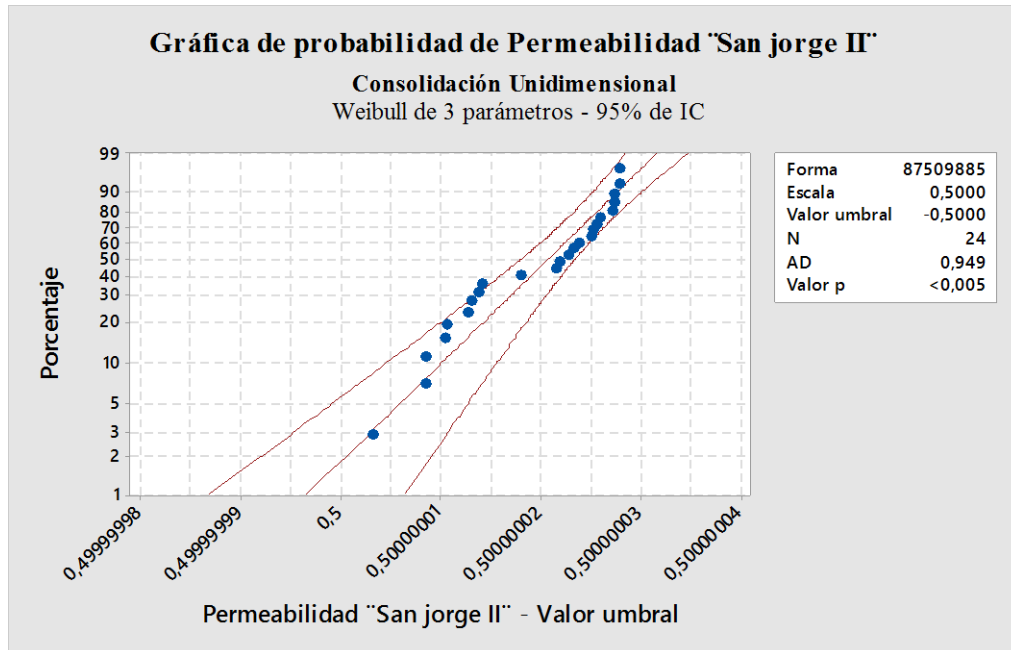
**Tabla 47.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio San Jorge II

Distribución	AD	P
Normal	1,020	<0,009
Lognormal	1,104	<0,006
Exponencial de 2 parámetros	2,847	<0,010
Weibull de 3 parámetros	0,949	>0,407
Valor extremo por máximos	1,189	<0,010
Loglogística	1,094	<0,005
Lognormal de 3 parámetros	1,031	<0,245

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución Weibull de 3 parámetros, con un coeficiente AD de 0,949, y un test de ajuste  $P > 0,407$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 42.** Distribución estadística, Weibull de 3 parámetros para la variable permeabilidad obtenida por el método de carga variable, San Jorge II



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

De similar manera la confiabilidad de los datos de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio San Jorge II se la determino a través de la comparación del coeficiente de variación tal como se muestra a continuación.

**Tabla 48.** Coeficiente de variación para el análisis de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable procedente del barrio San Jorge II.

<b>Método carga variable</b>		
<b>Barrio</b>	<b>Permeabilidad promedio</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
	<b>“cm/seg”</b>	<b>“%”</b>
San Jorge II	6,578E-08	13
	6,538E-08	
	5,818E-08	
	6,377E-08	
	7,046E-08	

Fuente: Elaboración propia

Considerando los valores tipos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad “k”, oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del método de carga variable para el barrio la San Jorge II, son confiables con un coeficiente de variación del 13 %, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible.

#### 4.3.2. Análisis estadístico de la variable continua permeabilidad, obtenida por el ensayo edométrico.

En esta sección se desarrolló el análisis estadístico de las variables continuas permeabilidad de los cinco tipos de suelos finos en estudio, mismos que han sido obtenidos a través del ensayo de consolidación unidimensional.

##### 4.3.2.1. Los Chapacos

**Tabla 49.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el ensayo edométrico procedente del barrio Los Chapacos

Método edométrico				
Barrio	Muestra	Carga aplicada	Permeabilidad	Permeabilidad promedio
	Nº	“Kg/cm <sup>2</sup> ”	“cm/seg”.	“cm/seg”.
Los Chapacos	1-A	17	8,15E-08	8,13E-08
	1-B	15	7,74E-08	
	1-C	17	8,29E-08	
	1-D	16	8,42E-08	
	1-E	17	8,06E-08	

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 50, que se muestra a continuación se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 5 valores, con un mínimo de 7,824E-8 y un máximo de 8,424E-8. Así mismo incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma.

**Tabla 50.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad para el barrio Los Chapacos

Recuento	5
Promedio	5,131E-8
Mediana	8,155E-8
Desviación estándar	2,613E-8
Coefficiente de variación	3%
Mínimo	7,824E-8
Máximo	8,424E-8
Rango	6,890E-8
Sesgo estandarizado	-0,722
Curtosis estandarizada	0,340

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

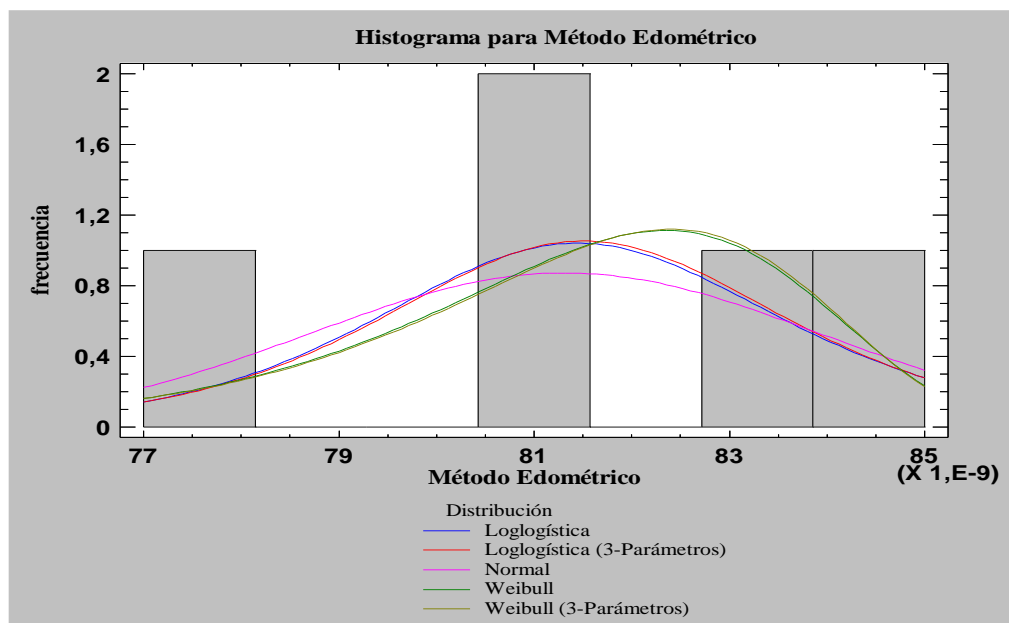
Con el propósito de identificar qué tipo de distribución estadística presenta la serie de datos de permeabilidad obtenidos por el ensayo edométrico, se realiza la prueba de bondad de ajuste propuesta por Anderson Darling, misma que es usada para probar si una muestra viene de una distribución específica.

**Tabla 51.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio, Los Chapacos.

Distribución	AD	P
Normal	0,198	>0,761
Weibull	0,169	>0,250
Valor extremo más pequeño	0,168	>0,250
Weibull de 3 parámetros	0,167	>0,500
Transformación Box-cox	0,198	>0,761
Loglogística	0,196	>0,250
Lognormal de 3 parámetros	0,196	>0,100

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

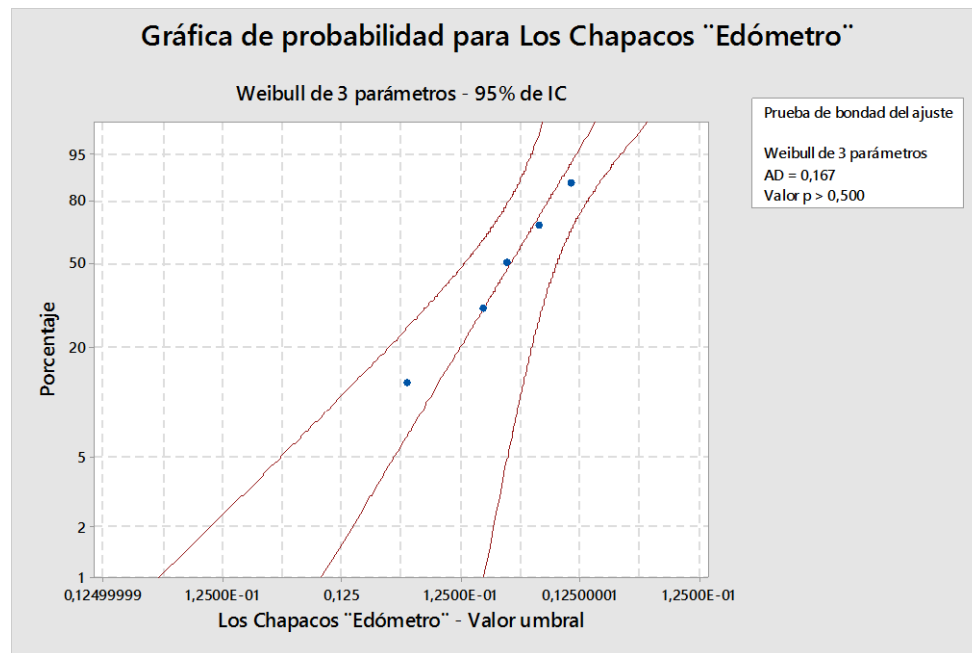
**Figura 43.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del ensayo edométrico, Los Chapacos



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución Weibull de 3 parámetros con un coeficiente AD de 0,167, y un test de ajuste  $P > 0,500$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 44.** Distribución estadística, Weibull de 3 parámetros, para la variable permeabilidad procedente del barrio, Los Chapacos.



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

De acuerdo a los valores típicos que nos sugiere el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, el cual nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad "k", oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del método edométrico para el barrio Los Chapacos, son confiables, tomando en cuenta que se tiene un coeficiente de variación de 3%; en tal sentido estamos dentro del rango de variación admisible.



#### 4.3.2.2. Torrecillas

**Tabla 52.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el ensayo edométrico procedente del barrio Torrecillas

Método edométrico				
Barrio	Muestra	Carga aplicada	Permeabilidad	Permeabilidad promedio
	Nº	“Kg/cm <sup>2</sup> ”	“cm/seg”	“cm/seg”
Torrecillas	2-A	13	1,93E-07	2,24E-07
	2-B	11	1,65E-07	
	2-C	12	2,52E-07	
	2-D	13	1,82E-07	
	2-E	12	3,30E-07	

Fuente: Elaboración Propia

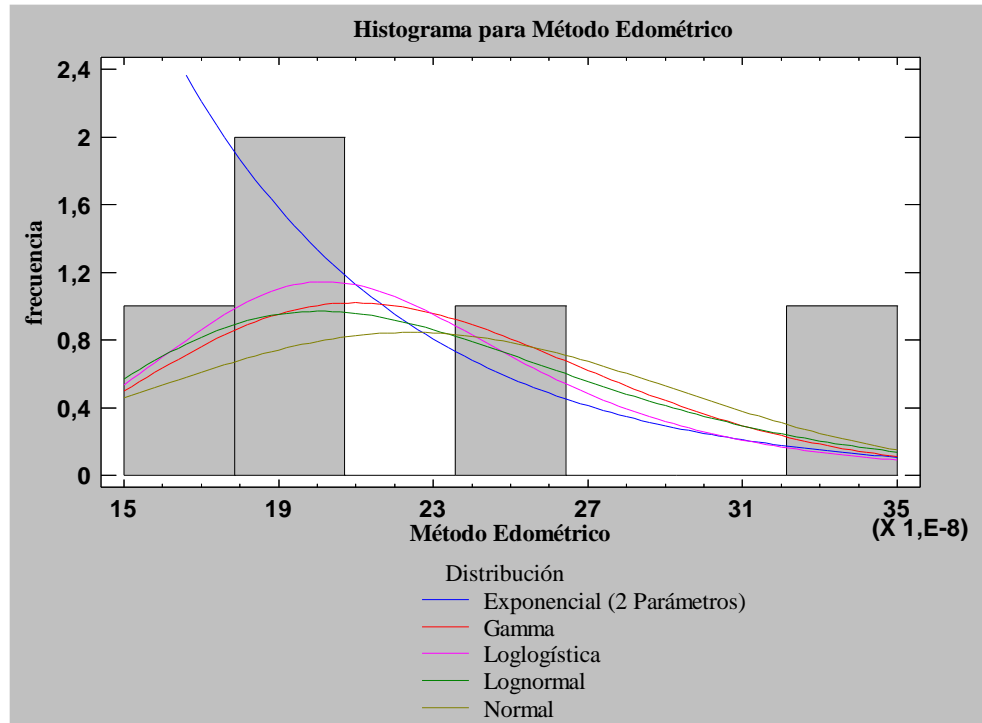
En la tabla 52 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 5 valores, con un mínimo de 1,650E-7 y un máximo de 3,300E-7. Así mismo incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 53.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio Torrecillas

Recuento	5
Promedio	2,244E-7
Mediana	1,930E-7
Desviación estándar	6,750E-8
Coefficiente de variación	30 %
Mínimo	1,650E-7
Máximo	3,300E-7
Rango	1,650E-7
Sesgo estandarizado	1,091
Curtosis estandarizada	0,240

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 45.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del ensayo edométrico, Torrecillas



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphic

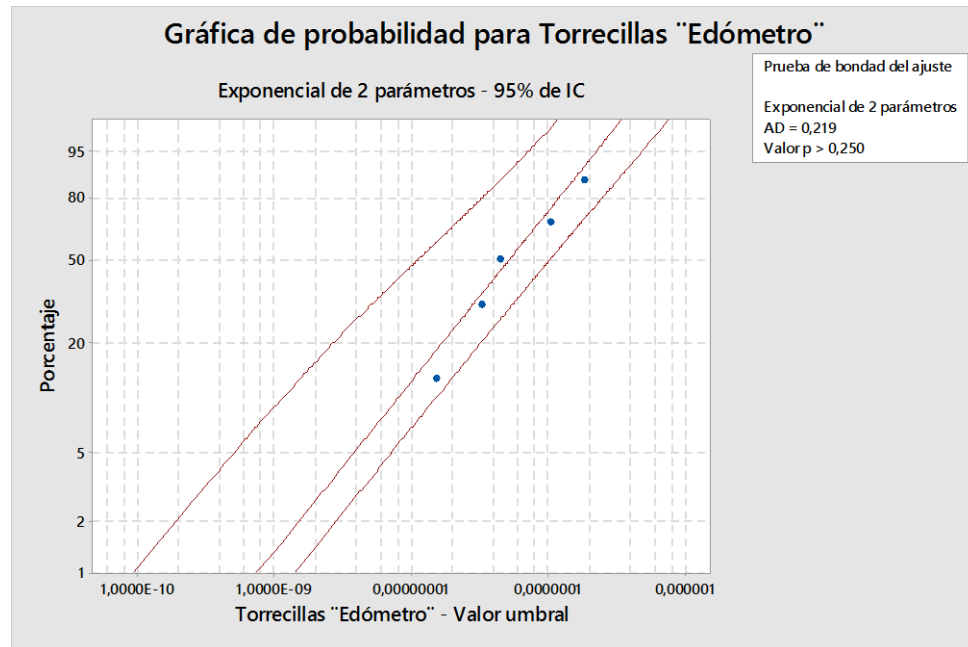
**Tabla 54.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio Torrecillas

Distribución	AD	P
Normal	0,362	>0,278
Lognormal	0,288	>0,454
Exponencial de 2 parámetros	0,219	>0,250
Gama de 3 parametros	0,201	>0,747
Valor extremo por máximos	0,346	>0,208
Loglogística	0,311	>0,250
Gama	0,362	>0,250

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución Exponencial de 2 parámetros, con un coeficiente AD de 0,219, y un test de ajuste  $P > 0,250$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 46.** Distribución estadística, Exponencial de 2 parámetros, para la variable permeabilidad procedente del barrio Torrecillas



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

Considerando los valores típicos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad "k", oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del ensayo edométrico para el barrio Torrecillas, son confiables, tomando en cuenta que se tiene un coeficiente de variación de 30%; en tal sentido estamos dentro del rango de variación admisible.

#### 4.3.2.3. El Constructor

**Tabla 55.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el ensayo edométrico procedente del barrio El Constructor

Método edométrico				
Barrio	Muestra	Carga aplicada	Permeabilidad	Permeabilidad promedio
	Nº	“Kg/cm <sup>2</sup> ”	“cm/seg”	“cm/seg”
El Constructor	3-A	14	7,87E-08	8,12E-08
	3-B	13	8,27E-08	
	3-C	12	7,94E-08	
	3-D	13	8,05E-08	
	3-E	10	8,46E-08	

Fuente: Elaboración propia

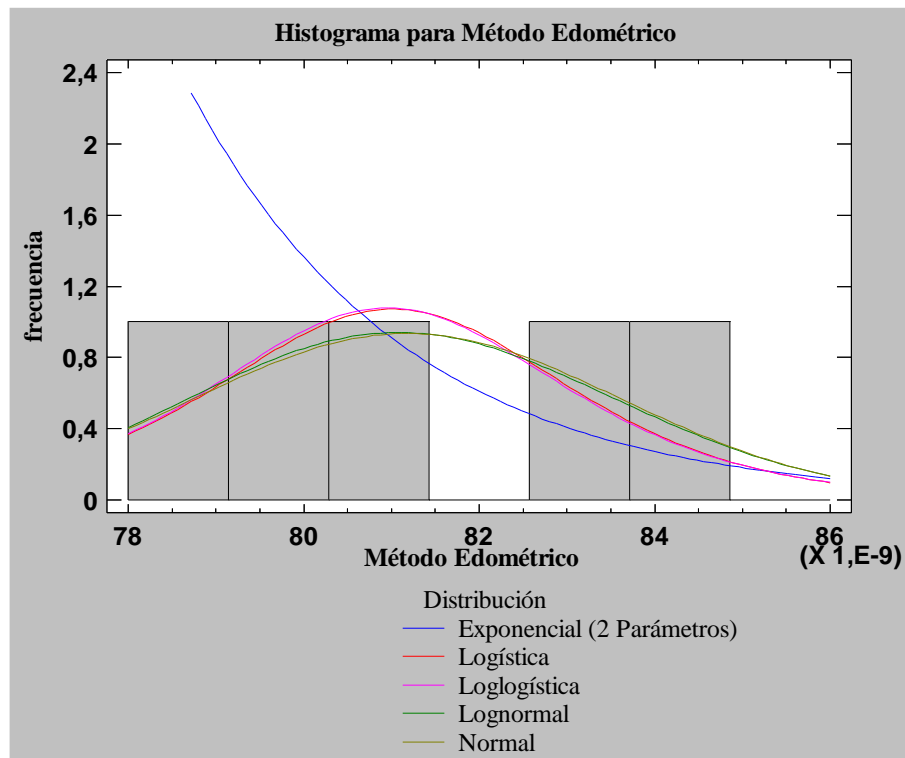
En la tabla 56 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 5 valores, con un mínimo de 7,870E-8 y un máximo de 8,460E-8. Así mismo incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 56.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio El Constructor

Recuento	5
Promedio	8,118E-8
Mediana	8,050E-8
Desviación estándar	2,438E-9
Coficiente de variación	3 %
Mínimo	7,870E-8
Máximo	8,460E-8
Rango	5,900E-9
Sesgo estandarizado	0,585
Curtosis estandarizada	-0,583

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 47.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del ensayo edométrico, El Constructor



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

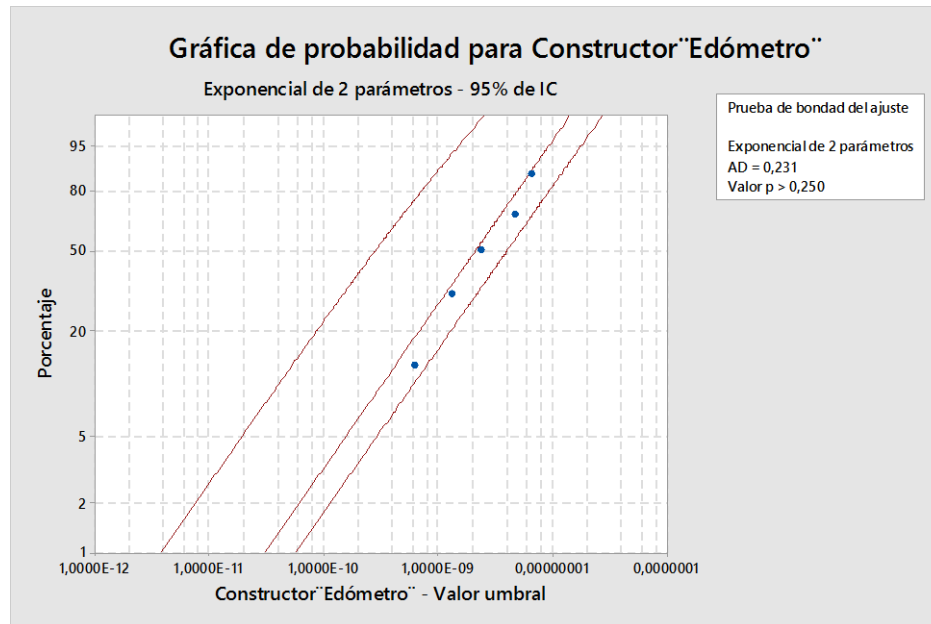
**Tabla 57.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio El Constructor

Distribución	AD	P
Normal	0,248	>0,561
Lognormal	0,244	>0,571
Exponencial de 2 parámetros	0,231	>0,250
Weibull de 3 parámetros	0,338	>0,389
Valor extremo por máximos	0,266	>0,250
Loglogística	0,272	>0,250
logística	0,280	>0,250

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución Exponencial de 2 parámetros AD de 0,231, y un test de ajuste  $P > 0,250$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 48.** Distribución estadística, Exponencial de 2 parámetros, para la variable permeabilidad procedente del barrio El Constructor



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

Considerando los valores típicos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad “k”, oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del ensayo edométrico para el barrio El Constructor, son confiables, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible con un coeficiente de variación del 3%.

#### 4.3.2.4. San Blas

**Tabla 58.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el ensayo edométrico procedente del barrio San Blas

Método edométrico				
Barrio	Muestra	Carga aplicada	Permeabilidad	Permeabilidad promedio
	Nº	“Kg/cm <sup>2</sup> ”	“cm/seg”	“cm/seg”
San Blas	4-A	11	1,37E-07	1,79E-07
	4-B	16	1,88E-07	
	4-C	16	1,93E-07	
	4-D	18	2,06E-07	
	4-E	15	1,70E-07	

Fuente: Elaboración propia

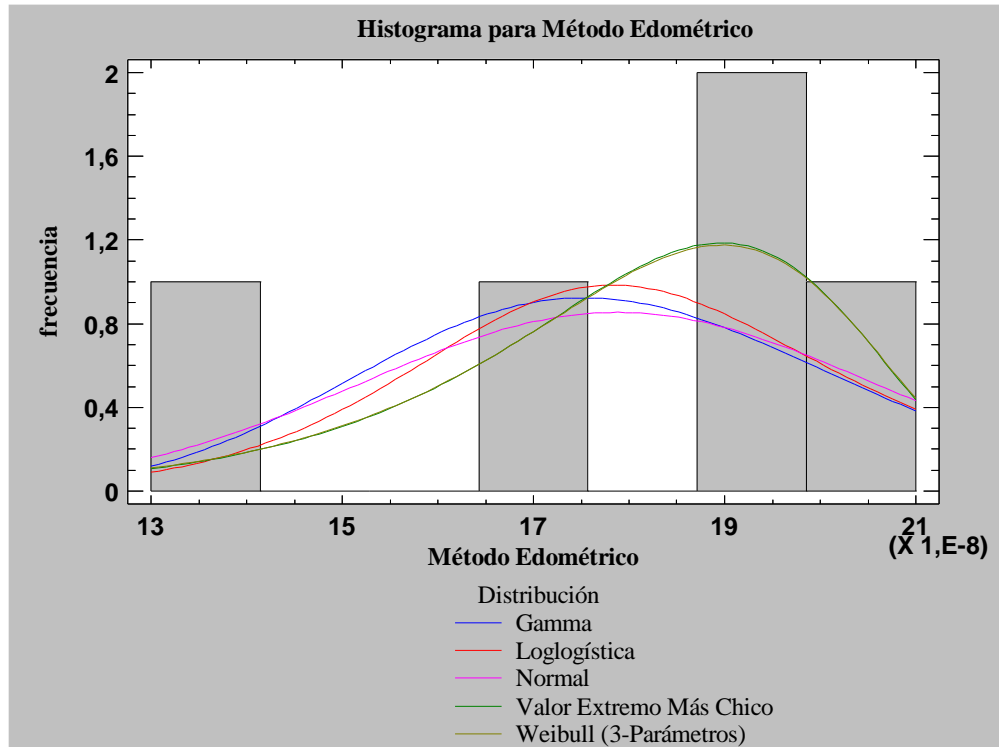
En la tabla 59 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 5 valores, con un mínimo de 1,370E-7 y un máximo de 2,060E-7. Así mismo incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 59.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio San Blas.

Recuento	5
Promedio	1,788E-7
Mediana	1,880E-7
Desviación estándar	2,667E-8
Coefficiente de variación	15 %
Mínimo	1,370E-7
Máximo	2,060E-7
Rango	6,900E-8
Sesgo estandarizado	-0,999
Curtosis estandarizada	-0,453

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 49.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del ensayo edométrico, San Blas



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Tabla 60.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio San Blas

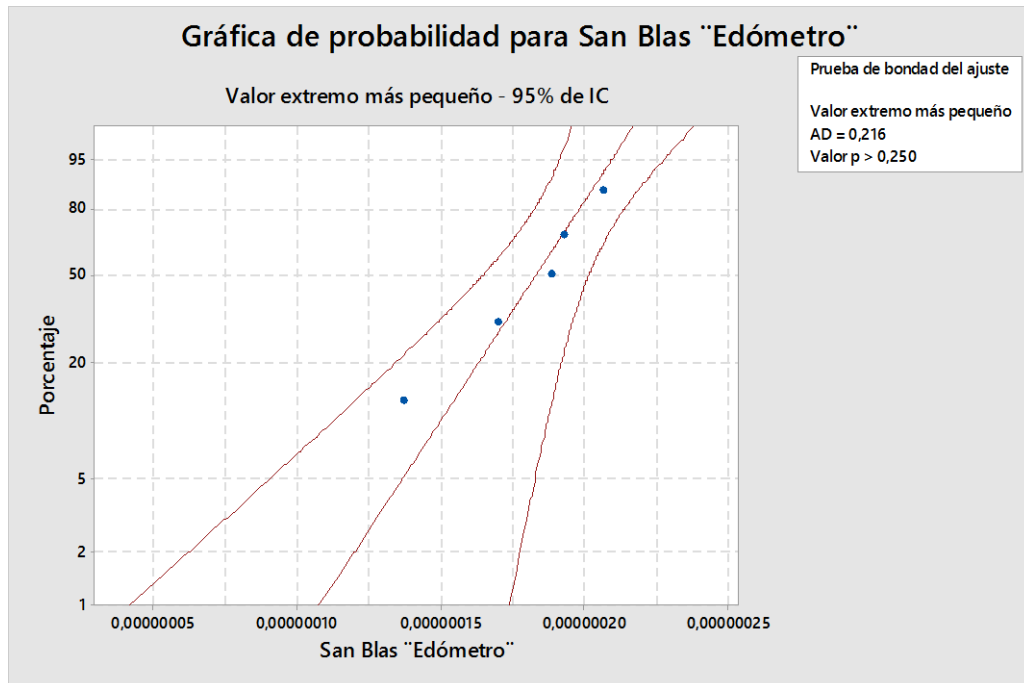
<b>Distribución</b>	<b>AD</b>	<b>P</b>
Normal	0,277	>0,491
Gama	0,354	>0,250
Weibull	0,254	>0,250
Weibull de 3 parámetros	0,216	>0,500
Valor extremo más pequeño	0,216	>0,250
Logística	0,275	>0,250
Loglogística de 3 parámetros	0,274	>0,250

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab



Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución Valor extremo más pequeño, con un coeficiente AD de 0,216, y un test de ajuste  $P > 0,250$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 50.** Distribución estadística, Valor extremo más pequeño, para la variable permeabilidad procedente del barrio, San Blas



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab.

Considerando los valores típicos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad "k", oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del ensayo edométrico para el barrio San Blas, son confiables, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible con un coeficiente de variación del 15%.

#### 4.3.2.5. San Jorge II

**Tabla 61.** Resumen de los resultados de la permeabilidad por el ensayo edométrico procedente del barrio San Jorge II

Método edométrico				
Barrio	Muestra	Carga aplicada	Permeabilidad	Permeabilidad promedio
	Nº	“Kg/cm <sup>2</sup> ”	“cm/seg”	“cm/seg”
San Jorge II	5-A	13	8,34E-08	8,20E-08
	5-B	19	8,30E-08	
	5-C	14	8,93E-08	
	5-D	13	7,06E-08	
	5-E	10	8,37E-08	

Fuente: Elaboración propia.

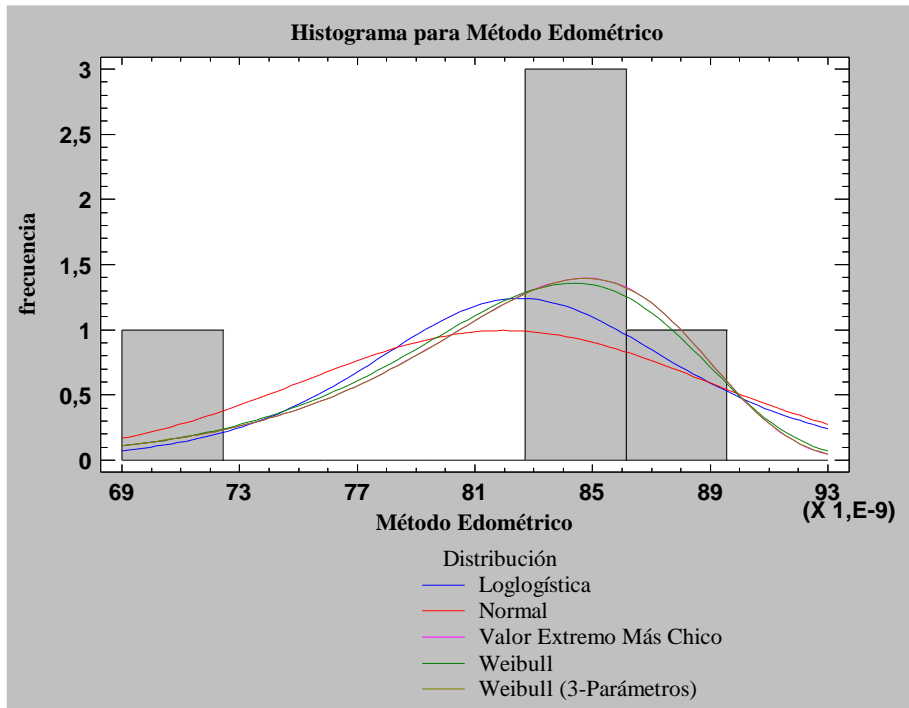
En la tabla 61 que se muestra a continuación, se presenta un resumen estadístico descriptivo donde se puede observar que la variable cuenta con 5 valores, con un mínimo de 7,060E-8 y un máximo de 8,930E-8. Así mismo incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. También se visualiza un histograma de la variable en estudio donde se denota la distribución de frecuencia que presenta los datos.

**Tabla 62.** Resumen estadístico descriptivo de la variable aleatoria permeabilidad procedente del barrio San Jorge II.

Recuento	5
Promedio	8,200E-8
Mediana	8,340E-8
Desviación estándar	6,876E-9
Coefficiente de variación	8 %
Mínimo	7,060E-8
Máximo	8,930E-8
Rango	1,870E-8
Sesgo estandarizado	-1,268
Curtosis estandarizada	1,388

Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

**Figura 51.** Histograma de la variable permeabilidad obtenida a través del ensayo edométrico, San Jorge II



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

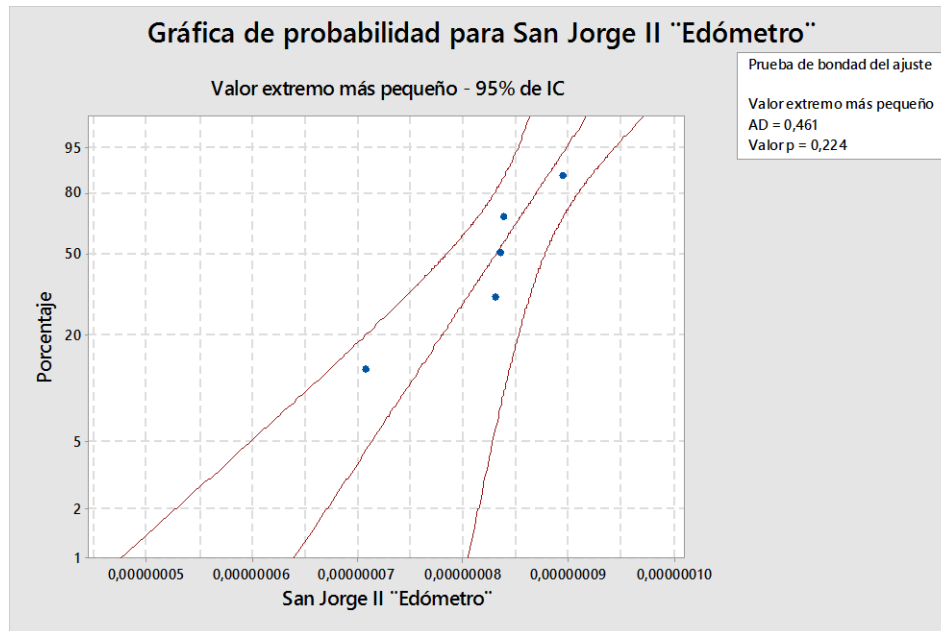
**Tabla 63.** Prueba de bondad de ajuste Anderson Darling para la variable permeabilidad proveniente del barrio San Jorge II.

Distribución	AD	P
Normal	0,534	<0,084
Weibull	0,484	>0,201
Lognormal	0,571	<0,064
Weibull de 3 parámetros	0,461	>0,158
Valor extremo más pequeño	0,461	>0,224
Loglogística	0,575	<0,079
Lognormal de 3 parámetros	0,542	>0,566

Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Podemos observar que la distribución que más se ajusta para la variable en estudio es la distribución Valor extremo más pequeño, con un coeficiente AD de 0,461, y un test de ajuste  $P > 0,224$ , confirmando el supuesto con un intervalo de confianza del 95 %.

**Figura 52.** Distribución estadística, Valor extremo más pequeño, para la variable permeabilidad procedente del barrio San Jorge II



Fuente: Reporte del software estadístico Minitab

Considerando los valores típicos que nos propone el cuerpo de ingenieros de EEUU en 1999, nos recomienda que el coeficiente de variación para el parámetro, permeabilidad "k", oscila entre 20 y 90 %; en tal sentido podemos afirmar que nuestros datos obtenidos por el ensayo de permeabilidad a través del ensayo edométrico para el barrio San Jorge II, son confiables, tomando en cuenta que estamos dentro del rango de variación admisible con un coeficiente de variación del 8%.

#### 4.4. COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

En el presente apartado se efectúa la comparación del coeficiente de permeabilidad obtenido de forma directa a través del ensayo de permeabilidad por el método de carga variable, e indirecta por medio del ensayo de consolidación unidimensional.

Con el objetivo de simular las mismas condiciones de suelo inalterado en ambos ensayos, se designó los valores de permeabilidad obtenidos a través del ensayo de carga variable como datos patrón o inalterados debido a las condiciones del ensayo. Cabe mencionar que, al momento de efectuar el ensayo de consolidación unidimensional en un suelo, este sufre una serie de alteraciones en su estructura interna, desde el proceso de saturación donde se presenta el fenómeno de expansión y los asentamientos graduales provocados por las diferentes presiones que se le aplica a la muestra debido al proceso de consolidación, obteniendo para cada momento de carga una relación de vacíos y su propia densidad.

De esa manera se buscó un parámetro común para poder analizar la comparación entre ambos ensayos; este parámetro viene dado por la relación de vacíos que presenta el suelo en cada ensayo, obteniendo de esa manera coeficientes de permeabilidad "k", en la misma condición para cada prueba.

Obtenidas las permeabilidades tomando en cuenta la condición mencionada anteriormente, se realiza la comparación del coeficiente de permeabilidad, obtenido por el ensayo de carga variable y el edómetro, a través de las pruebas estadística t de Student, y Mann Whitney, considerando que dichas pruebas determinan si las variables tienen las mismas características, en cuanto a los valores de tendencia central media y mediana.

##### 4.4.1. Comparación del coeficiente de permeabilidad para el barrio Los Chapacos

**Tabla 64.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el ensayo de carga variable para un suelo "CH"

Ensayos	Relación de Vacíos e	Permeabilidad cm/seg.
1	0,647	1,492E-07
2	0,655	1,476E-07
3	0,623	1,172E-07
4	0,642	1,191E-07
5	0,628	1,225E-07

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 65.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el edómetro, para un suelo "CH"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
0	0,679		0,681		0,664		0,683		0,673	
10	0,664	5,364E-08	0,669	5,347E-08	0,641	7,240E-08	0,657	8,377E-08	0,649	7,509E-08
20	0,639	9,471E-08	0,643	9,883E-08	0,614	8,804E-08	0,630	8,461E-08	0,620	8,281E-08
40	0,604	7,476E-08	0,613	7,243E-08	0,579	5,589E-08	0,597	5,408E-08	0,577	5,235E-08
80	0,554	4,655E-08	0,557	4,663E-08	0,532	2,216E-08	0,550	4,186E-08	0,512	4,305E-08
160	0,480	3,731E-08	0,489	3,692E-08	0,467	2,088E-08	0,473	4,434E-08	0,414	3,359E-08
320	0,369	2,987E-08	0,367	3,487E-08	0,373	1,653E-08	0,329	4,029E-08	0,272	2,271E-08

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 66.** Permeabilidad del edómetro obtenida a través del proceso de interpolación entre la relación de vacíos y permeabilidad, para un suelo "CH"

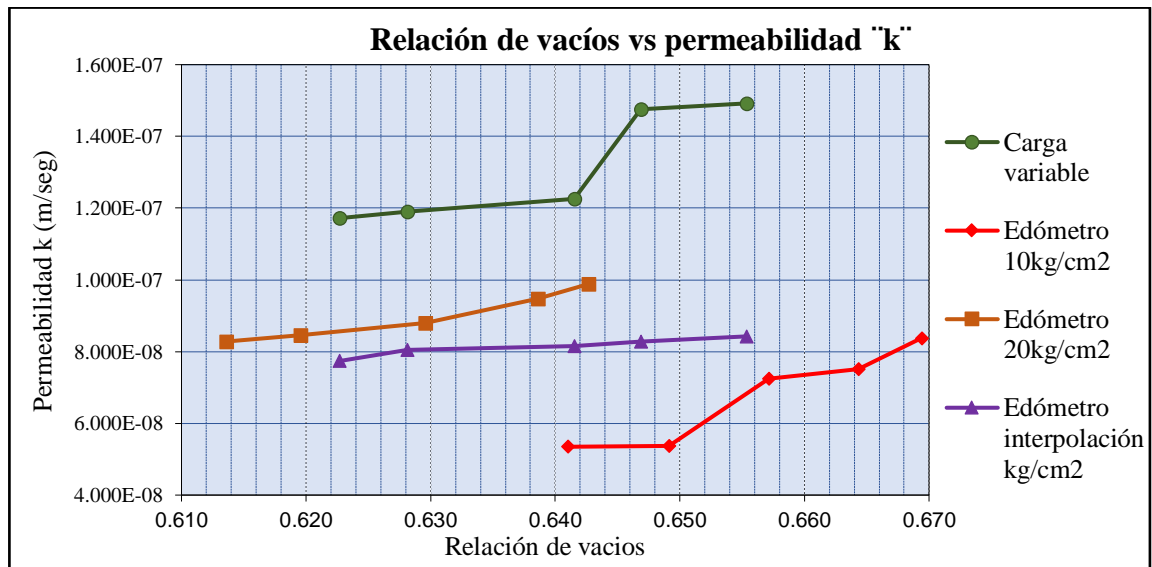
Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
10	0,664	5,364E-08	0,669	5,347E-08	0,641	7,240E-08	0,657	8,377E-08	0,649	7,509E-08
Interpolación	0,647	8,155E-08	0,655	7,735E-08	0,623	8,287E-08	0,642	8,424E-08	0,628	8,056E-08
20	0,639	9,471E-08	0,643	9,883E-08	0,614	8,804E-08	0,630	8,461E-08	0,620	8,281E-08

Fuente: Elaboración propia

Tomando como patrón la relación de vacíos y permeabilidad obtenida a través del ensayo de carga variable, se determinó a través de un proceso de interpolación la selección de valores aproximados de permeabilidad del ensayo consolidación unidimensional.

De esa manera se puede brindar similitud de condiciones en el suelo analizado para ambos ensayos.

**Figura 53.** Relación de vacíos Vs permeabilidad "k", para un suelo "CH"



Fuente: Elaboración propia

Se realiza la comparación de las variables permeabilidad obtenidas por el método de carga variable y el ensayo edométrico, con el propósito de identificar las características semejantes y diferentes de las variables en estudio.

En la Tabla 67, se detalla un resumen estadístico de las variables analizadas donde podemos denotar, las medidas de tendencia central, de forma y de dispersión de ambas variables.

**Tabla 67.** Resumen estadístico de la comparación de variables permeabilidad para un suelo "CH"

Resumen estadístico	Permeabilidad obtenida por el método de carga variable "CH"	Permeabilidad obtenida por el método edométrico "CH"
Recuento	25	5
Promedio	1,311E-7	8,131E-08
Mediana	1,229E-7	8,155E-08
Desviación estándar	2,113E-8	2,613E-09
Coefficiente de variación	16 %	3%
Mínimo	1,109E-7	7,735E-08
Máximo	1,870E-7	8,424E-08
Rango	7,601E-8	6,890E-09
Sesgo estandarizado	2,620	-0,722
Curtosis estandarizada	1,040	0,340

Fuente: Elaboración propia

Analizando la tabla del resumen estadístico para las variables permeabilidad obtenidas mediante el ensayo de carga variable y edométrico para la muestra proveniente del barrio Los Chapacos, de particular interés es la media y la mediana, que pueden usarse para comparar si las muestras son similares. Para efectuar una comparación detallada, se plantea realizar la prueba t de student, misma que tiene la finalidad de efectuar una comparación entre medias de las variables analizadas, y la prueba de Mann-Whitney (Wilcoxon), la cual realiza una comparación entre medianas de las variables estudiadas.

Prueba t de Student para la comparación de medias

Media de la muestra 1: 1,311E-7

Media de la muestra 2: 8,131E-08

Hipótesis nula:  $media1 = media2$

Hipótesis Alt.:  $media1 <> media2$

$t = -5,189$  valor-P = 1,654E-5

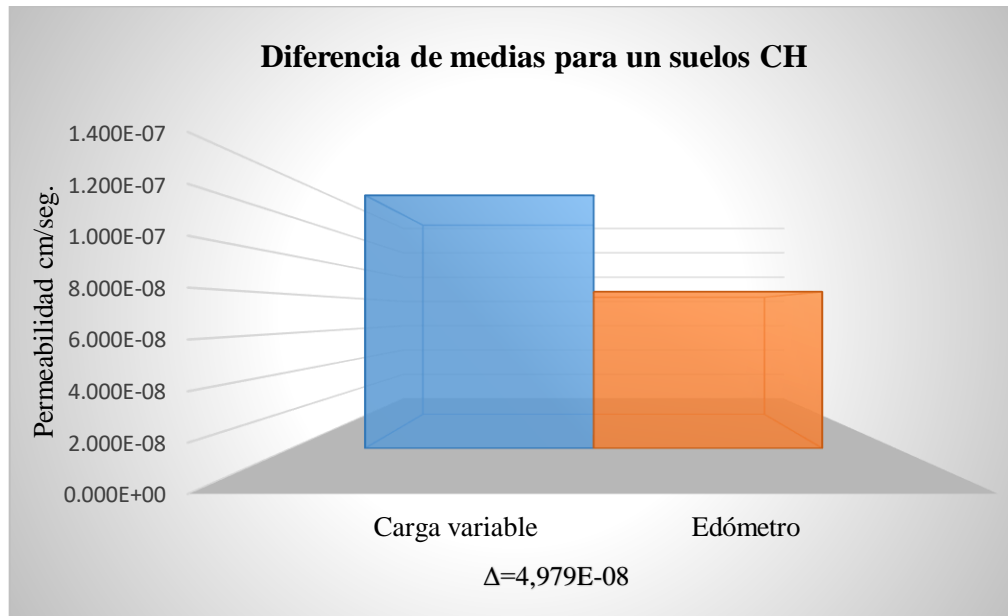
Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Podemos observar que el p valor obtenido es igual a 0, si el mismo es menor que el nivel de significación, concluimos afirmando que existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa, con un nivel de confianza del 95 %; de



ese modo aseveramos que existe diferencias estadísticamente significativas entre la media de los valores de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y la media de la variable permeabilidad obtenida por el ensayo edométrico.

**Figura 54.** Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "CH"



Fuente: Elaboración propia

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Mediana de muestra 1: 1,229E-7      Mediana de muestra 2: 8,155E-8

Hipótesis Nula:  $mediana1 = mediana2$

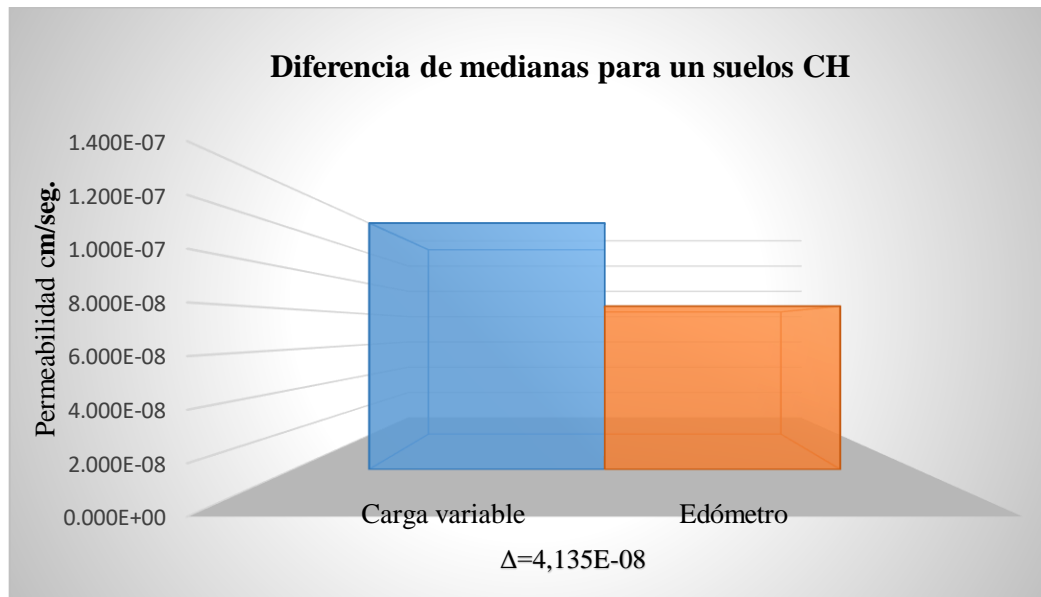
Hipótesis Alt.:  $mediana1 <> mediana2$

W = 125 valor-P = 0,594E-04

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Esta prueba se fundamenta básicamente en la combinación de dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los rangos promedio de las dos muestras en los datos combinados. Debido a que el valor-P es menor que 0,05; existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95 %.

**Figura 55.** Comparación de la mediana para las variables permeabilidad obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "CH"



Fuente: Elaboración propia

### Regresión

Es importante establecer un nexo de relación entre la permeabilidad obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo de edométrico, para lo cual se efectúa un análisis de regresión entre las variables estudiadas a través de la deducción del método de mínimos cuadrados. En ese sentido se considera oportuno realizar un resumen promedio de los ensayos para cada variable, Tabla 68.

**Tabla 68.** Resumen promedio de los ensayos efectuados por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "CH"

Los chapacos "CH"				
Identificación de la muestra	Edómetro		Carga variable	
	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación
Nº	"cm/seg"	"%"	"cm/seg"	"%"
1-A	8,155E-08	3	1,492E-07	16
1-B	7,735E-08		1,476E-07	
1-C	8,287E-08		1,172E-07	
1-D	8,424E-08		1,191E-07	
1-E	8,056E-08		1,225E-07	

Fuente: Elaboración propia

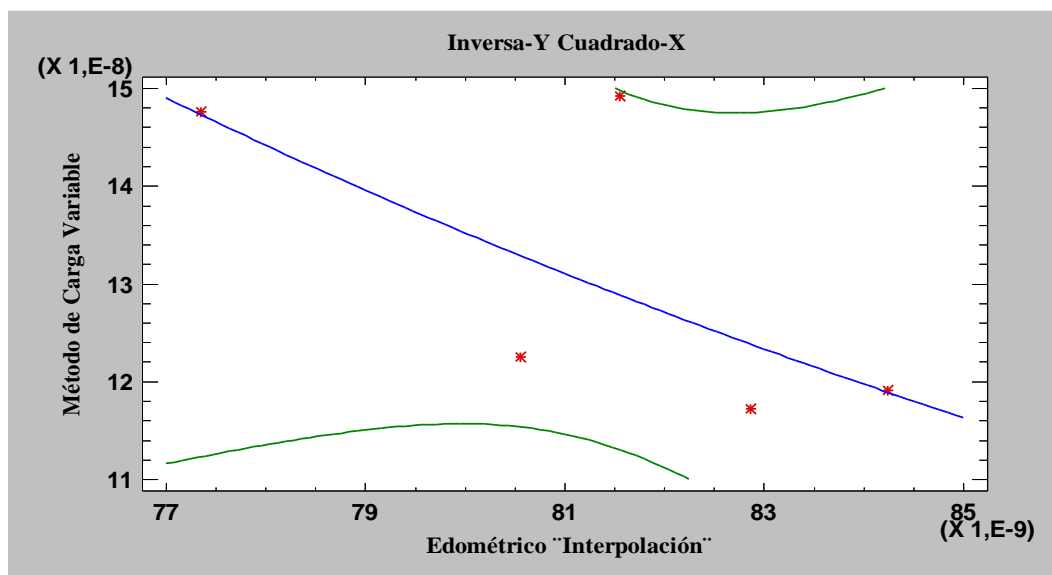
Una vez ordenadas nuestras variables, se determinó el modelo Inversa-Y Cuadrado-X como la función continua que mejor se aproximó a los datos analizados, proporcionando una demostración visual del comportamiento de los puntos la Figura 61.

Se debe identificar la variable dependiente e independiente.

Variable dependiente Y= Método de carga variable.

Variable independiente X= Método edométrico.

**Figura 56.** Regresión entre el método de carga variable y el método edométrico, para un suelo CH



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y = \frac{1}{-1,923E06 + 1,456E21 * x^2}$$

Coefficiente de Correlación = 0,683

R-cuadrada = 46.553 por ciento

El coeficiente de determinación indica que el modelo ajustado explica 46,553 %; de la variabilidad en método de carga variable.

El coeficiente de correlación es igual a 0,0683, indicando un grado de asociación moderadamente fuerte entre las variables.

#### 4.4.2. Comparación del coeficiente de permeabilidad para el barrio Torrecillas

**Tabla 69.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el ensayo de carga variable, para un suelo "ML-CL"

Ensayos	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
1	0,639	3,321E-06
2	0,644	2,689E-06
3	0,648	1,966E-06
4	0,636	2,459E-06
5	0,641	2,460E-06

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 70.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el edómetro, para un suelo "ML-CL"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
0	0,658	-	0,654	-	0,672	-	0,661		0,670	
10	0,644	1,885E-07	0,638	1,586E-07	0,653	2,321E-07	0,649	1,863E-07	0,647	3,408E-07
20	0,626	2,059E-07	0,620	2,189E-07	0,628	3,217E-07	0,632	1,715E-07	0,623	2,929E-07
40	0,597	1,466E-07	0,590	1,471E-07	0,596	1,913E-07	0,603	1,566E-07	0,593	1,812E-07
80	0,551	1,051E-07	0,542	1,156E-07	0,556	8,729E-08	0,557	1,519E-07	0,554	8,174E-08
160	0,487	8,427E-08	0,477	7,650E-08	0,494	9,191E-08	0,493	8,150E-08	0,495	9,908E-08
320	0,419	4,797E-08	0,405	3,948E-08	0,395	7,065E-08	0,425	3,763E-08	0,421	5,681E-08

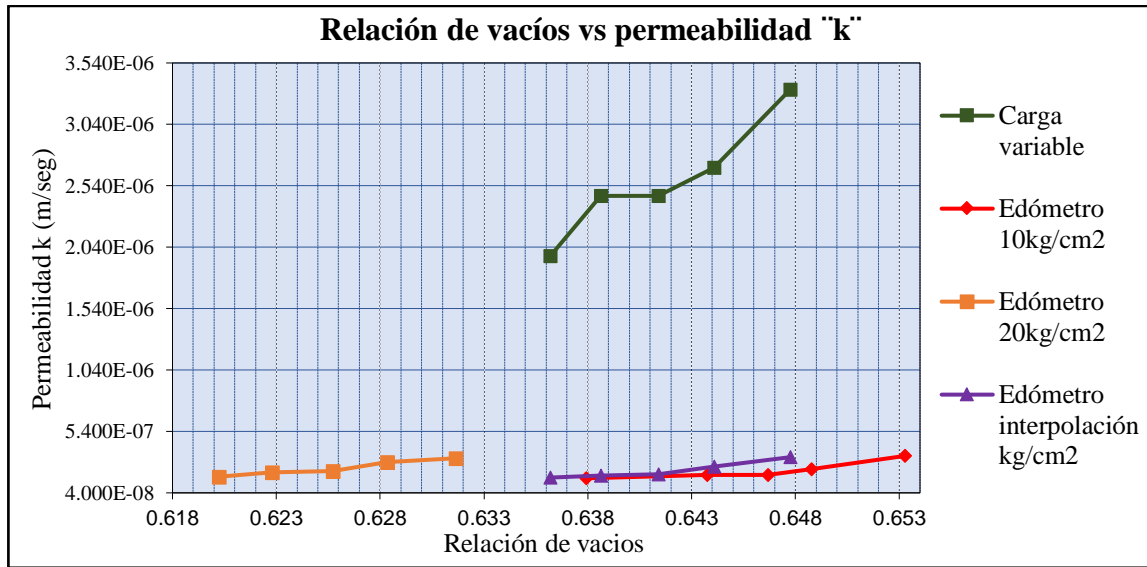
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 71.** Permeabilidad del edómetro obtenida a través del proceso de interpolación entre la relación de vacíos y permeabilidad, para un suelo "ML-CL"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
10	0,644	5,364E-08	0,638	5,347E-08	0,653	7,240E-08	0,649	8,377E-08	0,647	7,509E-08
Interpolando	0,639	1,9339E-07	0,636	1,6452E-07	0,648	2,5197E-07	0,644	1,8221E-07	0,641	3,3029E-07
20	0,626	9,471E-08	0,620	9,883E-08	0,628	8,804E-08	0,632	8,461E-08	0,623	8,281E-08

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 57.** Relación de vacíos Vs permeabilidad "k", para un suelo "ML-CL"



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 72.** Resumen estadístico de la comparación de variables permeabilidad para un suelo "CL-ML"

Resumen estadístico	Permeabilidad obtenida por el método de carga variable "CL-ML"	Permeabilidad obtenida por el método edométrico "CL-ML"
Recuento	25	5
Promedio	2,579E-06	2.244E-07
Mediana	2,435E-06	1,930E-07
Desviación estándar	7,270E-07	6,750E-08
Coefficiente de variación	28 %	30 %
Mínimo	1,040E-06	1,650E-07
Máximo	5,170E-06	3.300E-07
Rango	4,130E-06	1,650E-07
Sesgo estandarizado	3,515	1,091
Curtosis estandarizada	6,769	0,240

Fuente: Elaboración propia

Los estadígrafos de tendencia central, media y mediana, serán analizados, con el propósito de efectuar diferencia y semejanza entre las variables en análisis.

Prueba t de Student para la comparación de medias.

Media de la muestra 1: 2,579E-06

Media de la muestra 2: 2,244E-07

Hipótesis nula:  $media1 = media2$

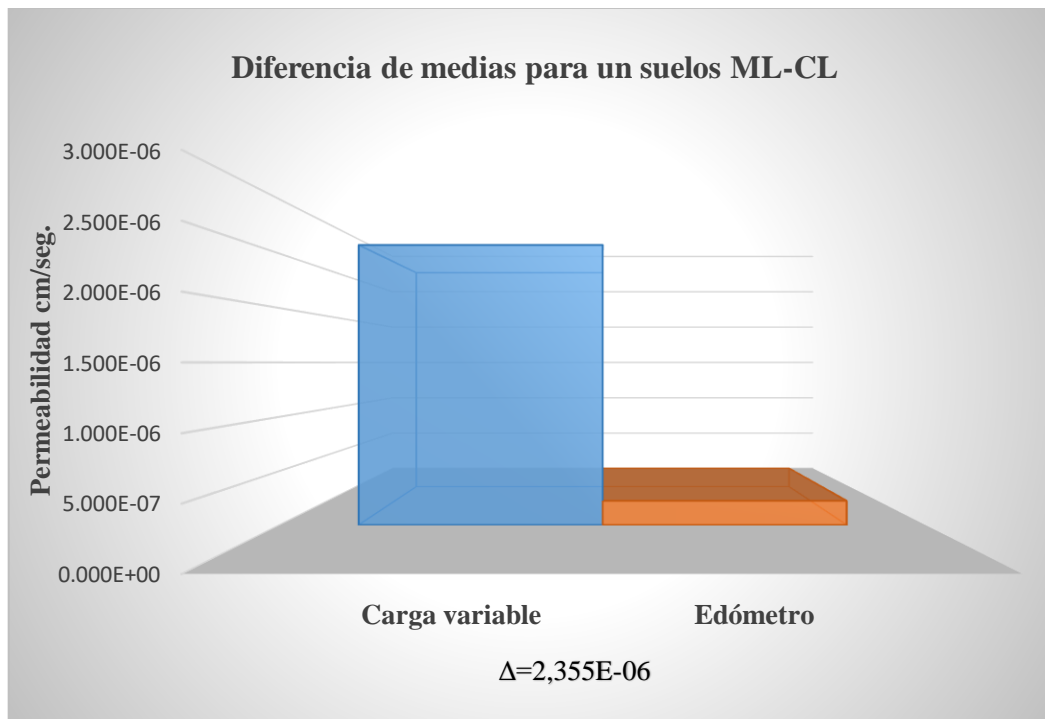
Hipótesis Alt.:  $media1 <> media2$

$t = -7,573$  valor-P = 3,005E-8

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Tomando en cuenta que el p valor obtenido es igual a 0, siendo el mismo menor que el nivel de significación, rechazamos la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 %; afirmando que existe diferencias estadísticamente significativas entre la media de los valores de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y la media de variable permeabilidad obtenida por el ensayo edométrico.

**Figura 58.** Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "ML-CL"



Fuente: Elaboración propia.

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Mediana de muestra 1: 2,435E-06

Mediana de muestra 2: 1,930E-7

Hipótesis Nula:  $\text{mediana1} = \text{mediana2}$

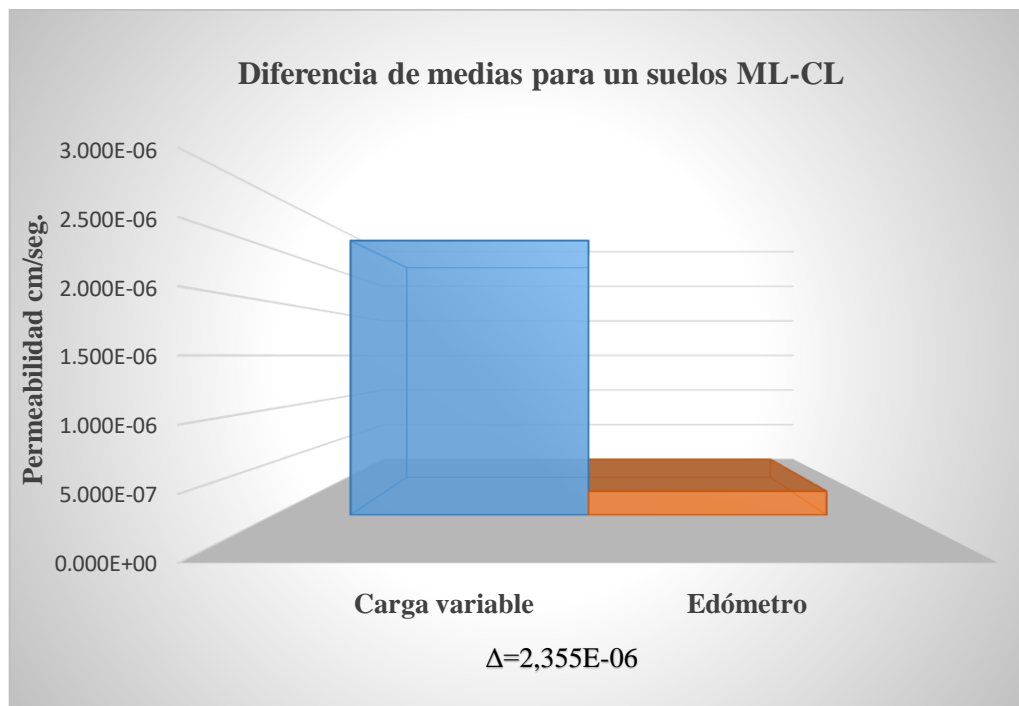
Hipótesis Alt.:  $\text{mediana1} <> \text{mediana2}$

$W = 125,0$  valor-P = 5,602E-4

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Habiendo efectuado la prueba, concluimos que el valor de P, es menor a 0,05; de ese modo afirmamos que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95 % de confianza.

**Figura 59.** Comparación de las medianas para las variables permeabilidad, obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "ML-CL"



Fuente: Elaboración propia

## Regresión

El nexos de relación entre la permeabilidad obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo de edométrico para un suelo ML-CL, se efectuará a través de un análisis de regresión entre las variables analizadas a través de la deducción del método de mínimos



cuadrados. De ese modo se presenta a continuación un resumen promedio de los ensayos para cada variable.

**Tabla 73.** Resumen promedio de los ensayos efectuados por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "ML-CL"

Torrecillas "ML-CL"				
Identificación de la muestra	Carga variable		Edómetro	
	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación
Nº	"cm/seg"	"%"	"cm/seg"	"%"
2-A	3,321E-06	28	1,934E-07	30
2-B	2,689E-06		1,645E-07	
2-C	1,966E-06		2,520E-07	
2-D	2,459E-06		1,822E-07	
2-E	2,460E-06		3,303E-07	

Fuente: Elaboración propia

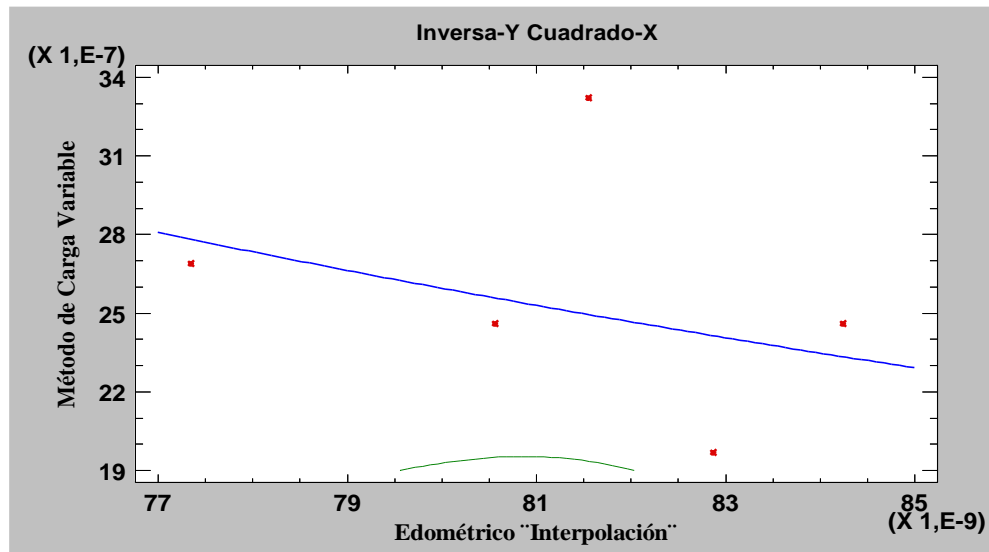
Se determinó el modelo Inversa-Y cuadrado-X, como la función continua que mejor se aproximó a los datos analizados, proporcionando una demostración visual de la demostración de los puntos como se observa en la Figura 60.

Se debe identificar la variable dependiente e independiente.

Variable dependiente Y= Método de carga variable

Variable independiente X= Método edométrico

**Figura 60.** Regresión entre el método de carga variable y el método edométrico, para un suelo ML-CL



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y = \frac{1}{-11099,7 + 6,197E19 * X^2}$$

Coefficiente de Correlación = 0,349

R-cuadrada = 12,171 por ciento

El coeficiente de determinación indica que el modelo ajustado explica 12,171 %; de la variabilidad en método de carga variable.

El coeficiente de correlación es igual a 0,349, indicando un grado de asociación moderadamente fuerte entre las variables.

#### 4.4.3. Comparación del coeficiente de permeabilidad para el barrio El Constructor

**Tabla 74.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el ensayo de carga variable para un suelo "CL"

Ensayos	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
1	0,450	1,273E-06
2	0,448	1,245E-06
3	0,446	1,390E-06
4	0,445	1,273E-06
5	0,444	1,572E-06

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 75.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el edómetro, para un suelo "CL"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
0	0,452	-	0,454	-	0,455	-	0,450	-	0,448	-
10	0,448	8,148E-08	0,449	8,460E-08	0,451	8,089E-08	0,446	8,374E-08	0,444	8,460E-08
20	0,444	7,452E-08	0,444	7,718E-08	0,447	7,403E-08	0,442	7,361E-08	0,439	7,926E-08
40	0,440	3,985E-08	0,440	3,733E-08	0,442	5,244E-08	0,437	3,802E-08	0,435	3,087E-08
80	0,435	2,309E-08	0,434	2,155E-08	0,436	2,623E-08	0,432	1,970E-08	0,430	2,081E-08
160	0,429	1,327E-08	0,427	1,176E-08	0,430	1,600E-08	0,425	1,182E-08	0,423	1,196E-08
320	0,422	6,145E-09	0,420	5,769E-09	0,422	7,315E-09	0,418	5,540E-09	0,416	5,543E-09

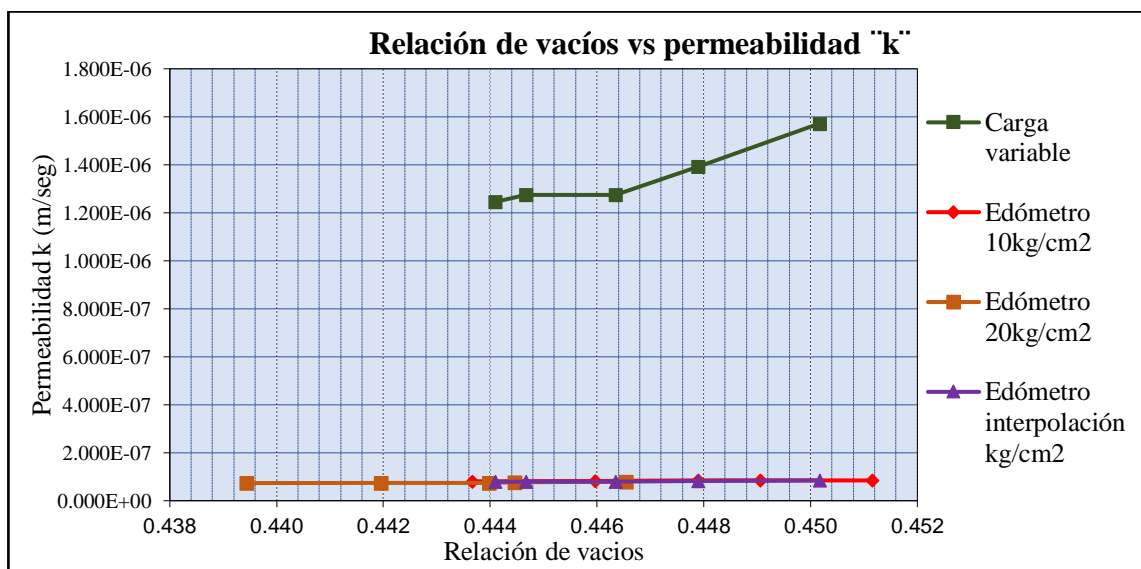
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 76.** Permeabilidad del edómetro obtenida a través del proceso de interpolación entre la relación de vacíos y permeabilidad, para un suelo "CL"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
10	0,448	8,148E-08	0,449	8,460E-08	0,451	8,089E-08	0,446	8,374E-08	0,444	8,460E-08
Interpolando	0,446	7,874E-08	0,448	8,273E-08	0,450	7,942E-08	0,445	8,047E-08	0,444	8,460E-08
20	0,444	7,452E-08	0,444	7,718E-08	0,447	7,403E-08	0,442	7,361E-08	0,439	7,926E-08

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 61.** Relación de vacíos Vs permeabilidad "k", para un suelo "CL"



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 77.** Resumen estadístico de la comparación de variables permeabilidad para un suelo "CL"

Resumen estadístico	Permeabilidad obtenida por el método de carga variable "CL"	Permeabilidad obtenida por el método edométrico "CL"
Recuento	26	5
Promedio	1,359E-06	8,119E-08
Mediana	1,317E-06	8,050E-08
Desviación estándar	2,000E-07	2,439E-08
Coefficiente de variación	15 %	3 %
Mínimo	1,140E-06	7,870E-09
Máximo	1,990E-06	8,460E-07
Rango	8,520E-07	5,900E-07
Sesgo estandarizado	3,873	0,585
Curtosis estandarizada	3,971	-0,583

Fuente: Elaboración propia

Los estadígrafos de tendencia central, media y mediana, serán analizadas, con el propósito de efectuar diferencia y semejanza entre las variables en análisis.

Prueba t de Student para la comparación de medias.

Media de la muestra 1: 1,359E-06

Media de la muestra 2: 8,118E-08

Hipótesis nula:  $\text{media1} = \text{media2}$

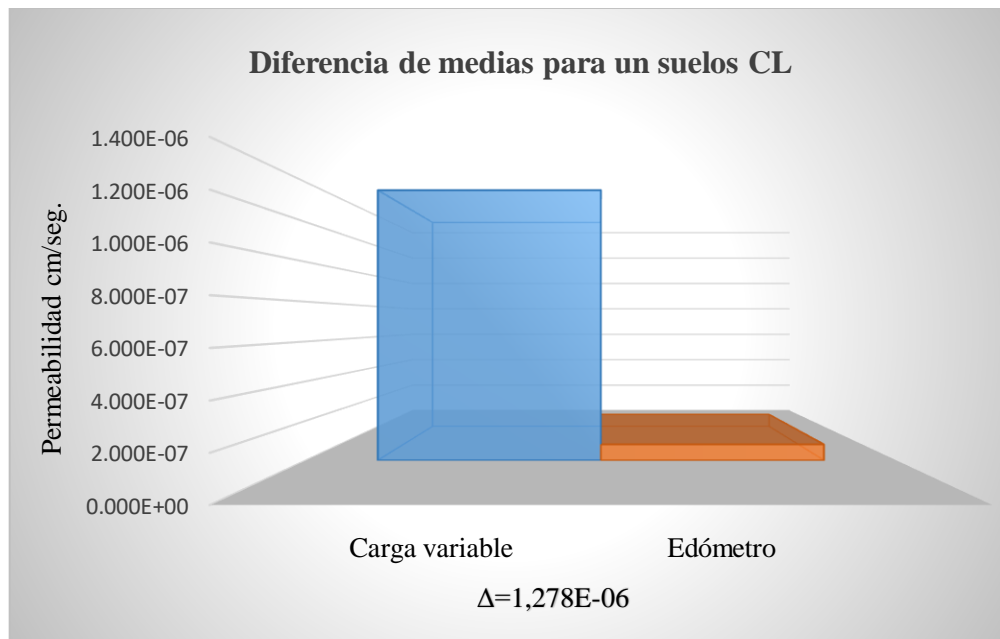
Hipótesis Alt.:  $\text{media1} <> \text{media2}$

$t = -14,093$  valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Tomando en cuenta que el p valor obtenido es igual a 0, siendo el mismo menor, que el nivel de significación, rechazamos la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 %; afirmando que existe diferencias estadísticamente significativas entre la media de los valores de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y la media de variable permeabilidad obtenida por el ensayo edométrico.

**Figura 62.** Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "CL"



Fuente: Elaboración propia.

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Mediana de muestra 1: 1,317E-06

Mediana de muestra 2: 8,050E-08

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana1 = mediana2

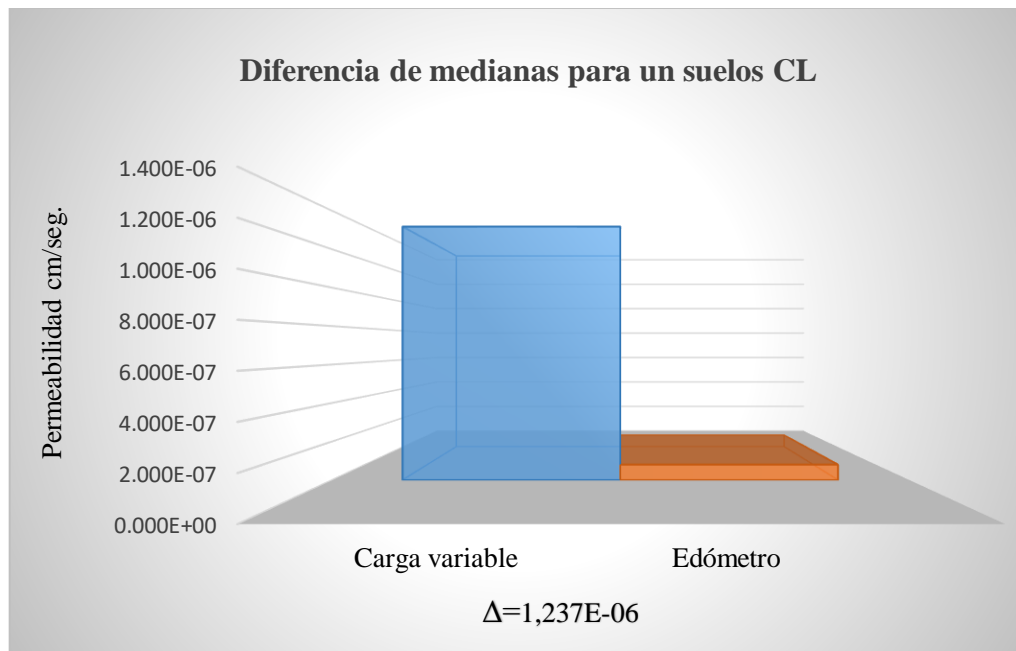
Hipótesis Alt.: mediana1  $\neq$  mediana2

W = 138,0 valor-P = 5,291E-4

No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Habiendo efectuado la prueba, concluimos que el valor-P es menor a 0,05; de ese modo afirmamos que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95 % de confianza.

**Figura 63.** Comparación de las medianas para las variables permeabilidad, obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "CL"



Fuente: Elaboración propia.

## Regresión

El nexo de relación entre la permeabilidad obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo de edométrico para un suelo CL, se efectuará a través de un análisis de regresión entre las variables analizadas a través de la deducción del método de mínimos cuadrados. De ese modo se presenta a continuación un resumen promedio de los ensayos para cada variable.

**Tabla 78.** Resumen promedio de los ensayos efectuados por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico "CL"

Constructor "CL"				
Identificación de la muestra	Carga variable		Edómetro	
	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación
Nº	"cm/seg"	"%"	"cm/seg"	"%"
3-A	1,273E-06	15	7,87E-08	3
3-B	1,245E-06		8,27E-08	
3-C	1,390E-06		7,94E-08	
3-D	1,273E-06		8,05E-08	
3-E	1,572E-06		8,46E-08	

Fuente: Elaboración propia

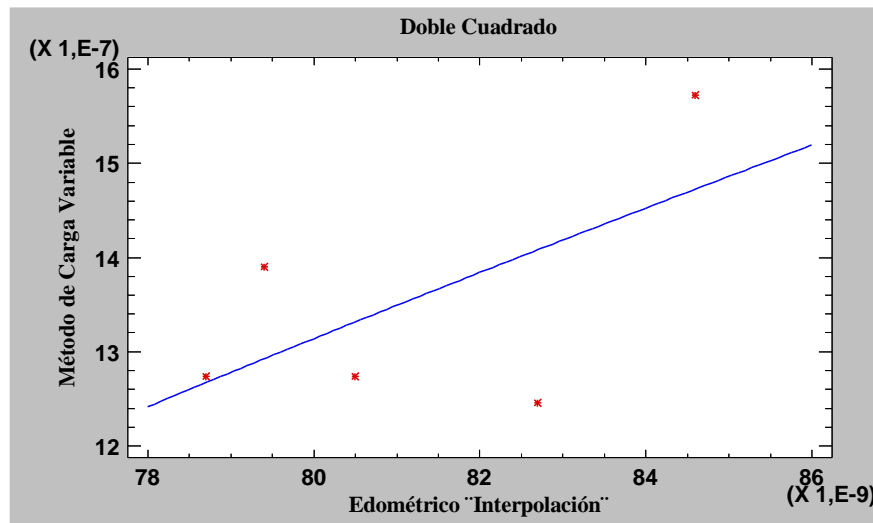
Se determinó el modelo doble cuadrado, como la función continua que mejor se aproximó a los datos analizados, proporcionando una demostración visual de los puntos como se observa en la Figura 64.

Se debe identificar la variable dependiente e independiente.

Variable dependiente Y= Método de carga variable

Variable independiente X= Método edométrico

**Figura 64.** Regresión entre el método de carga variable y el método edométrico, para un suelo CL



La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y = \sqrt{-2,012E - 12 + 583,994 * X^2}$$

Coefficiente de Correlación = 0,607

R-cuadrada = 36,840 por ciento

El coeficiente de determinación indica que el modelo ajustado explica 36,840 %; de la variabilidad en Método de Carga Variable.

El coeficiente de correlación es igual a 0,607, indicando una relación relativamente débil entre las variables

#### 4.4.4. Comparación del coeficiente de permeabilidad para el barrio San Blas

**Tabla 79.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el ensayo de carga variable para un suelo "ML"

Ensayos	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
1	0,436	1,823E-05
2	0,439	1,667E-05
3	0,430	1,627E-05
4	0,448	2,226E-05
5	0,426	2,181E-05

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 80.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el edómetro, para un suelo "ML"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
0	0,440	-	0,471	-	0,461	-	0,467	-	0,469	-
10	0,427	1,270E-07	0,457	1,940E-07	0,447	1,725E-07	0,453	1,692E-07	0,446	1,699E-07
20	0,411	2,138E-07	0,442	1,835E-07	0,429	2,050E-07	0,437	2,134E-07	0,414	2,224E-07
40	0,382	2,002E-07	0,414	1,698E-07	0,398	2,018E-07	0,408	2,035E-07	0,361	2,170E-07
80	0,333	2,068E-07	0,366	1,623E-07	0,346	1,993E-07	0,358	2,155E-07	0,262	2,244E-07
160	0,255	1,477E-07	0,260	1,660E-07	0,264	1,194E-07	0,248	1,760E-07	0,133	1,143E-07
320	0,146	6,028E-08	0,138	1,086E-07	0,149	7,702E-08	0,122	9,290E-08	0,005	4,492E-08

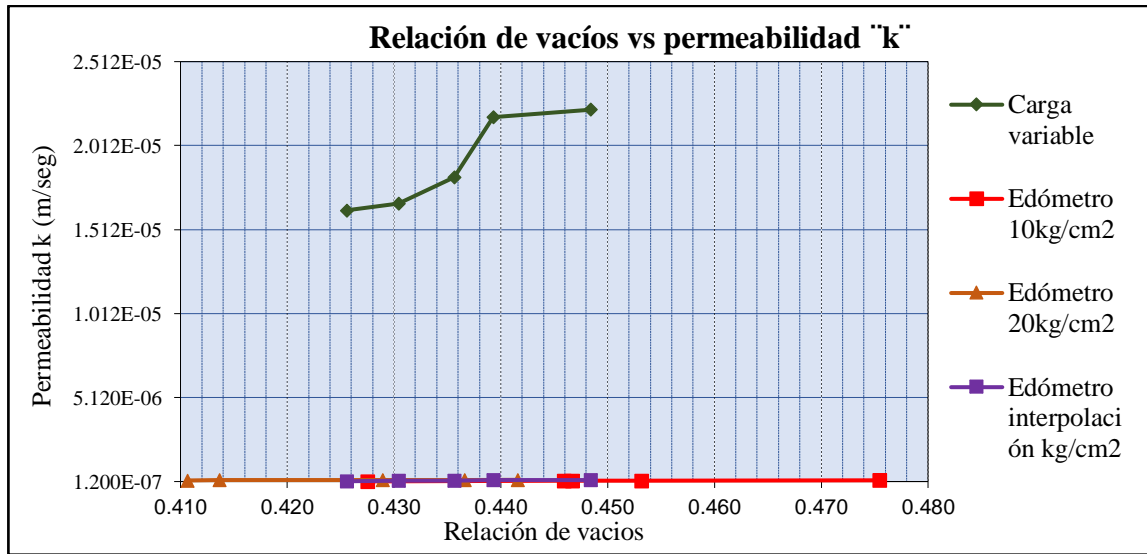
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 81.** Permeabilidad del edómetro obtenida a través del proceso de interpolación entre la relación de vacíos y permeabilidad, para un suelo "ML"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
10	0,427	1,270E-07	0,457	1,940E-07	0,447	1,725E-07	0,453	1,692E-07	0,446	1,699E-07
Interpolando	0,426	1,3703E-07	0,448	1,8802E-07	0,436	1,9272E-07	0,439	2,062E-07	0,430	1,699E-07
20	0,411	2,138E-07	0,442	1,835E-07	0,429	2,050E-07	0,437	2,134E-07	0,414	2,224E-07

Fuente: Elaboración propia

**Figura 65.** Relación de vacíos Vs permeabilidad "k", para un suelo "ML"



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 82.** Resumen estadístico de la comparación de variables permeabilidad para un suelo "ML"

Resumen Estadístico	Permeabilidad obtenida por el método de carga variable "ML"	Permeabilidad obtenida por el método edométrico "ML"
Recuento	25	5
Promedio	1,837E-5	1,788E-07
Mediana	1,785E-5	1,880E-07
Desviación estándar	2,316E-6	2,670E-08
Coefficiente de variación	23 %	15 %
Mínimo	2,255E-5	1,370E-08
Máximo	2,113E-5	2,060E-07
Rango	-4,987	6,900E-07
Sesgo estandarizado	9,377	-0,998
Curtosis estandarizada	1,837E-5	0,453

Fuente: Elaboración propia

Los estadígrafos de tendencia central, media y mediana, serán analizados, con el propósito de efectuar diferencia y semejanza entre las variables en análisis.

Prueba t de Student para la comparación de medias.

Media de la muestra 1: 1,784E-5

Media de la muestra 2: 1,788E-07

Hipótesis nula:  $media1 = media2$

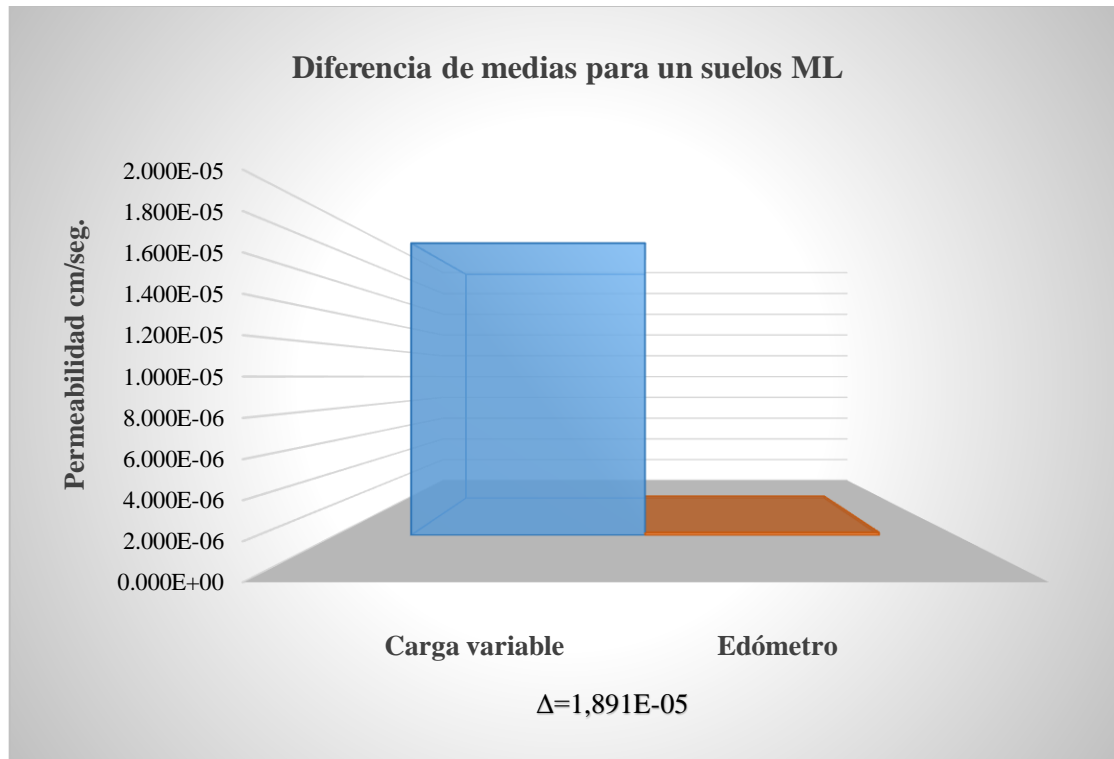
Hipótesis Alt.:  $media1 <> media2$

$t = 9,29515$  valor-P =  $3,37329E-10$

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Tomando en cuenta que el p valor obtenido es igual a 0, siendo el mismo menor que el nivel de significación, rechazamos la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 %; afirmando que existe diferencias estadísticamente significativas entre la media de los valores de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y la media de variable permeabilidad obtenida por el ensayo edométrico.

**Figura 66.** Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "ML"



Fuente: Elaboración propia.

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Mediana de muestra 1: 1,784E-5

Mediana de muestra 2: 1,880E-07

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula:  $\text{mediana1} = \text{mediana2}$

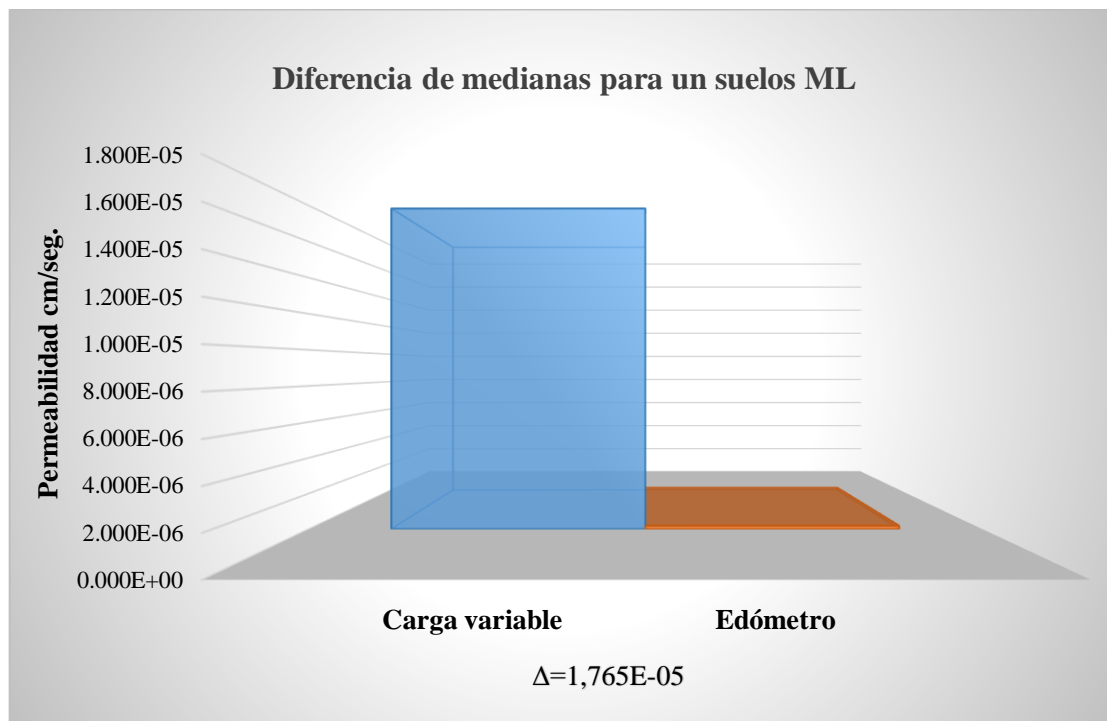
Hipótesis Alt.:  $\text{mediana1} <> \text{mediana2}$

$W = 0$  valor-P = 5,32E-4

No se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Habiendo efectuado la prueba, concluimos que el valor-P es menor a 0,05; de ese modo firmamos que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95 % de confianza.

**Figura 67.** Comparación de las medianas para las variables permeabilidad, obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "ML"



Fuente: Elaboración propia

## Regresión

El nexo de relación entre la permeabilidad obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo de edométrico para un suelo ML, se efectuará a través de un análisis de regresión entre las variables analizadas a través de la deducción del método de mínimos cuadrados. De ese modo se presenta a continuación un resumen promedio de los ensayos para cada variable.

**Tabla 83.** Resumen promedio de los ensayos efectuados por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "ML"

San Blas "ML"				
Identificación de la muestra	Carga variable		Edómetro	
	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación
Nº	"cm/seg"	"%"	"cm/seg"	"%"
4-A	1,823E-05	23	2,062E-07	15
4-B	1,667E-05		1,927E-07	
4-C	1,627E-05		1,880E-07	
4-D	2,226E-05		1,699E-07	
4-E	2,181E-05		1,370E-07	

Fuente: Elaboración propia

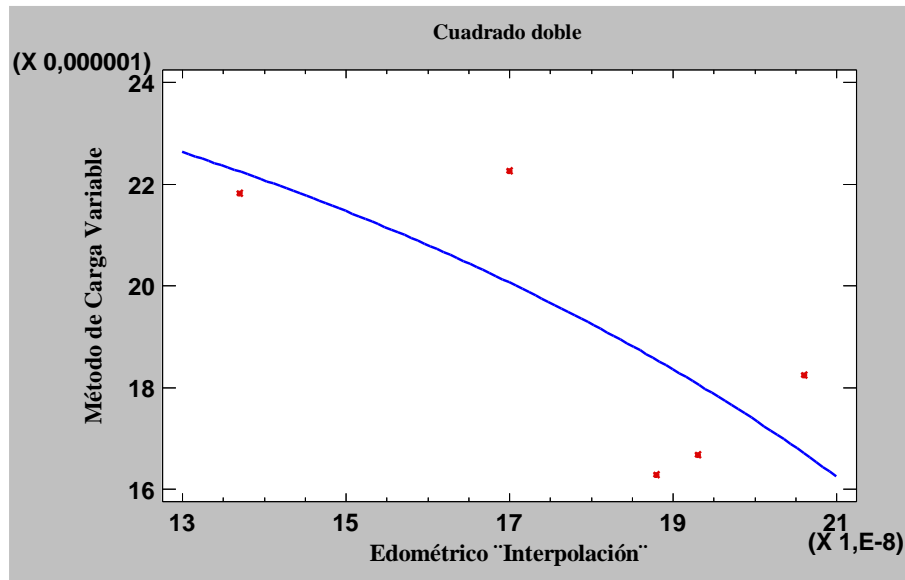
Se determinó el modelo doble cuadrado como la función continua que mejor se aproximó a los datos analizados, proporcionando una demostración visual de la demostración de los puntos como se observa en la Figura 68.

Se debe identificar la variable dependiente e independiente.

Variable dependiente Y= Método de carga variable.

Variable independiente X= Método edométrico.

**Figura 68.** Regresión entre el método de carga variable y el método edométrico, para un suelo "ML"



La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y = \sqrt{(2,681E - 10) + 5122,830 * X^2}$$

Coefficiente de Correlación = -0,757

R-cuadrada = 57,308 por ciento

El coeficiente de determinación indica que el modelo ajustado explica 57,308 %; de la variabilidad en método de carga variable.

El coeficiente de correlación es igual a -0,757, indicando un grado de asociación moderadamente fuerte entre las variables.

#### 4.4.5. Comparación del coeficiente de permeabilidad para el barrio San Jorge II

**Tabla 84.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el ensayo de carga variable para un suelo "MH"

Ensayos	Relación de Vacíos e	Permeabilidad cm/seg.
1	0,560	6,578E-08
2	0,547	6,538E-08
3	0,542	5,818E-08
4	0,551	6,377E-08
5	0,553	7,046E-08

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 85.** Relación de vacíos y permeabilidad obtenido por el edómetro, para un suelo "MH"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
0	0,565	-	0,569	-	0,567	-	0,566	-	0,551	-
10	0,552	8,182E-08	0,561	8,195E-08	0,557	8,162E-08	0,563	6,129E-08	0,542	8,369E-08
20	0,536	8,692E-08	0,551	8,318E-08	0,543	9,922E-08	0,552	9,668E-08	0,527	9,663E-08
40	0,508	8,074E-08	0,527	9,061E-08	0,517	9,251E-08	0,528	8,464E-08	0,500	7,267E-08
80	0,465	7,502E-08	0,491	6,429E-08	0,478	6,804E-08	0,493	7,763E-08	0,461	4,271E-08
160	0,405	4,381E-08	0,442	5,152E-08	0,422	5,462E-08	0,443	4,823E-08	0,389	4,366E-08
320	0,307	3,984E-08	0,352	4,475E-08	0,330	4,680E-08	0,353	4,025E-08	0,293	2,519E-08

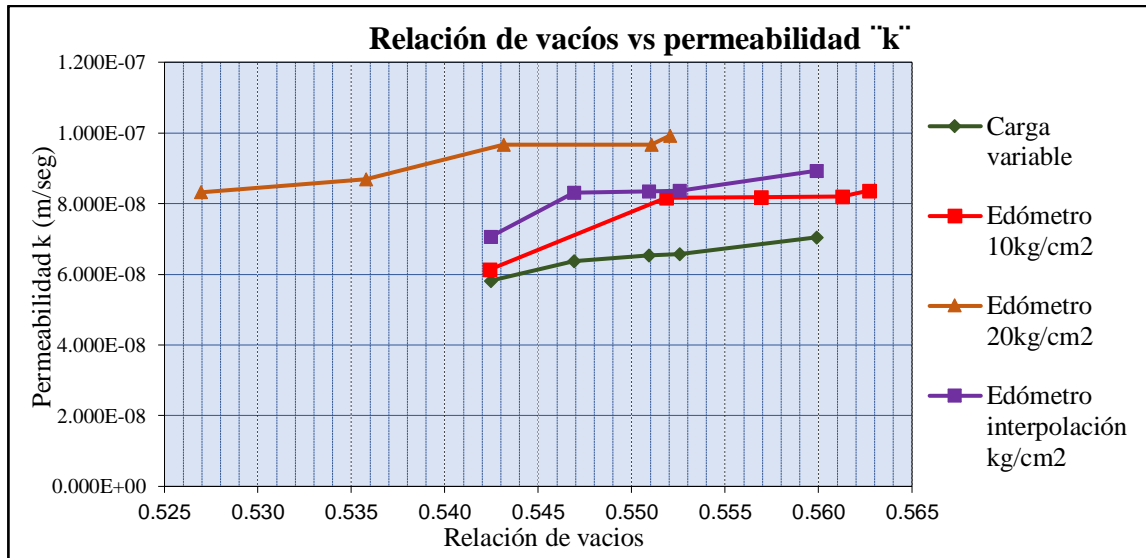
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 86.** Permeabilidad del edómetro obtenida a través del proceso de interpolación entre la relación de vacíos y permeabilidad, para un suelo "MH"

Carga Aplicada (kg/cm <sup>2</sup> )	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.	Relación de Vacíos	Permeabilidad cm/seg.
10	0,552	8,182E-08	0,561	8,195E-08	0,557	8,162E-08	0,563	6,129E-08	0,542	8,369E-08
Interpolando	0,547	8,3383E-08	0,553	8,3001E-08	0,551	8,9298E-08	0,560	7,0620E-08	0,542	8,369E-08
20	0,536	8,692E-08	0,551	8,318E-08	0,543	9,922E-08	0,552	9,668E-08	0,527	9,663E-08

Fuente: Elaboración propia

**Figura 69.** Relación de vacíos Vs permeabilidad "k", para un suelo "MH"



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 87.** Resumen estadístico de la comparación de variables permeabilidad para un suelo "MH"

Resumen estadístico	Permeabilidad obtenida por el método de carga variable "MH"	Permeabilidad obtenida por el método edométrico "MH"
Recuento	25	5
Promedio	6,472E-08	8,200E-08
Mediana	6,781E-08	8,340E-08
Desviación estándar	8,160E-09	6,876E-09
Coficiente de variación	13 %	8 %
Mínimo	4,890E-08	7,060E-08
Máximo	7,390E-08	8,930E-08
Rango	2,500E-08	1,870E-08
Sesgo estandarizado	-1,1251	-1,268
Curtosis estandarizada	-1,080	1,388

Fuente: Elaboración propia

Los estadígrafos de tendencia central, media y mediana, serán analizados, con el propósito de efectuar diferencia y semejanza entre las variables en análisis.



Prueba t de Student para la comparación de medias.

Media de la muestra 1: 6,781E-08

Media de la muestra 2: 8,200E-08

Hipótesis nula:  $media1 = media2$

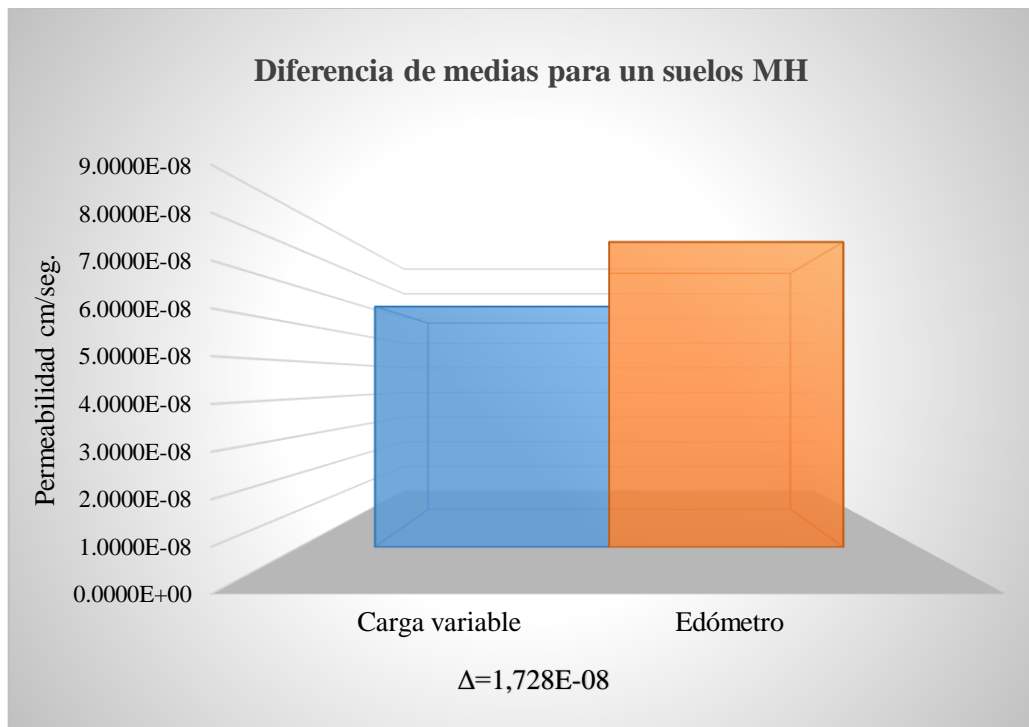
Hipótesis Alt.:  $media1 <> media2$

W = 9,0 valor-P = 3,184E-03

Se rechaza la hipótesis nula para  $\alpha = 0,05$ .

Tomando en cuenta que el p valor obtenido es igual a 3,184E-03, si el mismo es menor que el nivel de significación, rechazamos la hipótesis nula afirmado con un nivel de confianza del 95 %; que existe diferencia estadísticamente significativa entre la media de los valores de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y la media de variable permeabilidad obtenida por el ensayo edométrico.

**Figura 70.** Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "MH"



Fuente: Elaboración propia.

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Mediana de muestra 1: 6,781E-08

Mediana de muestra 2: 8,340E-08

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas

Hipótesis Nula: mediana1 = mediana2

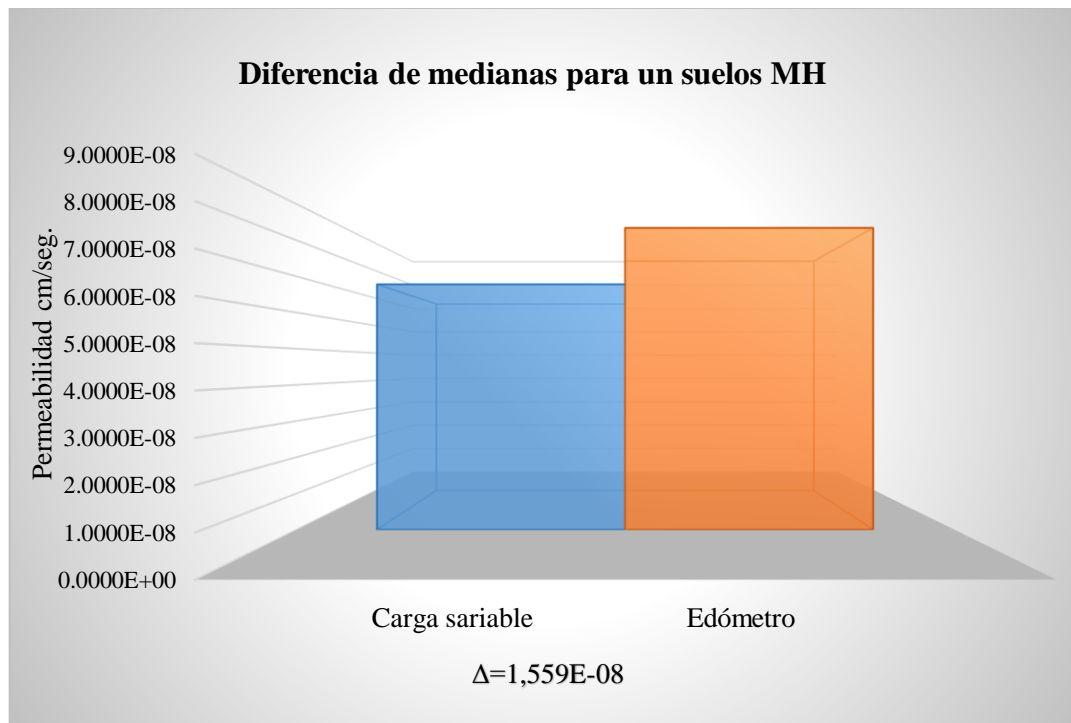
Hipótesis Alt.: mediana1  $\neq$  mediana2

W = 9,0 valor-P = 3,184E-03

No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Habiendo efectuado la prueba, concluimos que el valor-P es menor a 0,05; de ese modo afirmamos que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95 % de confianza.

**Figura 71.** Comparación de las medianas para las variables permeabilidad, obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "MH"



Fuente: Elaboración propia

## Regresión

El nexo de relación entre la permeabilidad obtenida por los métodos de carga variable y el ensayo de edométrico para un suelo MH, se efectuará a través de un análisis de regresión entre las variables analizadas a través de la deducción del método de mínimos cuadrados. De ese modo se presenta a continuación un resumen promedio de los ensayos para cada variable.

**Tabla 88.** Resumen promedio de los ensayos efectuados por los métodos de carga variable y el ensayo edométrico, para un suelo "MH"

San Jorge II "MH"				
Identificación de la muestra	Carga variable		Edómetro	
	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación	Permeabilidad promedio	Coefficiente de variación
Nº	"cm/seg"	"%"	"cm/seg".	"%"
5-A	6,5782E-08	13	8,930E-08	8
5-B	6,5384E-08		8,369E-08	
5-C	5,8177E-08		8,338E-08	
5-D	6,3770E-08		8,300E-08	
5-E	7,0464E-08		7,062E-08	

Fuente: Elaboración propia

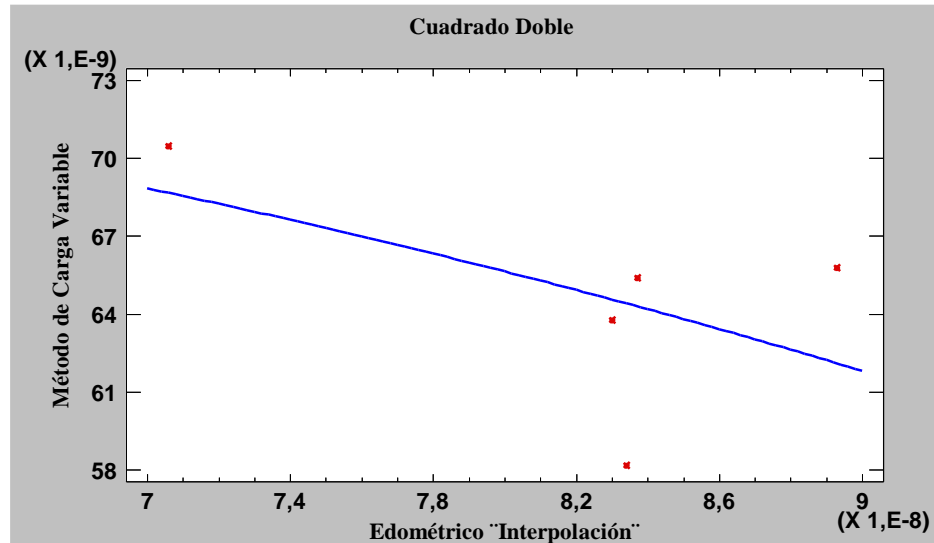
Se determinó el modelo doble cuadrado como la función continua que mejor se aproximó a los datos analizados, proporcionando una demostración visual de la demostración de los puntos como se observa en la Figura 72.

Se debe identificar la variable dependiente e independiente.

Variable dependiente Y= Método de carga variable.

Variable independiente X= Método edométrico.

**Figura 72.** Regresión entre el método de carga variable y el método edométrico, para un suelo "MH"



Fuente: Reporte del software estadístico Statgraphics

Se presenta la ecuación de obtenida al realizar un ajuste de modelo doble cuadrado para describir la relación entre método de carga variable y edométrico.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y = \sqrt{(-0,287 * x^2)}$$

Coefficiente de Correlación = -0,551

R-cuadrada = 30,335 por ciento

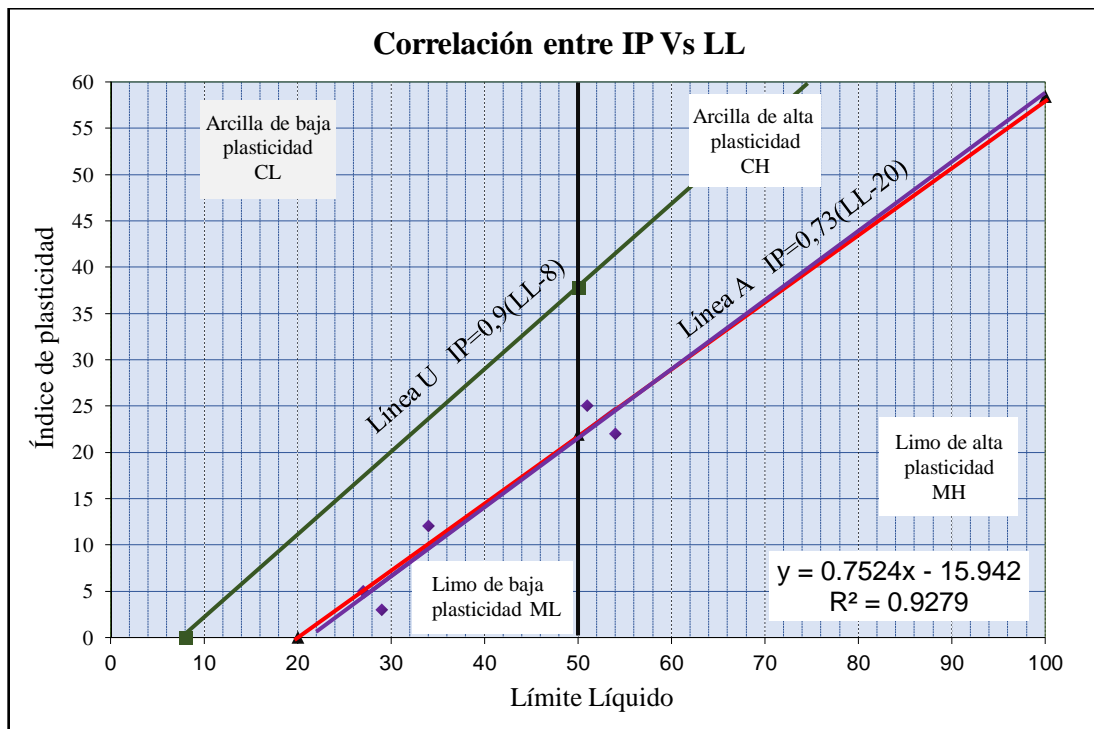
El coeficiente de determinación indica que el modelo ajustado explica 30,335 %; de la variabilidad en método de carga variable.

El coeficiente de correlación es igual a -0,551, indicando un grado de asociación moderadamente fuerte entre las variables.

#### 4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 73, se muestran los resultados de los ensayos de límites líquidos y plásticos de los suelos en analisis, de igual manera se presenta la relacion propuesta del comportamiento de los suelos en estudio.

**Figura 73.** Correlación entre el Índice de plasticidad y el Límite líquido para todos los suelos en analisis



Fuente: Elaboración propia

La relacion matemática del comportamiento del indice de plasticidad con respecto al límite líquido, viene dada por la siguiente expresion.

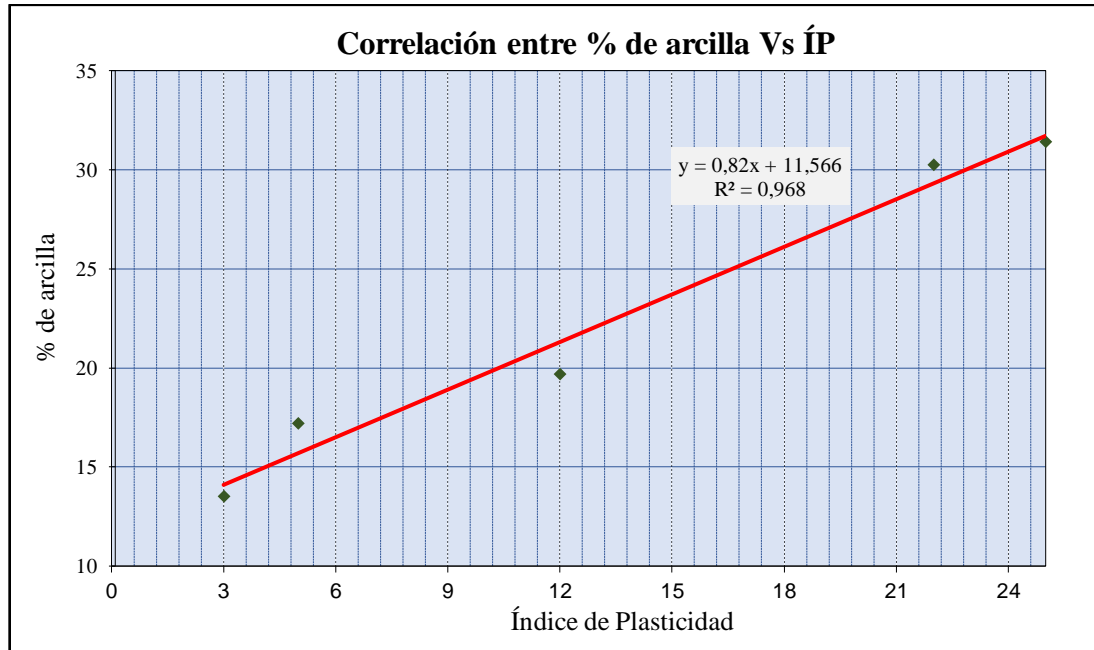
$$IP = 0,752(LL - 21,199)$$

$$R^2 = 0,928$$

Tomando en cuenta que el coeficiente de correlación es igual a 0,928, indicando un grado de asociación alto entre las variables.

De la misma forma, a continuación se presenta la correlación entre el % de arcilla y el límite líquido que presentaron los suelos estudiados.

**Figura 74.** Correlación entre el % de arcilla y el Límite líquido para todos los suelos en análisis



Fuente: Elaboración propia

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\% \text{ de arcilla} = 0,820(LL - 14,093)$$

$$R^2 = 0,968$$

Observado la figura 74, podemos establecer que el % de arcilla es inversamente proporcional al índice de plasticidad en los suelos finos; en ese sentido a medida que incrementa el índice de plasticidad, el porcentaje de arcilla tiende también a incrementar, debido a la propiedad plástica que presentan los suelos finos.

En la Tabla 89, se presenta un resumen de los resultados de las permeabilidades considerando los valores promedio de las variables analizadas.

**Tabla 89.** Resumen del coeficiente de permeabilidad promedio, para cada método, tomando en cuenta el tipo de suelo

<b>Barrio</b>	<b>Clasificación SUCS.</b>	<b>Permeabilidad método de carga variable</b>	<b>Permeabilidad consolidación unidimensional</b>	<b>Diferencia de permeabilidades</b>
Los Chapacos	CH	1,311E-07	8,131E-08	4,979E-08
Torrecillas	ML-CL	2,579E-06	2,244E-07	2,355E-06
El Constructor	CL	1,359E-06	8,118E-08	1,278E-06
San Blas	ML	1,837E-05	1,788E-07	1,819E-05
San Jorge II	MH	6,472E-08	8,2000E-08	1,728E-08

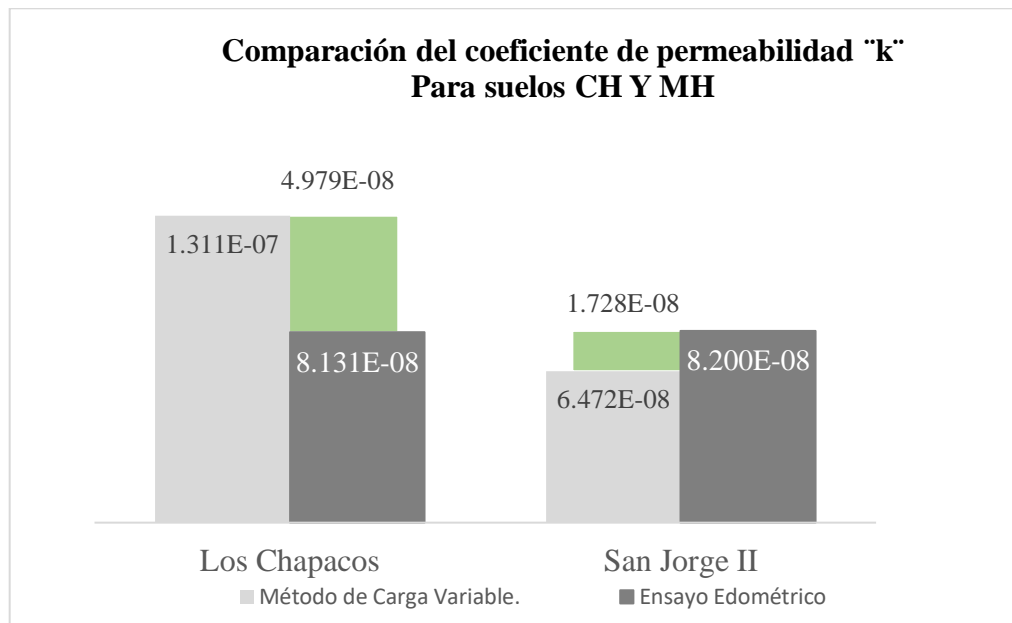
Fuente: Elaboración propia

Habiendo efectuado la comparación del coeficiente de permeabilidad obtenido por el método de carga variable y el ensayo edométrico, simulando las mismas condiciones, para los suelos los cinco tipos de suelos en estudio, se pudo constatar estadísticamente que existe una diferencia significativa entre los valores del coeficiente de permeabilidad, considerando las pruebas estadísticas t de Student y Mann Whitney.

En ese sentido, se rechaza la hipótesis de obtener valores confiables de permeabilidad a través del edómetro, a partir de la comparación de los coeficientes de permeabilidad obtenidos por los ensayos en estudio.

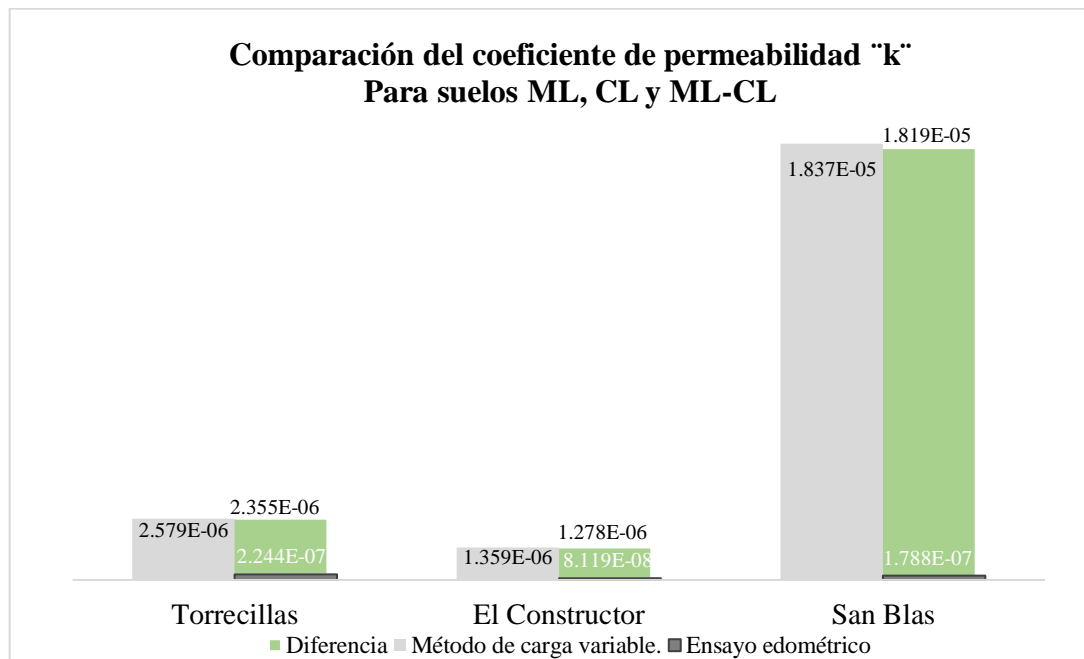
Analizando los resultados, se puede evidenciar que los valores de la permeabilidad obtenidos por el ensayo de carga variable son mayores en comparación con los obtenidos por el ensayo edométrico aun perteneciendo al mismo tipo de suelo; así mismo es importante resaltar que para los CH y MH, considerados altamente plásticos se tiene una diferencia aproximada entre permeabilidades del 20 %, del mismo modo para los suelos, ML-CL, ML, CL, denominados suelos finos de baja plasticidad, se tiene una diferencia aproximando del 90 %.

**Figura 75.** Resumen comparativo del coeficiente de permeabilidad para los suelos CH y MH



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 76.** Resumen comparativo del coeficiente de permeabilidad para los suelos CL, ML y ML-CL



Fuente: Elaboración propia.



En ese sentido se ve por conveniente determinar el vínculo entre variables, esto se efectuó a través de una regresión entre los valores de la permeabilidad obtenidos por el método de carga variable y el ensayo del edómetro.

En la Tabla 90, se presenta un resumen del análisis de regresión entre variables, en la cual se denota el tipo de suelo, el grado de correlación, y el modelo de regresión que tiene mejor ajuste a las variables analizadas.

**Tabla 90.** Grado de correlación entre variables.

<b>Barrio</b>	<b>SUCS</b>	<b>Modelo de regresión</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
Los Chapacos.	CH	Y-inversa, X-cuadrada	0,683
Torrecillas.	ML-CL	Y-inversa, X-cuadrada	0,349
El Constructor.	CL	Doble cuadrado	0,607
San Blas.	ML	Doble cuadrado	-0,757
San Jorge II.	MH	Doble cuadrado	-0,551

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 91.** Coeficiente de correlación

<b>Valor</b>	<b>Criterio</b>
$r = 1,00$	Correlación grande perfecta y positiva
$0,90 \leq r \leq 1,00$	Correlación muy alta
$0,70 \leq r \leq 0,90$	Correlación alta
$0,40 \leq r \leq 0,70$	Correlación moderada
$0,20 \leq r \leq 0,40$	Correlación muy baja
$r = 0,00$	Correlación nula
$r = -1,00$	Correlación grande perfecta y negativa

Fuente: Probabilidad y Estadística, Carrasco Covarrubias y Zúñiga Zeballos, 2007

Tomando como parámetros de referencia los valores del coeficiente de correlación propuestos por la literatura, podemos afirmar que los resultados obtenidos del análisis regresional entre variables, se encuentran dispersos con respecto a un modelo de ajuste, con lo cual concluimos reafirmando que existe correlaciones moderadas y muy bajas, entre variables.

Sin embargo, efectuando un análisis de los resultados, del contraste de variables, se puede establecer algunos factores que influyeron, al momento de determinar los coeficientes de permeabilidad por ambos métodos.

La principal causa que puede haber originado la diferencia entre los valores fue las condiciones individuales que tiene cada ensayo, y la influencia de material fino en ellos.

El permeámetro de carga descendente, a través del método de carga variable tiene la peculiar característica, de saturar la muestra a través de una carga hidráulica, ésta se ve afectada en los ensayos por el efecto de la migración de finos. Causando que los valores se vean influenciados por el tipo de montaje que se utilice para la realización del ensayo.

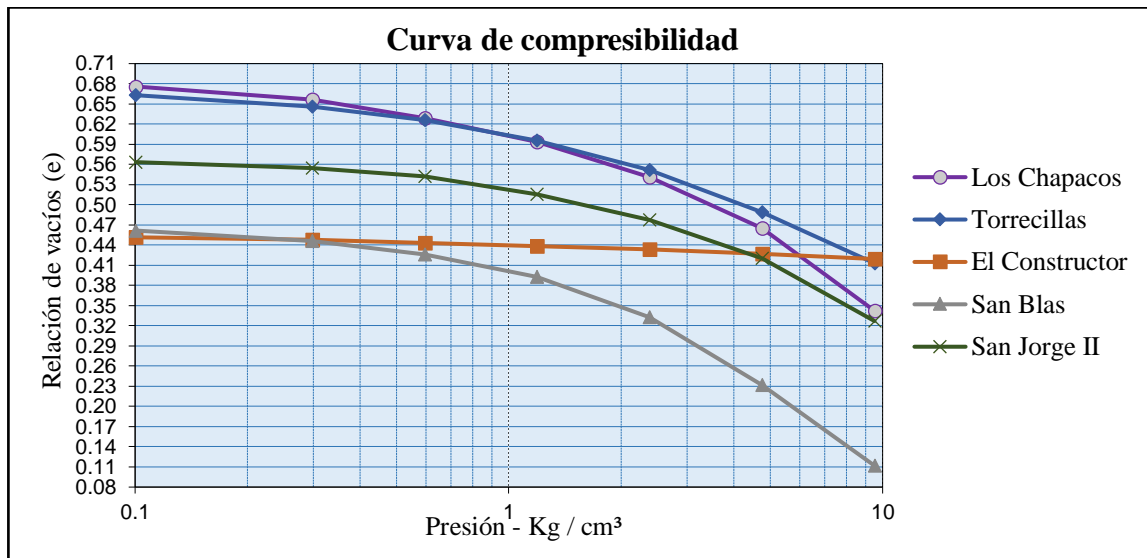
Una muestra de suelo inalterado se ve afectado por el cambio de su estructura y estratificación al momento de ser remoldeada, considerando la posibilidad de que queden espacios libres entre el suelo y la pared del permeámetro, tomando en cuenta la baja rugosidad de la celda del permeámetro, estos factores pueden provocar mayor fluidez del líquido, induciendo al aumento del coeficiente de permeabilidad ‘‘k’’.

Los suelos con un alto porcentaje de limo y arcilla tienden a retener el agua, teniendo como consecuencia la reducción de su permeabilidad, este comportamiento se pudo denotar al momento de efectuar el ensayo de carga variable de los suelos CH y MH proveniente del barrio Los Chapacos y San Jorge II.

Los suelos con menor porcentaje de arcilla y limo tienen menor permeabilidad, y estos pueden ser obtenidos por el ensayo de carga variable, con un menor tiempo, por la facilidad que tiene este al momento de saturar sus vacíos.

El ensayo edométrico, se caracteriza principalmente por reducir el aire atrapado en los poros o expulsar el agua contenida en los espacios vacíos de un suelo saturado por efecto de presión, en ese sentido se muestra en la Figura 77, la variación del índice de poros de las muestras en estudio, con respecto a las cargas que se aplicaron a cada una de las muestras durante el ensayo.

**Figura 77.** Variación del índice de vacíos con respecto a la presión aplicada en las muestras analizadas

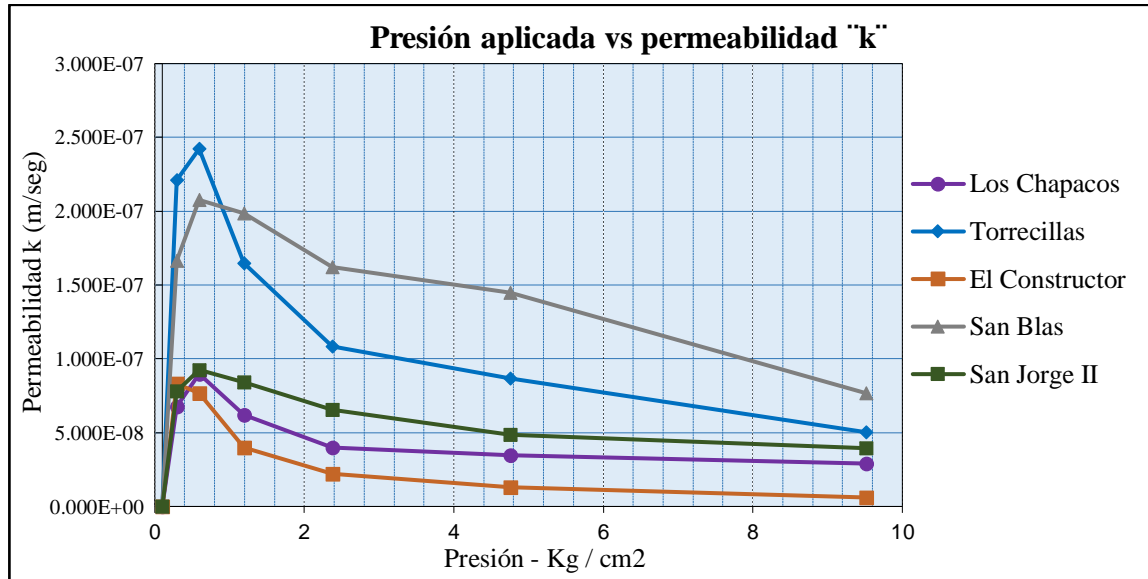


Fuente: Elaboración propia

Considerando la Figura 77, se puede establecer que, a mayor presión menor índice de poros, y por ende menor permeabilidad, esto sucede principalmente porque al aplicar una carga al suelo existe una variación en su volumen, ya que con la presión que se aplica se logra reducir el aire atrapado en los poros o expulsar el agua contenida en éstos.

De forma similar en la Figura 78, se presenta la variación del coeficiente de permeabilidad con respecto a la presión aplicada a cada una de las muestras.

**Figura 78.** Variación del coeficiente de permeabilidad con respecto a la presión aplicada en las muestras analizadas



Fuente: Elaboración propia

La Permeabilidad no varía significativamente en suelos de alta plasticidad, CH y MH. Sin embargo, para suelos granulares, esta variación es notable, debido a que al incrementar una carga ésta tiene una reducción de sus vacíos de forma inmediata, provocando valores de rango mayor en su coeficiente de permeabilidad.

El edómetro es un equipo muy sensible y preciso, este tiene la capacidad de determinar el cambio de volumen de una muestra con una sensibilidad del orden  $0,0001$  in, es por ello que este reporta valores del coeficiente de permeabilidad exclusivamente pequeños.

Se determinó experimentalmente, los coeficientes de permeabilidad, de los cinco tipos de suelos finos que nos proporciona las clasificaciones SUCS, obteniendo valores máximos y mínimos para cada tipo de suelo, y además estos entran dentro de los rangos establecidos por la bibliografía recomendada.

**Tabla 92.** Valores del coeficiente de permeabilidad de las muestras estudiadas

Tipo del suelo		Método de carga variable	Ensayo edométrico
Los Chapacos	CH	1,311E-07	8,131E-08
Torrecillas	ML-CL	2,579E-06	8,131E-08
El Constructor	CL	1,359E-06	8,118E-08
San Blas	ML	1,837E-05	1,788E-07
San Jorge II	MH	6,472E-08	8,200E-08

Fuente: Elaboracion propia.

**Tabla 93.** Valores típicos del coeficiente de permeabilidad.

		100	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Drenaje	Bueno						Pobre	Prácticamente impermeable				
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava				Arena muy fina, limos orgánicos e inorgánicos, Mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada.			Suelos "impermeables", es decir arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición.			
		Suelos "impermeables" modificados por la vegetación o por la descomposición										
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ", por ensayos de bombeo se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No requiere mayor experiencia.											
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtiene buenos resultados		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos se requiere mucha experiencia					Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.				
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Solo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.							Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos, se necesita mucha experiencia.				

Fuente: Mecánica de Suelos, Juárez y Rico S. F.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Habiendo efectuado el análisis comparativo de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y el ensayo de consolidación unidimensional, se ha definido las siguientes conclusiones:

- Las muestras han sido ensayadas y clasificadas como se expresa en el Capítulo III, de acuerdo al sistema Unificado de Clasificación (SUCS), se determinó cinco tipos de suelos finos, CH, MH, CL, ML, CL-ML, caracterizados básicamente por ser suelos finos inorgánicos de media y alta plasticidad, con ellos se garantiza la aplicabilidad de la teoría de consolidación.
- Se determinó el coeficiente de permeabilidad por el método de carga variable y el ensayo edométrico, este último por el método de Taylor. Tomando en cuenta las propiedades índices de los suelos, estos se dividieron en suelos finos inorgánicos de alta y baja plasticidad. Los suelos ML-CL, CL y ML, reportaron permeabilidades del orden  $10^{-5}$  y  $10^{-7}$ , considerando estos relativamente mayores en comparación con los suelos CH y MH, mismos que obtuvieron permeabilidades relativamente bajas con un orden de  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$ .
- Se efectuó, la comparación de la permeabilidad obtenida por el método de carga variable y el ensayo edométrico, a través de un análisis estadístico, por medio de la prueba t de Student y Mann Whitney, las cuales analizan las medidas de tendencia central media y mediana de las variables permeabilidad, donde se pudo evidenciar que no se garantiza la similitud de los resultados de los dos ensayos analizados.

- Considerando los ensayos efectuados experimentalmente, se puede establecer que la permeabilidad de los suelos varía de acuerdo a la naturaleza del mismo, su granulometría, su relación de vacíos, humedad volumétrica y temperatura ambiente.
- Los valores de la permeabilidad obtenidos por el ensayo de carga variable para los suelos ML-CL, ML, CL, son mayores en comparación con los obtenidos por el ensayo edométrico aun perteneciendo al mismo tipo de suelo, así mismo es importante resaltar que para los CH y MH, considerados altamente plásticos se tiene una diferencia aproximada entre permeabilidades del 20 %; del mismo modo para los suelos, ML-CL, ML, CL, denominados suelos finos de baja plasticidad, se tiene una diferencia aproximada del 90 % entre permeabilidades.



## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar la cámara del ensayo de compresión triaxial, para determinar el coeficiente de permeabilidad, en suelos casi impermeables, puesto que mediante este equipo podemos incrementar el gradiente hidráulico y con ello reducir el tiempo del ensayo.
- La extracción de la muestra siempre se debe realizar en sentido de la estratificación del suelo, es decir en sentido vertical; del mismo modo el tallado se lo debe efectuar de forma cuidadosa evitando movimientos bruscos que podría ocasionar la desintegración de la muestra inalterada principalmente en suelos con bajo contenido de humedad y no plásticos.
- Para reducir la migración de finos, al momento de realizar la prueba de carga variable se recomienda utilizar papel filtro en cada extremo de la muestra; así mismo es aconsejable usar gradientes hidráulicos pequeños, sobre todo en el proceso de saturación.
- Es importante purgar el sistema de aire, antes de efectuar la práctica de permeabilidad de carga variable, puesto que una burbuja de aire en las mangueras, pueden ocasionar grandes variaciones en las alturas de carga hidráulica.
- Para obtener lecturas precisas del deformímetro, se recomienda utilizar una cámara que pueda grabar el desplazamiento de las agujas micrométricas para tener un registro detallado, y sobre todo preciso de las lecturas de deformación, en el edómetro.
- Después de realizar los ensayos de carga variable y consolidación es importante lavar y limpiar bien el equipo, y sobre todo las piedras porosas, con el objetivo de cuidar los equipos y eliminar los restos de material fino que se incrustan en las piedras porosas.