

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Durante los últimos años se ha incrementado la construcción de presas en Bolivia para cubrir demandas de agua potable, riego, energía y regulación ambiental entre otras.

Por el factor económico y la disponibilidad de materiales, la mayoría de estas estructuras son construidas con materiales sueltos.

Según el Inventario Nacional de Presas que publicó el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego en el año 2010, el departamento de Tarija cuenta con 9 presas de las cuales 8 de ellas fueron construidas con materiales sueltos. Las presas de Peña Colorada, La Hondura y Trinchera presentan problemas de infiltración en su estructura, los cuales comprometen la estabilidad de la presa y la presa Chimeo en Caiwa la cual colapsó debido a un tubificación por el cuerpo de la estructura en el año 2018.

Es importante conocer la permeabilidad de las arcillas de nuestro medio, para poder determinar el comportamiento de esta propiedad bajo la acción del agua, lo cual llevara a buscar soluciones a estos problemas comunes como son las infiltraciones de agua a través del núcleo de la presa.

Una de las alternativas para poder conocer esta propiedad en laboratorio, es el permeámetro de compactación H – 4146, el cual permite determinar la permeabilidad en suelos arcillosos.

De ahí el interés de estudiar el comportamiento de la permeabilidad de los suelos arcillosos a densidades máximas de compactación.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el diseño y el material de construcción, las presas en Bolivia son mayormente de tierra con un porcentaje del 56 %.

Entre los principales problemas se reportan filtraciones, donde se puede identificar que los factores intervinientes son la mala elección de materiales y las diferencias de compactación, los cuales afectan la permeabilidad del núcleo de la presa de tierra.

Si no se realizan estudios sobre el comportamiento de los materiales que conforman el núcleo de las presas de tierra, estas filtraciones persistirán, lo cual compromete el buen funcionamiento de la estructura, que en casos de gran magnitud podría significar el fallo de la presa.

Los estudios de permeabilidad se deberán realizar en laboratorio, utilizando el permeámetro de compactación H – 4146, en el cual se variará el tipo de suelo, permitiendo definir el comportamiento de las arcillas ante la acción del agua a una determinada densidad máxima.

1.2.1. Problema

¿Cómo se puede determinar el grado de confiabilidad de los resultados de permeabilidad obtenidos con el permeámetro de compactación H-4146, aplicándolo en suelos arcillosos con una densidad máxima de compactación correspondiente a cada muestra de suelo?

1.2.2. Sistematización del problema

¿Cuál es la acción del agua frente a la permeabilidad de un suelo arcilloso?

¿Cómo varía la permeabilidad en relación a la densidad máxima correspondiente a cada muestra de suelo arcilloso?

1.2.3. Relevancia y factibilidad del problema

Relevancia: Poder seleccionar rápidamente un banco de arcilla para la construcción del cuerpo de la presa, bajo el criterio de la permeabilidad que tendrá el conglomerado arcilloso con una determinada densidad de compactación, y gracias al aporte de la investigación se podrá estimar este dato de manera ágil y práctica.

Factibilidad: No se puede ignorar el problema de la permeabilidad en suelos arcillosos presentes en los núcleos de las presas de materiales sueltos, bastante utilizadas en nuestro contexto y más aun contando con las herramientas necesarias tanto documentales como equipamiento para dar una solución a este problema.

1.2.4. Delimitación temporal y espacial del problema

Espacial: La ciudad de Tarija presenta una gran extensión superficial de este tipo de suelos, denominados arcillosos.

Temporal: El tiempo utilizado para realizar la investigación fue de 6 meses.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El permeámetro de compactación H-4146 es un equipo de laboratorio que permite determinar la permeabilidad en relación al tipo de suelo ensayado y la densidad de compactación.

Esta propiedad se refleja en una presa de tierra, debido a que el núcleo de la misma es construido por medio de capas en la cual se aplica energía de compactación por medio de rodillos con maquinaria pesada.

Para esto es necesario conocer la respuesta que tiene un suelo arcilloso compactado frente al flujo del agua a través de sus partículas, para lo cual la alternativa en laboratorio es utilizar el permeámetro de compactación H-4146.

Al determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos con el permeámetro de compactación H-4146 en suelos arcillosos de nuestro medio, estamos dando la certeza de que las permeabilidades tienen un grado de consistencia.

Esta consistencia favorece tanto al Laboratorista como al Ingeniero encargado del diseño o construcción de estructuras dependiente de la permeabilidad como es el caso de las presas de tierra en nuestra región, debido a que, con un solo ensayo de permeabilidad realizado, se podrá reflejar el comportamiento del suelo que representa un estrato.

Esto permitirá optimizar tiempo, ya que mediante un ensayo tendremos la certeza de que el resultado representa con cierta confiabilidad las permeabilidades de suelos arcillosos de la muestra analizada.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Analizar los resultados de ensayos de permeabilidad correspondientes a muestras de suelos arcillosos, mediante un análisis estadístico, para determinar el grado de confiabilidad de los valores de permeabilidad obtenidos en laboratorio con el permeámetro de compactación H – 4146.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las muestras de suelos arcillosos mediante ensayos de laboratorio.
- Determinar la permeabilidad de suelos arcillosos mediante el permeámetro de compactación H - 4146 en laboratorio.
- Realizar un estudio de análisis estadístico de los resultados de ensayos de permeabilidad.
- Relacionar la densidad máxima correspondiente a cada muestra ensayada con los resultados de permeabilidad.

1.5. HIPÓTESIS

Si, se realiza un análisis estadístico a los resultados de las pruebas en laboratorio de permeabilidad y densidades máximas de compactación correspondiente a cada muestra, entonces será posible establecer el grado de confiabilidad de las permeabilidades obtenidas con el permeámetro de compactación H-4146, a partir de un análisis de regresión y correlación entre estas dos propiedades.

1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

- Tipo de suelo arcilloso.
- Densidad máxima de compactación.

1.6.2. Variable dependiente

- Permeabilidad de suelos arcillosos medida con el permeámetro de compactación H - 4146.

1.6.3. Conceptualización y operacionalización de las variables

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

Variable independiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor – Acción Técnica
Tipo de Suelo	Se refiere a los tipos de materiales que componen el suelo y a sus características físicas y mecánicas	Suelos arcillosos de mediana compresibilidad CL	Granulometría Plasticidad	Clasificación SUCS
		Suelos arcillosos de alta compresibilidad CH	Granulometría Plasticidad	Clasificación SUCS
Densidad de Compactación.	La compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que incrementa las características de resistencia.	Suelos arcillosos	Densidad seca máxima Humedad óptima	Prueba Proctor

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. 2. Conceptualización y operacionalización de la variable dependiente.

Variable Dependiente	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor –Acción Técnica
Permeabilidad	Determinar el comportamiento de la permeabilidad de suelos arcillosos a determinadas densidades de compactación.	Permeabilidad en laboratorio	Prueba permeámetro de compactación H-4146	Tipo de suelo
			Prueba permeámetro de pared flexible	Densidad de compactación

Fuente: Elaboración propia

1.7.IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación realizada es del tipo correlacional.

Este tipo de investigación tiene como objetivo determinar la relación que existe entre dos o más conceptos o variables relacionadas con el objeto de investigación, es por ello que

se analizara el comportamiento de la permeabilidad en función al tipo de suelo y su densidad máxima de compactación correspondiente a cada muestra en laboratorio.

1.8. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Los datos obtenidos en laboratorio serán procesados mediante un análisis estadístico descriptivo e inferencial:

Medidas de posición central.

Medidas de dispersión.

Histogramas de frecuencias.

Coefficiente de confiabilidad alfa de Cronbach.

Coefficiente de confiabilidad de formas paralelas.

Prueba t de Student.

Prueba ANOVA de un factor.

Regresión y correlación.

1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se realizará en la ciudad de Tarija, para lo cual se utilizarán suelos arcillosos propios, donde se determinará la confiabilidad de los resultados de permeabilidad medidas con el permeámetro de compactación H-4146.

En el primer capítulo se desarrollará todo lo que se pretende hacer en la investigación como los objetivos que se tienen para la elaboración del proyecto, el objetivo final al cual se pretende llegar como también la justificación que se dará en la investigación para que tenga validez.

El segundo capítulo está enfocado en la información necesaria para la realización de la investigación, como conceptos necesarios para caracterizar los suelos arcillosos, pruebas de confiabilidad, estadística descriptiva para representar los resultados como también estadística inferencial para validar la hipótesis de investigación.

En el tercer capítulo se comenzará con la selección de muestras, caracterización de los suelos arcillosos mediante pruebas de laboratorio, determinación de la permeabilidad

utilizando el permeámetro de compactación H-4146 y permeámetro de pared flexible, como también porosidad, relación de vacíos y expansión.

Se realizará un análisis estadístico descriptivo con él se pretende representar las permeabilidades obtenidas mediante indicadores como ser media, desviación estándar entre otras.

En el cuarto capítulo se comenzará con la parte práctica, en el cual se realizará una comprobación de normalidad, se determinará la confiabilidad de los resultados de permeabilidad medidas con el permeámetro de compactación H-4146 aplicando los métodos de alfa de Cronbach y formas paralelas. Se realizarán pruebas para comprobar la variabilidad de medias de los resultados de permeabilidad como ser t de Student y ANOVA de un factor. Por último, se comprobará la hipótesis de la investigación mediante un análisis estadístico inferencial que pretende relacionar la permeabilidad con la densidad de compactación a través de una correlación.

En el quinto capítulo se realizará las conclusiones y recomendaciones que al terminar todo el proyecto de investigación se observaron, dichas conclusiones hablaran principalmente si el objetivo general como los objetivos específicos se cumplieron o en qué grado o porcentaje se cumplieron y las recomendaciones trataran sobre cómo mejorar y las acciones a tomar para lograr en mayor significancia la propuesta del proyecto.

CAPÍTULO II

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

2.1. SUELO

Es común la creencia de que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto de organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la dirección horizontal.

La palabra suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie.

El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo.

2.2. ARCILLAS

2.2.1. 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 aluminicas 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 aluminica, 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 aluminica 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 montmoriloniticas, especialmente en presencia de agua, presentaran fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonitico, 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 ($(\text{OH})_4 \cdot \text{K}_y(\text{Si}_{3-y}\text{Al}_y)(\text{Al}_4\text{Fe}_4\text{Mg}_4\text{Mg}_6)\text{O}_{20}$ 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.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ENSAYADOS

2.3.1. Densidad de los sólidos

El peso específico relativo se determina exactamente en el laboratorio. La Tabla 2.1 muestra la densidad de sólidos de algunos minerales comunes encontrados en suelos.

El peso específico relativo de la mayoría de las partículas minerales constituyentes de un suelo (G_s) varía entre límites estrechos (2,60 a 2,90).

Como ejemplo el peso específico del cuarzo es 2,67 y el del feldespato es 2,60 en suelos con abundante hierro se puede llegar a 3. En la turba se han llegado a medir valores 1,50, debido a la presencia de materia orgánica. Los minerales de arcilla que constituyen la fracción coloidal de un suelo, pueden tener un peso específico comprendido entre 2,80 y 2,90. Sin embargo, en algunas arcillas volcánicas, suelen encontrarse valores más bajos (entre 2,20 y 2,60). Así pues, es normal que en un suelo real los minerales de las fracciones muy finas y coloidales tengan peso específico relativo mayor que los minerales de 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.

Tabla 2. 1. Densidad de sólidos de materiales importantes

Mineral	Densidad de sólidos (Gs)
Cuarzo.	2,65
Caolinita.	2,60
Ilita.	2,80
Monmorilonita.	2,65 – 2,80
Haloisita.	2,00 – 2,55
Feldespatos de potasio.	2,57
Feldespatos de sodio y calcio.	2,62 – 2,76
Clorita.	2,60 – 2,90
Biotita.	2,80 – 3,20
Moscovita.	2,76 – 3,10
Hornablenda.	3,00 – 3,47
Limonita.	3,60 – 4,00

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

2.3.2. Análisis mecánico del suelo

El análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo expresado como un porcentaje del peso seco total, se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de partículas del suelo: análisis con cribado, para tamaños de partículas mayores de 0,075 mm de diámetro, y análisis hidrométrico, para tamaños de partículas menores de 0,075 mm de diámetro. Se describen a continuación los principios básicos de los análisis por cribado e hidrómetro.

2.3.2.1. Análisis por cribado

El análisis por cribado consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas. Los números de las mallas estándar con sus tamaños de abertura según ASTM se dan en la Tabla 2.2.

Primero el suelo se seca en horno, y luego todos los grumos se disgregan en partículas pequeñas antes de ser pasados por las mallas. Después de que el periodo de vibración concluye, se determina la masa del suelo retenido en cada malla. Cuando se analizan suelos cohesivos, resulta difícil disgregar grumos en partículas individuales. En tal caso, el suelo se mezcla con agua para formar una lechada que luego se lava a través de las mallas. Las porciones retenidas en cada malla se recolectan por separado y se secan en horno antes de que la masa retenida en cada malla sea determinada.

Los resultados del análisis por cribado se expresan generalmente como porcentajes del peso total del suelo que ha pasado por las diferentes mallas.

Tabla 2. 2. Tamaño de mallas estándar ASTM

Malla	Abertura (mm)
2 ½ ”	63,000
2”	50,000
1 ½”	37,500
1”	25,000
¾"	19,000
⅜”	9,500
N° 4	4,750
N° 10	2,000
N° 40	0,425
N° 200	0,075

Fuente: Análisis granulométrico por tamizado, ASTM D422

2.3.2.2. Análisis hidrométrico

El análisis hidrométrico se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, la cual:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \cdot \eta} \cdot D^2$$

Donde:

v = Velocidad.

ρ_s = Densidad de las partículas de suelo.

ρ_w = Densidad del agua.

η = Viscosidad del agua.

D = Diámetro de las partículas del suelo.

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot v}{\rho_s - \rho_w}} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{\rho_s - \rho_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

$$v = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{L}{t}$$

$$\rho_s = G_s \cdot \rho_w$$

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene:

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

Si las unidades de η son ($\text{g} \cdot \text{s} / \text{cm}^3$), ρ_w en (g / cm^3), L esta en (cm), t esta en (min) y D esta en (mm), entonces:

$$D = \sqrt{\frac{30 \cdot \eta}{(G_s - 1) \cdot \rho_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Si ρ_w es igual a $1 \text{ g} / \text{cm}^3$, tenemos:

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{L \text{ (cm)}}{t \text{ (min)}}}$$

El valor de K es una función del peso específico de los sólidos (G_s) y de la viscosidad del agua (η), que son dependiente de la temperatura de la prueba.

En el laboratorio, la prueba del hidrómetro se conduce en un cilindro de sedimentación con 50 g de muestra seca al horno. El cilindro de sedimentación tiene 457 mm de altura y 63,50 mm de diámetro; el cilindro está marcado para un volumen de 1000 ml. Como agente dispersor se usa generalmente el hexametáfosfato. El volumen de la suspensión de suelo dispersado se lleva hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada.

Cuando un tipo de hidrómetro ASTM 152H se coloca en la suspensión del suelo, en un tiempo (t), medido desde el principio de la sedimentación, mide la densidad en la vecindad de su bulbo a una profundidad (L). La densidad de sólidos es una función de la cantidad de partículas de suelo presentes por volumen unitario de suspensión en esa profundidad.

En un tiempo (t), las partículas de suelo en suspensión a una profundidad (L), tendrán un diámetro menor que (D), las partículas más grandes se habrán asentado más allá de la zona de medición. Los hidrómetros son diseñados para dar la cantidad de suelo, en gramos, aun en suspensión. Los hidrómetros son calibrados para los suelos que tienen una densidad de sólidos (G_s) de 2,65, para suelos de otra densidad de sólidos, es necesario hacer correcciones.

Conocida la cantidad de peso en suspensión, (L) y (t), podemos calcular el porcentaje de suelo por peso más fino que un cierto diámetro. Note que (L) es la profundidad medida desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad del bulbo del hidrómetro donde se mide la densidad de la suspensión.

2.3.3. Plasticidad

En mecánica de suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Los experimentos realizados por Atterberg, Terzaghi y Goldschmidt han revelado que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos, que actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua; en los suelos plásticos, el espesor de estas capas de agua sólida y viscosa influidas es grande, y su efecto en la interacción de las partículas de suelo determina su plasticidad.

2.3.3.1. Estados de consistencia, límites de plasticidad

Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente en las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg:

Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.

Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.

Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.

Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto al secado.

Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada por Atterberg límite líquido, nombre que hoy se conserva.

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada por Atterberg límite plástico.

Atterberg consideraba que la plasticidad del suelo quedaba determinada por el límite líquido y por la cantidad máxima de una cierta arena, que podía ser agregada al suelo, estando este con el contenido de agua correspondiente al límite líquido, sin que perdiera por completo su plasticidad. Además, encontró que la diferencia entre los valores de los límites de plasticidad, llamada índice plástico, se relacionaba fácilmente con la cantidad de arena añadida, siendo de más fácil determinación, por lo que sugirió su uso, en lugar de la arena, como segundo parámetro para definir la plasticidad.

$$I_p = LL - LP$$

Donde:

I_p = Índice de plasticidad (%).

LL= Límite líquido (%).

LP= Límite plástico (%).

2.3.3.2. Determinación del límite líquido

El ensayo se basa en el uso de la copa de Casagrande, que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solidario del mismo material; el tacón y la copa giran en torno a un eje fijo unido a la base. Una excéntrica hace que la copa caiga periódicamente, golpeándose contra la base del dispositivo, que es un hule duro. La altura de caída de la copa es, por especificación de 1 cm, medido verticalmente desde el punto de la copa que toca la base al caer, hasta la misma base, estando la copa en su punto más alto. Es importante que este ajuste se haga con todo cuidado, usando un prisma metálico de 1 cm de lado, para hacer

la calibración; este prisma se introduce entre la base y copa, cuidando que su arista superior quede en contacto con el punto de la copa que golpee la base.

La copa es esférica, con radio interior de 54 mm, espesor 2 mm y peso 200 ± 20 g incluyendo el tacón.

Sobre la copa se coloca el suelo y se procede a hacerle una ranura trapecial.

La copa se sostiene con la mano izquierda, con el tacón hacia arriba y el ranurador se pasa a través de la muestra, manteniéndolo normal a la superficie, a lo largo del meridiano que pasa por el centro del tacón, con su movimiento de arriba hacia abajo.

En poco tiempo se adquiere la soltura necesaria para hacer una ranura apropiada, con una pasada suave del ranurador, en una arcilla bien mezclada, sin partículas gruesas.

A partir de extensas investigaciones sobre los resultados obtenidos por Atterberg, se estableció que el límite líquido obtenido por medio de la copa de Casagrande corresponde al de Atterberg, si se define como el contenido de agua del suelo para que la ranura se cierre a lo largo de 1,27 cm, con 25 golpes en la copa.

De hecho, el límite líquido se determina conociendo 3 o 4 contenidos de agua diferentes en su vecindad, con los correspondientes números de golpes y trazando la curva Contenido de agua-Número de golpes.

La ordenada de esa curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua correspondiente al límite líquido.

Para construir la curva de fluidez sin salirse del intervalo en que puede considerarse recta, Casagrande recomienda registrar valores entre 6 y los 35 golpes, determinando 6 puntos, tres entre 6 y 15 golpes y tres entre 23 y 32 golpes.

2.3.3.3. Determinación del límite plástico

La prueba para la determinación del límite plástico, tal como Atterberg la definió, no especifica el diámetro a que debe llegarse al formar el cilindro del suelo requerido. Terzaghi agregó la condición de que el diámetro sea de 3 mm. La formación de rollitos se hace usualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, para acelerar la pérdida de humedad del material; también es frecuente efectuar el rolado sobre una placa de vidrio.

Cuando los rollitos llegan a 3 mm, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse, hasta que en los 3 mm justos ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en tal momento se determinara rápidamente su contenido de agua, que es el límite plástico.

2.3.4. Compactación de suelos

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de la ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación disminuye también los asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes.

2.3.4.1. Principios generales

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como un agente ablandador de las partículas de suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua. Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual. Más allá de un cierto contenido de agua (w), cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupado por las partículas sólidas.

El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo.

La prueba de laboratorio usada generalmente para obtener el peso específico seco máximo de compactación y el contenido de agua óptimo es la prueba Proctor de compactación (Proctor, 1933).

2.3.4.2. Prueba Proctor modificada

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación de campo, la prueba Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo.

A esta se le llama prueba Proctor modificada (Prueba D1557 de la ASTM y Prueba T180 de la AASHTO).

Para llevar a cabo la prueba Proctor modificada se usa el molde de diámetro igual a 152,40 mm que corresponde a un volumen de 2124 cm³.

El suelo es compactado en 5 capas por un pisón que pesa 44,50 N. La caída del martillo es de 457,20 mm. El número de golpes de martillo por capa es de 56.

La energía de compactación por volumen unitario de suelo es de 2696 KN·m/m³.

2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

2.4.1. Introducción

La clasificación de suelos es una categorización del suelo basado en características distintivas y en criterios de uso. Una clasificación de suelos es muy dinámica, en sí misma, de la estructura, del sistema, las definiciones de clases, y finalmente en la aplicación en el campo.

Los criterios clasificatorios similares de grupo hacen que las interpretaciones no varíen ampliamente. La aplicación exitosa en el campo de un desafío, ya que hay naturaleza compleja en la formación de los suelos.

El propósito de cualquier clasificación es ser capaz de organizar el conocimiento de tal modo de que las propiedades de los suelos pueden ser recordados y sus relaciones entendidas más fácilmente para un objetivo específico. El proceso de formación de clases por agrupamiento de suelos se hace sobre la base de sus propiedades comunes. La mayoría de las clasificaciones de suelos que se utilizan son muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para poderlo asignar a un determinado grupo.

Las propiedades ingenieriles básicas se suelen emplear para las distintas clasificaciones, son: la distribución granulométrica, los límites de Atterberg, el contenido de materia orgánica.

2.4.2. Objetivo

Clasificar los suelos en grupos de comportamientos semejantes, con propiedades similares.

2.4.3. Materiales

Granulometría del suelo.

Plasticidad del suelo.

Tabla de clasificación de SUCS.

Carta de plasticidad.

2.4.4. Fundamentación

Para dar a conocer las propiedades de un suelo determinado, y adoptando los principios de la mecánica del suelo, se vio la necesidad de concretar una clasificación científica, basada en la granulometría y en la plasticidad.

Los dos sistemas principales de clasificación científica de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS o SUCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras y el segundo es de uso general en cualquier estudio geotécnico.

2.4.4.1. Sistema de clasificación SUCS. (Unified Soil Classification System)

El sistema unificado de clasificación de suelos fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos. El sistema SUCS clasifica los suelos en base a su granulometría, los límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica. A continuación, se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados.

Tabla 2. 3. Simbología SUCS

Símbolo	Descripción
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: Guía de ensayos de laboratorio de suelos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Grupos GW y SW

Se tratan de suelos bien graduados, que contienen poco o casi nada de finos, tienen una alta capacidad del drenaje de aguas.

Grupos GP y SP

Son suelos que se encuentran mal graduados, vale hacer notar que la clasificación unificada, considera que un suelo presente uniformidad en sus granos, es mal graduado.

Grupos GM y SM

Considerados suelos con presencia relevante de limo inorgánico o arena fina. Contienen plasticidad baja a media.

Grupos GC y SC

Suelos que contienen arcillas que se consideran de media a alta plasticidad.

Tabla 2. 4. Simbología SUCS

Símbolo	Descripción
M	Limo inorgánico o arena muy fino
C	Arcilla
O	Limos, arcillas y mezclas con alto contenido de material orgánico
L	Baja a mediana compresibilidad. (LL<50%)
H	Alta compresibilidad. (LL>50%)

Fuente: Guía de ensayos de laboratorio de suelos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Grupos CL y CH

Indican los suelos arcillas inorgánicas de baja compresibilidad ($LL < 50\%$; $I_p > 7\%$) y las arcillas inorgánicas de alta compresibilidad ($LL > 50\%$).

Grupos ML y MH

Son limos inorgánicos de baja y alta compresibilidad, esta calificación incluye a las arcillas inorgánicas.

Grupo OL y OH

Se trata de arcillas con alto porcentaje de material orgánico, haciendo que el límite líquido crezca.

Tabla 2. 5. Caso frontera para gravas

GW-GM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GC

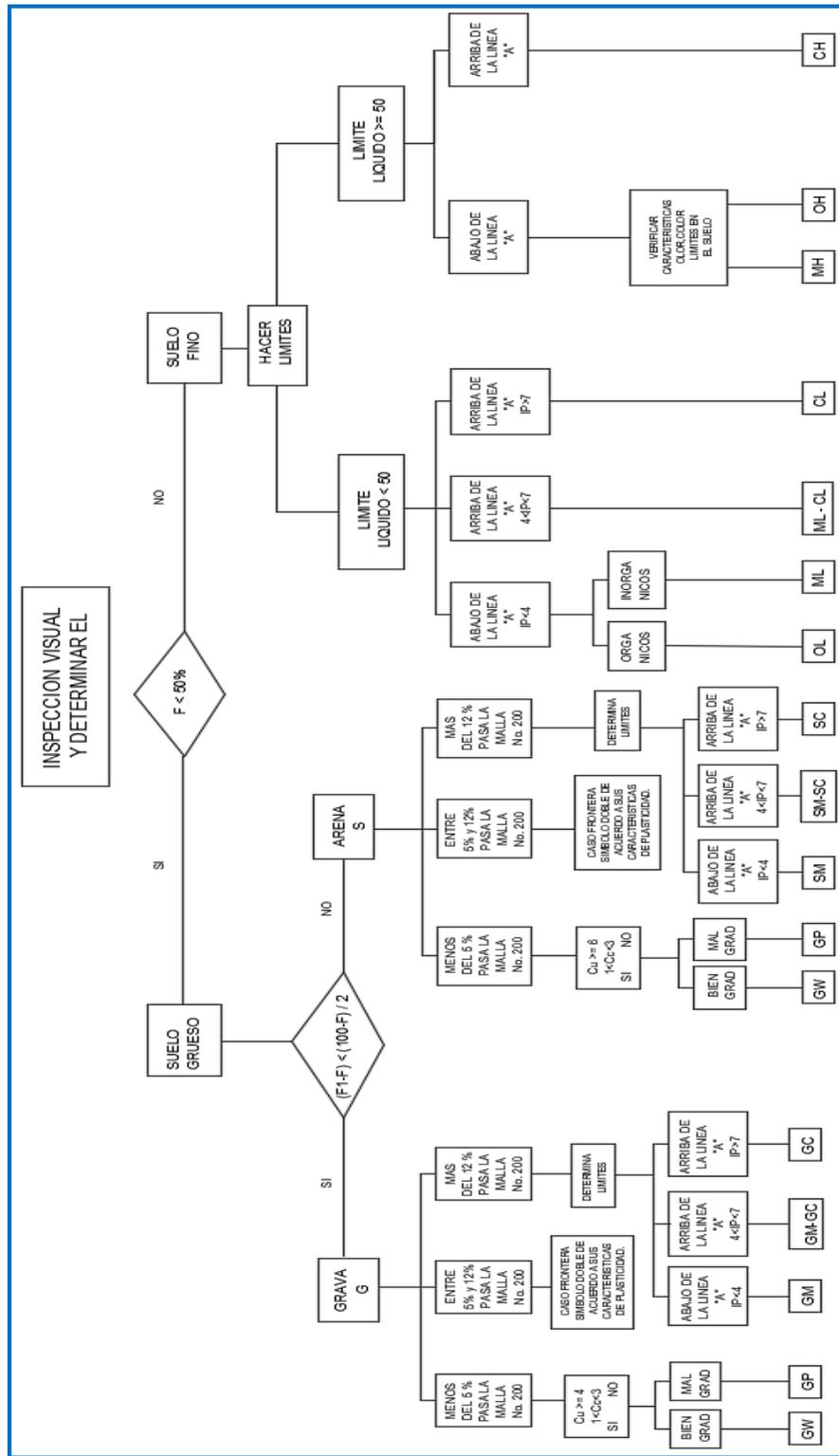
Fuente: Guía de ensayos de laboratorio de suelos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Tabla 2. 6. Caso frontera para arenas

SW-SM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SM
SW-SC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SC
SP-SM	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SM
SP-SC	El porcentaje que pasa la malla N° 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SC

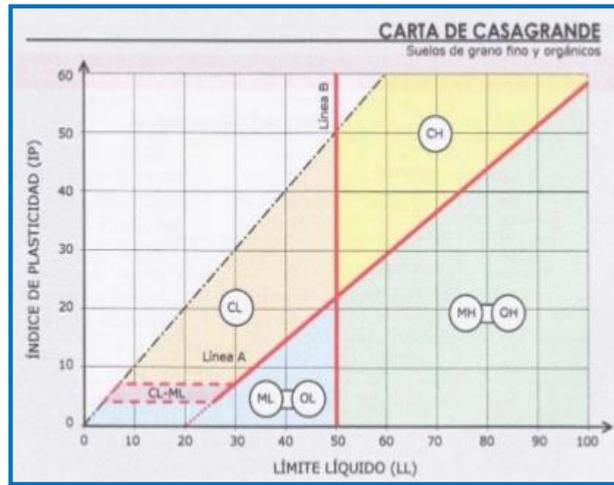
Fuente: Guía de ensayos de laboratorio de suelos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Tabla 2. 7. Tabla de clasificación SUCS



Fuente: Guía de ensayos de laboratorio de suelos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Imagen 2. 1. Carta de plasticidad SUCS



Fuente: Guía de ensayos de laboratorio de suelos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

2.4.5. Metodología

2.4.5.1. Sistema SUCS

Al igual que la anterior clasificación se debe contar con datos de la granulometría y de plasticidad.

En la tabla del sistema unificado se debe ir verificando que cumpla cada condición requerida.

Primero se verifica si es granular o fino.

Luego se debe seguir el flujo grama según corresponda cada decisión para el tipo de suelo.

2.5. PERMEABILIDAD

2.5.1. Introducción

El movimiento del agua del suelo depende de los flujos del agua, y este a su vez depende de un balance energético llamado gradiente hidráulico. La permeabilidad representa la resistencia que ofrece el suelo al flujo de un fluido. El parámetro que determina esta propiedad es el coeficiente de permeabilidad (k) y se basa en la aplicación de la ley de Darcy.

Hay varios métodos que se utilizan para la obtención del coeficiente de permeabilidad del suelo, en este trabajo se ordenan de la siguiente forma:

Métodos de laboratorio.

Permeámetro de pared flexible de carga variable.

Permeámetro de compactación H-4146 de carga variable.

2.5.2. Flujos laminar y turbulento

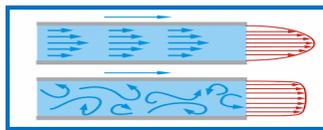
Los problemas relativos al flujo de líquidos en general, pueden dividirse en dos grupos principales: los que se refieren al flujo laminar y aquellos que tratan con flujo turbulento. Un flujo se define como laminar cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí en toda su longitud, excepción 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 Imagen 2.2, 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.

Se sabe que a velocidades bajas un flujo ocurre en forma laminar, mientras que al aumentar aquellas se llega a un límite en que se transforma en turbulento; si en ese punto la velocidad se reduce, el flujo volverá a ser laminar, pero la nueva transición ocurre, generalmente, a una menor velocidad que la primera. Esto indica la existencia de un intervalo de velocidades en el cual el flujo puede ser laminar o turbulento.

Imagen 2. 2. Demostración flujo laminar y turbulento



Fuente: Mecánica de fluidos, Mott Robert L

Reynolds probó que existe una cierta velocidad en cada líquido debajo de la cual, para un cierto diámetro de conducción y una temperatura dada, el flujo siempre es laminar. Esta velocidad se define como la crítica. Similarmente, existe una velocidad mayor arriba de la cual el flujo siempre es turbulento: en el caso del agua esta segunda velocidad es, aproximadamente, igual a 6,5 veces la velocidad crítica.

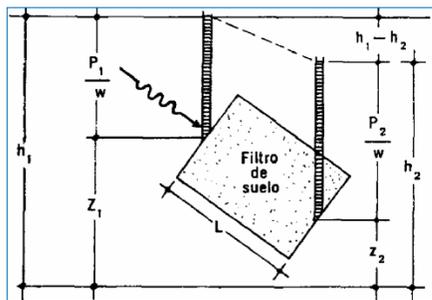
La velocidad media en un conducto en régimen laminar o turbulento es función de la pérdida de carga hidráulica por unidad de longitud (gradiente hidráulico i).

En el flujo turbulento la velocidad es aproximadamente proporcional a \sqrt{i} y más exactamente a $i^{\frac{4}{7}}$.

En el flujo laminar resulta ser proporcional a i , simplemente.

2.5.3. Flujo del agua en el suelo y ecuación de energía de Bernoulli

Imagen 2. 3. Esquema del dispositivo experimental de Darcy



Fuente: Badillo J. y Rodríguez R., Fundamentos de la Mecánica de Suelos

Es posible aplicar la ecuación de Bernoulli en el análisis de flujo del agua a través de una masa de suelo. La Imagen 2.3 ilustra la aplicación de la ecuación de Bernoulli para las condiciones de flujo en dos puntos en una masa de suelos y separados por una longitud (L). Como es común en la mecánica de fluidos, la energía, tanto potencial como cinética, se expresa en términos de alturas o cargas, referidas una línea arbitraria de referencia ubicada convenientemente. De acuerdo al principio de Bernoulli la energía o carga total h_t , en cualquier punto del sistema estará dado por:

$$h_t = Z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

Z = Carga de altura, que es la distancia a un plano de comparación o referencia.

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

$\frac{v^2}{2g}$ = Carga de velocidad, que es la energía debida al movimiento del agua del sistema (energía cinética).

La magnitud absoluta de estas cargas y la posición relativa con respecto al plano de referencia tienen, por si mismos, poca importancia. Es de mayor relevancia la diferencia o pérdidas entre las cargas totales (Δh) entre dos puntos cualesquiera, ya que esta diferencia es la que produce el flujo entre ambos puntos.

$$h_t = Z + \frac{p}{\gamma_w}$$

Aplicando el principio de Bernoulli en el flujo a través de suelos, podemos llegar a las siguientes observaciones:

La magnitud de la carga de altura depende de la posición del plano de referencia.

La magnitud de la carga de presión puede considerarse como la presión real del agua. Es la altura a la que asciende el agua en el piezómetro por encima del punto considerado.

La magnitud de la carga de velocidad $\frac{v^2}{2g}$ es tan pequeña que puede depreciarse.

Debido al punto anterior, la carga total (h_t) será solo la suma de cargas de altura y de presión.

La dirección del flujo está determinada por la diferencia de las cargas totales (Δh).

Cuando la carga de presión (p) a la entrada y a la salida es la atmosférica, la pérdida de carga total (Δh) será simplemente el cambio de elevación de la superficie libre del agua entre ambos puntos.

Toda la pérdida de carga se produce en el suelo a través de una longitud (L), considerando que el suelo es uniforme e isótropo.

El gradiente hidráulico (i) representa la pendiente de la línea de energía definida por las alturas piezométricas entre dos puntos en el flujo, es decir, la pérdida de carga o la pérdida de energía por unidad de longitud.

Si no existe gradiente hidráulico, es decir $i = 0$, no se presenta flujo.

La pérdida de carga entre los puntos 1 y 2, se da por:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma_w} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma_w} \right)$$

La pérdida de carga Δh se expresa en forma adimensional como:

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

Donde:

i = Gradiente hidráulico.

L = Distancia entre los puntos 1 y 2; es decir, la longitud de flujo en la que ocurre la pérdida de carga.

2.5.4. Ley de Darcy

El flujo unidireccional de un fluido como el agua en un suelo saturado puede ser expresado usando la ley empírica de Henry Darcy (1856), quien estudió las propiedades de un flujo de agua a través de filtros de material arenoso, variando la longitud de la muestra y la presión de agua. De sus experimentos y para velocidades lo suficientemente pequeñas concluyó que el gasto o caudal (Q) es proporcional a la diferencia de carga hidráulica ($h_1 - h_2$) e inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos del flujo (ΔL). En esa época ya se sabía que el caudal (Q) era proporcional al área de la sección.

Luego Darcy combinó todas estas conclusiones dando así forma a lo que se conoce como ley de Darcy.

$$Q = -K \frac{(h_1 - h_2) \cdot A}{\Delta L}$$

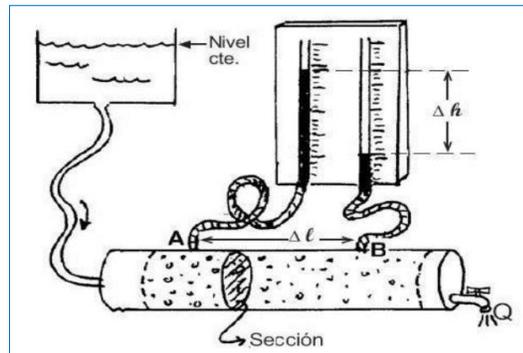
Donde:

K = Es la constante de proporcionalidad llamada coeficiente de permeabilidad.

$i = \frac{h_1 - h_2}{\Delta L}$ = Es la variación de la carga hidráulica separados entre dos puntos, esta relación es conocida como gradiente hidráulico.

A = Área de la sección transversal de la muestra.

Imagen 2. 4. Permeámetro horizontal de Darcy



Fuente: Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas, Patricio Eduardo Puga Lagos

El signo negativo indica que el flujo se mueve en dirección de la carga hidráulica.

Considerando la ecuación de continuidad:

$$Q = v \cdot A$$

Donde:

v = Velocidad (m/s)

$$v \cdot A = -K \cdot \frac{(h_1 - h_2) \cdot A}{\Delta L}$$

De la cual es posible determinar la denominada velocidad de Darcy:

$$v = -K \cdot \frac{dh}{dL}$$

La expresión anterior nos plantea que el coeficiente de permeabilidad puede ser considerado como la velocidad del agua a través de un suelo cuando está sujeto a un gradiente hidráulico.

2.5.5. Validez de la ley de Darcy

La ley de Darcy establece una relación lineal entre la velocidad y el gradiente hidráulico del tipo $v = k \cdot i$ y es válida para un régimen de flujo laminar y en un medio isotrópico y homogéneo.

Puede decirse que, en la generalidad de los casos, el flujo del agua subterránea cumple con esta ley, aun cuando a veces se presentan ciertas condiciones, particularmente referidas al número de Reynolds que originan separaciones con respecto a ella.

La ley de Darcy deja de ser válida para condiciones extremas de flujo: para valores altos del gradiente hidráulico y por consiguiente de la velocidad de flujo y para valores bajos del mismo gradiente hidráulico.

El estudio hidrodinámico del flujo en un medio poroso ha establecido, por analogía con el flujo en tuberías, un número de Reynolds (Re) que expresa, como en aquel caso, una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad que actúan en el flujo.

Dicho número de Reynolds se define en función de la velocidad promedio (\bar{v}), de un diámetro característico del material (puede ser usado el diámetro eficaz (d_{10}) del material, o bien el diámetro promedio) y de la viscosidad cinemática del fluido, así:

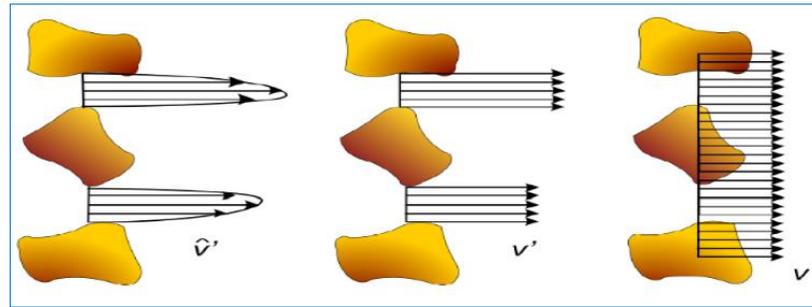
$$Re = \frac{\bar{v} \cdot d_{10}}{\mu_k}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

\bar{v} = Representa la velocidad promedio del fluido en los poros, no la velocidad promedio de toda el área que implica dividir el caudal por el área o sección de suelo atravesada por el fluido.

Imagen 2. 5. Velocidades del fluido a través de la muestra



Leyenda: Velocidad instantánea del flujo \hat{v} , velocidad promedio del flujo en los poros \dot{v} y velocidad promedio en la sección del suelo (kolymbas, 1998)

Fuente: Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas, Patricio Eduardo Puga Lagos

En una escala microscópica el fluido que escurre por el suelo sigue una trayectoria muy tortuosa entre las partículas y granos, pero macroscópicamente la trayectoria del flujo en una dimensión puede ser considerada como en una línea recta.

Por lo tanto, la velocidad promedio a la cual el fluido escurre (velocidad de escurrimiento \dot{v}) viene dada por:

$$\dot{v} = \frac{Q}{A_v}$$

Donde:

Q = Caudal que circula a través de la muestra.

A_v = Área de vacíos de la muestra.

Sin embargo, en promedio la porosidad también puede ser expresada por medio de la razón entre un área de vacíos A_v y un área total.

$$n = \frac{A_v}{A}$$

De donde resulta que la ley de Darcy en términos de velocidad promedio entre granos o velocidad de escurrimiento \dot{v} viene dada por:

$$v = \frac{Q}{A \cdot n} = \frac{v}{n} = \frac{k \cdot i}{n}$$

Experimentalmente se ha estudiado esta relación para diferentes tipos de material y distintos fluidos y se ha encontrado que gráficamente la relación es lineal hasta un cierto rango de valores de $Re < 1$, rango que corresponde a las condiciones de un flujo laminar, a partir de estos valores se presenta una zona de transición aproximadamente hasta $Re = 10$ y para valores mayores de (Re) el régimen es ya turbulento. La ley de Darcy se cumple entonces hasta el rango de valores de (Re) entre 1 y 10, valores para los cuales el efecto de las fuerzas de inercia es prácticamente despreciable, hipótesis asumida en la ley de Darcy. Estrictamente hablando no se puede determinar un valor crítico de (Re) a partir del cual la ley de Darcy deja de ser válida ya que el cambio es gradual, razón por la cual se habla más bien de un rango de valores para ($1 < Re < 10$) en el cual se ubica el punto de desviación de la ley de Darcy.

2.5.6. Factores que influyen en el valor de permeabilidad de un suelo

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 propias del fluido mismo como son su peso específico y su viscosidad.

Un factor influyente en la determinación del coeficiente de permeabilidad es la temperatura del agua, ya que ésta influye sobre la viscosidad dinámica. Es por esta razón que se mide también la temperatura a la cual se desarrollan los distintos ensayos, con el objetivo de realizar una corrección por temperatura, ya que los resultados se entregan generalmente a la temperatura estándar de 20°C.

La relación de vacíos es otro factor incidente, dado que a medida que el suelo es compactado induce una disminución de vacíos, por lo tanto, la permeabilidad del suelo también disminuye.

El tamaño de las partículas influye en los valores del coeficiente de permeabilidad, ya que de esta depende la velocidad de infiltración, a mayor tamaño de partícula mayor serán los vacíos y entonces mayor será el valor de (k).

La estructura y estratificación del suelo son parámetros incidentes en los resultados de permeabilidad ya que si un suelo es remoldeado cambiara estas propiedades variando también el valor de su permeabilidad.

La gradación del suelo es otra variable que tiene influencia en la permeabilidad, no obstante, diversas investigaciones desarrolladas en esta área han concluido que, en un suelo con distintos tamaños de granos, la permeabilidad depende principalmente del tamaño de las partículas más pequeñas.

Otro aspecto que influye en la permeabilidad es la pared del permeámetro.

Pese a que este parámetro es muy poco utilizado ha sido discutido por Dudgeon (1967), Franzini (1968), Rose y Rizk (1949), y Graton y Frazer (1953).

Las 2 principales influencias son la rugosidad del material del cual está fabricado el permeámetro ya que un material muy rugoso podría provocar una reducción en la cantidad de partículas que obstruyan el paso del agua provocando una disminución en la resistencia al flujo.

Otra influencia es el efecto producido por el acomodamiento de las partículas, ya que si los vacíos entre las paredes y los granos son muy grandes inducirán a un incremento en las velocidades en esta sección. Este efecto está relacionado directamente con el tamaño de las partículas, mientras más grande sea el tamaño de la partícula, mayor debe ser el diámetro del permeámetro.

2.5.7. Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad de suelo

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 primeramente persiguen otros fines.

Estos métodos son los siguientes:

Directos:

Permeámetro de carga constante.

Permeámetro de carga variable.

Prueba directa de los suelos en el lugar.

Indirectos:

Cálculo a partir de la curva granulométrica.

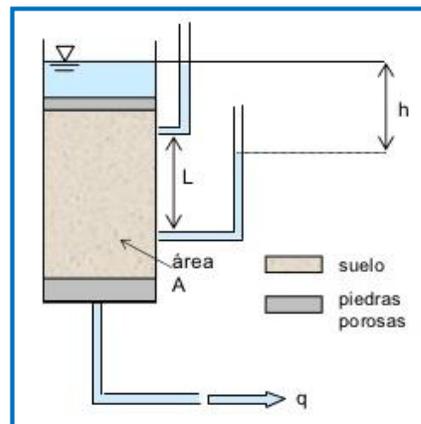
Cálculo a partir de la prueba de consolidación.

Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

2.5.7.1. Permeámetro de carga variable

En el tipo de permeámetro se mide la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo, por diferencia de niveles en un tubo alimentador.

Imagen 2. 6. Esquema del permeámetro de carga variable



Fuente: Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas, Patricio Eduardo Puga Lagos

Al ejecutar la prueba se llena de agua el tubo vertical del permeámetro, observándose su descenso a medida que el agua atraviesa la muestra.

Con referencia a la Imagen 2.6 se determina los siguientes parámetros:

a = Área del tubo vertical de carga.

A = Área de la muestra.

L = Longitud de la muestra.

h_1 = Carga hidráulica al principio de la prueba.

h_2 = Carga hidráulica al final de la prueba.

t = Tiempo requerido para que la carga hidráulica pase por h_1 a h_2 .

Considerando un tiempo (d_t), la cantidad de agua (cm^3) que atraviesa la muestra será, según la ley de Darcy:

$$dV = K \cdot A \cdot i \cdot d_t = K \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot d_t$$

Al mismo tiempo, en el tubo vertical, el agua habrá tenido un descenso (d_h) y el volumen del agua que atravesó la muestra en el tiempo (d_t) podrá expresarse:

$$dV = -a \cdot d_h$$

Las dos anteriores ecuaciones pueden igualarse, pues ambas se refieren a lo mismo:

$$K \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot d_t = -a \cdot d_h$$

$$a \int_{h_1}^{h_2} \frac{d_h}{h} = \frac{K \cdot A}{L} \int_0^t d_t$$

$$K = \frac{L \cdot a}{A \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = 2.3 \cdot \frac{L \cdot a}{A \cdot T} \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

2.5.8. Errores probables

Para realizar la prueba de permeabilidad con el permeámetro de carga variable, no se precisa una gran experiencia en general, pero en cambio, existen numerosas fuentes de error posible, de las cuales se mencionan las siguientes:

El agua debe haber sido desaireada antes de ejecutar la prueba y mantenida en esa condición. Si esto se hace correctamente, existe poca posibilidad de que el aire represente un error de consideración. Sin embargo, el dispositivo de prueba tiene muchas conexiones y siempre existe la posibilidad de que produzcan infiltraciones de aire en el sistema; la posibilidad de estas se reduce mucho usando la acción del vacío después de que el material se satura.

La relación del área del tubo de carga (a) a la del espécimen (A) es muy pequeña (frecuentemente del orden 0,01) y requiere, por lo tanto, una determinación muy

cuidadosa del área del tubo de carga. Además, la tubería usada no es de precisión y, sin duda, tendrá variaciones de sección a lo largo de su longitud.

La temperatura debería medirse en el agua en el momento que atraviesa la muestra, en lugar de hacerlo en el agua del recipiente inferior.

La estratificación y compactación no uniforme de la muestra puede hacer que la permeabilidad de la misma disminuya.

La estructura de la muestra puede verse afectada por una saturación demasiado rápida.

Excepto en lo que se refiere al error causado por el aire atrapado, las restantes fuentes de error no suelen ser de gran influencia en el valor numérico del coeficiente de permeabilidad.

2.6. PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146

2.6.1. Introducción.

El permeámetro H-4146 está diseñado para realizar pruebas de permeabilidad de cabezal variable, en suelos compactados en laboratorio. La unidad consta de un molde de compactación estándar y collar, base de montaje con piedra porosa y accesorio de tubería de bronce y cabezal con válvula de escape de aire.

2.6.2. Preparación de la muestra

Para las pruebas en suelos compactados remoldeados tales como las arcillas, el cilindro y el collar se montan en una base de prueba de compactación y la muestra se compacta según el método Proctor estándar u otro método aplicable a los resultados de prueba deseados. Con la muestra adecuadamente compactada, se debe quitar el collar y la superficie superior del suelo cuadrada con el extremo del cilindro. El cilindro y el suelo se colocan luego en la base del permeámetro y la cabeza se sujeta en su lugar. Se debe tener cuidado para mantener el aire fuera del sistema en todas las etapas de preparación para la prueba.

2.6.3. Características físicas del equipo

El molde del permeámetro de es pared rígida.

El molde del permeámetro tiene un diámetro de 15 cm.

El molde del permeámetro tiene una altura de 11.60 cm.

El molde del permeámetro de compactación se rige a la norma ASTM D5856.

Imagen 2. 7. Permeámetro de compactación H-4146



Fuente: Elaboración propia

2.7. PERMEÁMETRO DE PARED FLEXIBLE

2.7.1. Introducción

El permeámetro de pared flexible está diseñado para realizar pruebas de permeabilidad de cabezal variable, en suelos inalterados y compactados en laboratorio. La unidad consta de una celda de vidrio, base de aluminio anodizado, piedras porosas, válvula de escape de aire y resorte incorporado en la tapa superior para aplicar de 5 a 10 libras fuerza contra pantalla para evitar cambios en la densidad del suelo.

2.7.2. Preparación de la muestra

Mediante un cilindro de corte se debe extraer la muestra inalterada, la cual debe ser sometida a un proceso de saturación.

Con la ayuda de un pistón se traslada la muestra a la celda del permeámetro.

Se debe tener cuidado para mantener el aire fuera del sistema en todas las etapas de preparación para la prueba.

2.7.3. Características de equipo

La celda del permeámetro de es pared flexible.

La celda del permeámetro tiene un diámetro de 7,50 cm.

La celda del permeámetro tiene una altura de 20 cm.

La celda del permeámetro de pared flexible es compatible con la norma ASTM D2434.

Imagen 2. 8. Permeámetro de pared flexible



Fuente: Elaboración propia

2.8. ANÁLISIS DE DATOS CUANTITATIVOS

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.

2.8.1.1. Distribución de frecuencias

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.

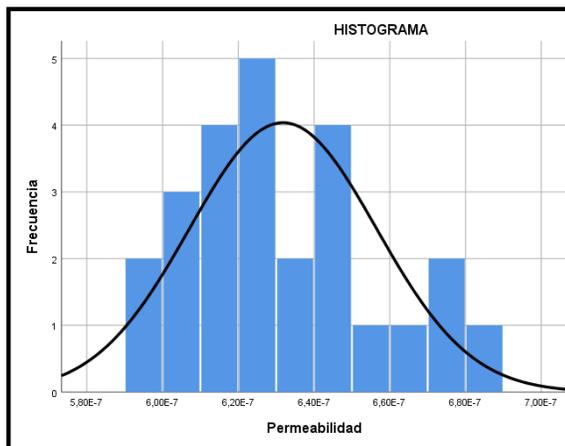
La representación gráfica de una distribución de frecuencias depende del tipo de datos que la constituya. Los datos agrupados en intervalos correspondientes a un carácter cuantitativo, pueden ser representados mediante un histograma.

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 las bases 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.

Imagen 2. 9. Histograma de frecuencias



Fuente: Elaboración propia

2.8.1.2. Medidas de tendencia central

Deben su nombre a la característica de que sus valores tienden a ocupar posiciones centrales o intermedias entre el menor y mayor valor del conjunto de datos. Por lo tanto, brindan información sobre el centro de la distribución. Las más usuales son: la media aritmética, la mediana, la media geométrica, la media armónica y la media cuadrática.

Media. - Se define media aritmética de una serie de valores como el resultado producido al sumar todos ellos y dividir la suma por el número total de valores.

Mediana. - Dado un conjunto de valores ordenados, su mediana se define como un valor numérico tal que se encuentra en el centro de la serie, con igual número de valores superiores a él que inferiores. Normalmente, la mediana se expresa como Me.

Moda. - En una serie de valores a los que se asocia una frecuencia, se define moda como el valor de la variable que posee una frecuencia mayor que los restantes. La moda se simboliza normalmente por Mo.

2.8.1.3. Medidas de variabilidad

Indican cuan 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.

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

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

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

2.8.1.4. Asimetría y curtosis

Asimetría

Es una medida de forma de una distribución que permite identificar y describir la manera como los datos tiende 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 distribuyen 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.

Curtosis

La curtosis mide el grado de agudeza o achatamiento de una distribución con relación a la distribución normal, es decir, mide cuán 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.

2.8.2. Confiabilidad o fiabilidad lograda por el permeámetro de compactación H - 4146

2.8.2.1. Método de las formas paralelas

Este método consiste en:

Elaborar dos formas paralelas de un mismo test, o lo que es lo mismo, dos test paralelos.

Aplicar una forma del test a la muestra de interés, y tras un lapso de tiempo que no sea relevante para la aparición de cambios en los sujetos, aplicar la segunda forma del test a la muestra.

Calcular el coeficiente de correlación entre las puntuaciones empíricas obtenidas por los sujetos en las dos ocasiones. Si las formas son paralelas esa correlación es el coeficiente de fiabilidad del test.

Elaborar formas paralelas.

Hay dos tipos de criterios que dos test han de cumplir para que los consideremos paralelos.

Criterio estadístico: Las dos formas presentan medidas iguales y varianzas iguales tanto en sus puntuaciones empíricas verdaderas, pero no se requiere igual varianza de error.

Criterios de formatos y contenido: En la práctica dos test paralelos consisten en dos conjuntos distintos de ítems referidos a una misma variable, habitualmente con las mismas instrucciones y el mismo formato de prueba y de ítems.

Las formas paralelas pretenden muestrear el mismo contenido con cuestiones formuladas de manera distinta.

La aplicación de las formas del test.

Las dos formas deben ser administradas bajo las mismas condiciones, o, al menos, bajo los mínimos cambios posibles en las condiciones. Se trata de no introducir factores que puedan provocar cambios en los resultados.

Respecto al tiempo, debe utilizarse un lapso entre ambas formas lo suficientemente corto como para que los sujetos no hayan cambiado en la variable de interés y lo suficientemente largo para que factores de memoria, fatiga, o entrenamiento que tengan el mínimo efecto.

Cálculo del coeficiente de correlación.

Una vez que se han administrado las dos formas paralelas se dispondrá de una tabla con datos de N mediciones por 2 variables, la puntuación en la forma A y en la forma B para cada sujeto. Se procede entonces a calcular el coeficiente de correlación de Pearson.

El resultado obtenido puede estar entre -1 y +1, pasando por cero. En realidad, como se trata de formas paralelas, no tiene sentido esperar correlaciones negativas debiendo estar el resultado entre 0 y +1, incluso cabría esperar valores positivos alejados de 0.

Si A y B son formas paralelas entonces la correlación es el coeficiente de fiabilidad. Para considerar el test fiable, el coeficiente de correlación obtenido debe ser alto, de modo que una gran proporción de la varianza de las puntuaciones se deba a la varianza verdadera.

Es decir, si obtenemos un coeficiente de fiabilidad de 0,75 diremos que tres cuartas partes de la varianza empírica del test se deben a la varianza verdadera, o lo que es lo mismo, que un 25 % de la varianza empírica es varianza de error.

2.8.2.2. Método Alfa de Cronbach

Alfa representa la consistencia interna del test, el grado que todos los ítems del test covarían entre sí. Se supone que las variables están relacionadas con la magnitud inobservable de interés. En particular, las n variables deberían realizar mediciones estables y consistentes, con un elevado nivel de correlación entre ellas.

El alfa de Cronbach permite cuantificar el nivel de fiabilidad de una escala de medida para la magnitud inobservable construida a partir de las n variables observadas.

El alfa de Cronbach no deja de ser una medida ponderada de las correlaciones entre las variables que forman parte de la escala.

Puede calcularse de dos formas: a partir de las varianzas o de las correlaciones de los ítems.

A partir de las varianzas, el alfa de Cronbach se calcula con la siguiente ecuación.

$$\alpha = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=0}^k S_i^2}{S_t^2} \right)$$

Dónde:

S_i^2 = varianza del ítem i.

St^2 = varianza de los valores totales observados.

k = número de ítems.

El alfa de Cronbach no es un estadístico al uso, por lo que no viene acompañado de ningún p-valor que permita rechazar la hipótesis de fiabilidad en la escala. No obstante, cuanto más se aproxime a su valor máximo, 1, mayor es la fiabilidad de la escala. Además, en determinados contextos y por tácito convenio, se considera que los valores de alfa superiores a 0,7 o 0,8 son suficientes para garantizar la fiabilidad de la escala.

2.8.3. Análisis estadístico inferencial

2.8.3.1. 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.

2.8.3.1.1. Distribución muestral

Una distribución muestral es un conjunto de valores sobre una estadística calculada de todas las muestras posibles de determinado tamaño de una población. Las distribuciones muestrales de medias son probablemente las más conocidas.

Generalmente nos interesa conocer una o más de las siguientes características de la distribución muestral.

- 1.- Su forma funcional (como aparece en su representación gráfica).
- 2.- Su media.
- 3.- Su desviación estándar (error estándar)

2.8.3.1.2. Nivel de significancia o significación

Es un nivel de la probabilidad de equivocarse y se fija antes de probar hipótesis inferenciales.

Existen dos niveles convenidos en las ciencias:

El nivel de significancia de 0,05, el cual implica que el investigador tiene 95% de seguridad para generalizar sin equivocarse y solo el 5% en contra. En términos de probabilidad, 0,95 y 0,05, respectivamente, ambos suman la unidad.

El nivel de significancia de 0,01, el cual implica que el investigador tiene 99% en su favor y 1% en contra para generalizar sin temor. Muy utilizado cuando las generalizaciones implican riesgos vitales para las personas.

2.8.3.1.3. Relación entre distribución muestral y el nivel de significancia

El nivel de significancia o significación se expresa en términos de probabilidad y la distribución muestral también como probabilidad.

Para ver si existe o no confianza al generalizar acudimos a la distribución muestral, con una probabilidad adecuada para la investigación. Dicho nivel se toma como un área bajo la distribución muestral. Es decir, que el valor estimado en la muestra no se encuentre en el área de riesgo y este lejos del valor de la distribución muestral.

El nivel de significación representa áreas de riesgo o confianza en la distribución muestral.

2.8.3.1.4. 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.

2.8.3.1.5. 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.

A continuación, se muestra algunos de los métodos o pruebas estadísticas paramétricas:

2.8.3.1.5.1. Regresión y correlación

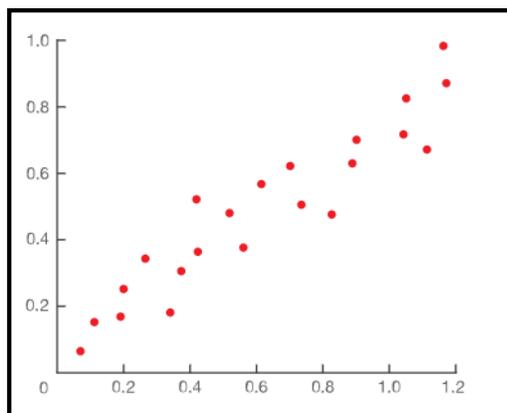
El análisis de regresión que trata de establecer la forma de la relación entre variables, es decir se trata de encontrar una relación funcional, que para el caso de dos variables será de la forma $Y = f(x)$, de manera que se pueda calcular el valor de una variable de acuerdo al valor que tome la otra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

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

Imagen 2. 10. Diagrama de dispersión



Fuente: https://www.ecured.cu/Medidas_de_dispersi%C3%B3n

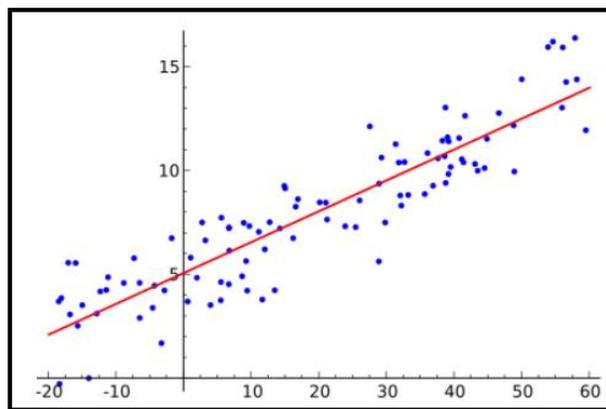
Regresión

El análisis de regresión se 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 se 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.

Imagen 2. 11. Regresión lineal simple

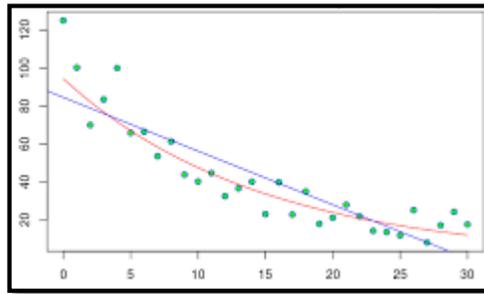


Fuente: https://www.ecured.cu/Regresi%C3%B3n_lineal

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.

Imagen 2. 12. Regresión lineal simple



Fuente: <http://www.eumed.net/coursecon/medir/no-lineal.htm>

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 cubica

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3$$

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 la representa por una recta se la llama correlación lineal. Si la relación se la 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 cual 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 $Y = f(X)$.

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

Donde:

Y = dato inicial de esta variable.

\bar{Y} = media aritmética.

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

El cálculo de este coeficiente de correlación requiere que se conozca plenamente la relación funcional entre las variables $Y = f(X)$.

Interpretación: El coeficiente R 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.

$+1,00$ = Correlación positiva perfecta.

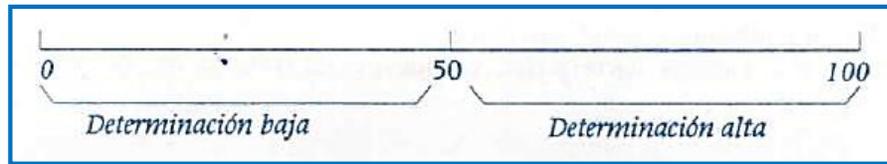
Coefficiente de determinación

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.

Imagen 2. 13. Interpretación del coeficiente de determinación



Fuente: Estadística y Probabilidades, Víctor Chungara Castro

Distribuciones

Para describir el comportamiento de una variable aleatoria se estudia su distribución de probabilidad. Para estudiar los resultados de un experimento aleatorio, se busca determinar una distribución de probabilidad o modelo probabilístico, que satisfaga a un conjunto de supuestos.

Distribución normal

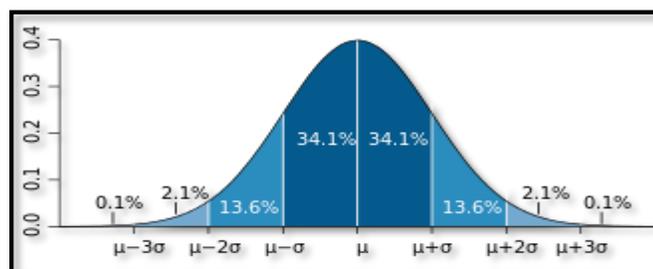
La variable continua aleatoria X , posee distribución normal con media μ , varianza σ^2 , si su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

La grafica de la curva normal tiene la característica forma de una campana, por ello precisamente se llama campana de gauss.

La curva tiene un máximo en μ , posee dos puntos de inflexión en $\mu-\sigma$, $\mu+\sigma$.

Imagen 2. 14. Curva de distribución normal



Fuente: <https://jesusgarciaj.com/2010/01/22/la-curva-de-distribucion-normal/>

Distribución t de Student

La variable continua aleatoria T, tiene una distribución t de Student con r grados de libertad, se representa como t(r), si su función de densidad de probabilidad es:

$$f(t) = T_0 \left(1 + \frac{t^2}{r}\right)^{-\frac{r+1}{2}}$$

Donde T_0 es una constante, r es entero positivo.

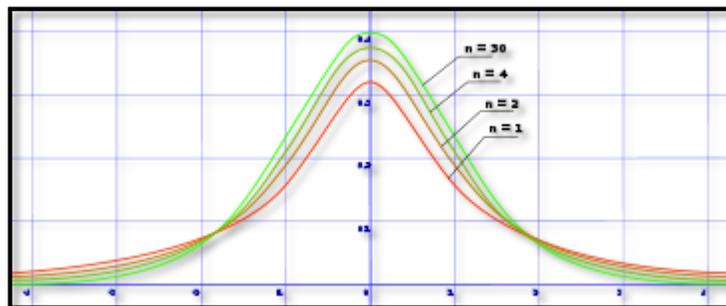
Es una curva simétrica respecto de 0, se la compara con la curva normal. Note que es ligeramente más achatada que la curva normal, sus correspondientes colas que se extienden a izquierda y derecha son ligeramente más altas que en la curva normal. La distribución t de Student con r grados de libertad suele definirse como la distribución de la variable T.

El valor de la constante se define en términos de la función Gamma $T_0 = \frac{\Gamma\left[\frac{r+1}{2}\right]}{\Gamma\left[\frac{r}{2}\right]\sqrt{\pi r}}$

La distribución t de Student con r grados de libertad es adecuada cuando el número de elementos de una muestra es pequeño < 30 .

En la práctica la distribución t de Student se emplea en la teoría de las pequeñas muestras y particularmente cuando se estudia la confiabilidad.

Imagen 2. 15. Curva de distribución t de Student



Fuente: <https://www.uv.es/ceaces/normaMu/t/t.htm>

2.8.3.1.5.2. 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 este 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 x^2 con p grados de libertad bajo la hipótesis nula, y donde p es una constante positiva.

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.

Los datos usados para llevar a cabo la prueba deben ser muestreados independientemente para cada una de las dos poblaciones que se comparan. Esto en general no es posible determinarlo a partir de los datos, pero si se conoce los datos han sido muestreados de manera dependiente, entonces la prueba t clásica que aquí se analiza, puede conducir a resultados erróneos.

2.8.3.1.5.3. Análisis de varianza de un factor ANOVA

Es una prueba estadística para analizar si más de dos grupos diferentes significativamente entre sí en cuanto a sus medias y varianzas. La prueba t se aplica para dos grupos y el análisis de varianza unidireccional se usa para tres, cuatro o más grupos. Aunque con dos grupos se puede utilizar también.

Hipótesis: de diferencia entre más de dos grupos. La hipótesis de investigación propone que los grupos difieren significativamente entre si y la hipótesis nula propone que los grupos no difieren significativamente entre sí.

Variables: Una variable independiente y una variable dependiente.

Nivel de medición de las variables: La variable independiente es categórica y la dependiente es por intervalos o razón.

El hecho de que la variable independiente sea categórica significa que es posible formar grupos diferentes. Puede ser una variable nominal, ordinal, por intervalos o de razón.

Interpretación: El análisis de varianza unidireccional produce un valor conocido como F o razón F, que se basa en una distribución muestral, conocida como distribución F, la cual es otro miembro de la familia de la familia de distribuciones muestrales. La razón F compara las variaciones en las puntuaciones debidas a dos diferentes fuentes: variaciones entre los grupos que se comparan y variaciones dentro de los grupos. Si el valor de F es significativo implica que los grupos difieren entre sí en sus promedios. Entonces se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza la nula.

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

La medición de la permeabilidad, se realizó en laboratorio en muestras de arcillas alteradas, aplicando energía de compactación mediante el método Proctor modificado.

Primero se compactó las muestras en el molde del permeámetro de compactación H- 4146, el cual tiene las mismas dimensiones que el molde de compactación del Proctor modificado.

Para optimizar el tiempo, se realizó las compactaciones en los moldes del Proctor modificado, dichas muestras fueron introducidas en contenedores de agua para así lograr la saturación.

Las muestras saturadas fueron extraídas de los moldes del Proctor modificado a través de un extractor de núcleos, para luego ser trasladadas al molde del permeámetro de compactación H-4146.

Una vez medida la permeabilidad en el permeámetro de compactación H-4146, se extrajo la muestra mediante un cilindro de corte, la cual fue trasladada al permeámetro de pared flexible de carga variable, manteniendo las mismas propiedades de ensayo.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EN ESTUDIO

En las zonas de estudio de la ciudad de Tarija se pudo evidenciar una alta susceptibilidad a la erosión donde a simple vista se pudo comprobar que el material que predomina son los suelos finos.

3.2.1. Descripción y ubicación de los suelos estudiados

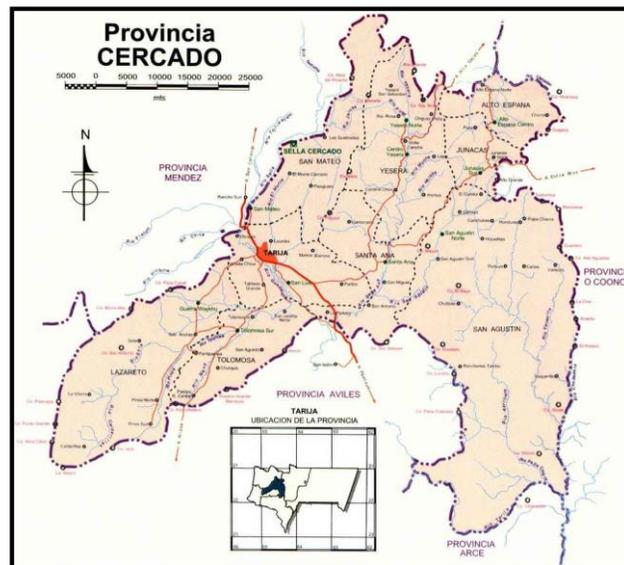
En los barrios de estudio se encuentran diferentes tipos de suelos finos como ser limos inorgánicos, arcillas inorgánicas de alta plasticidad, limos inorgánicos arenosos y arcillosos ligeramente plásticos y arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad.

Imagen 3. 1. Mapa político de Tarija



Fuente: Mapa político de Bolivia

Imagen 3. 2. Mapa de la Provincia Cercado



Fuente: Mapa político de Bolivia

Los lugares de recolección de las muestras para nuestra caracterización e investigación fueron en los siguientes barrios: El Portillo, Pedro Antonio Flores, San Salvador, La Florida, Los Chapacos y 20 de Enero.

3.2.1.1. Fotos satelitales Google Earth de los barrios de extracción

Imagen 3. 3. Barrio Portillo de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

Imagen 3. 4. Barrio Pedro Antonio Flores de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

Imagen 3. 5. Barrio San Salvador de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

Imagen 3. 6. Barrio La Florida de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

Imagen 3. 7. Barrio Los Chapacos de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

Imagen 3. 8. Barrio 20 de Enero de la ciudad de Tarija, extracción de muestra



Fuente: Foto satelital Google Earth

3.2.2. Coordenadas de las zonas de estudio

Tabla 3. 1. Coordenadas de los barrios de estudio

Barrio	COORDENADAS	
	Latitud "S"	Longitud "W"
El Portillo	21°33'53,15"	64°40'33,04"
Pedro Antonio Flores	21°31'25,48"	64°42'32,81"
San Salvador	21°33'27,39"	64°41'8,39"
La Florida	21°30'57,08"	64°43'44,23"
Los Chapacos	21°30'10,47"	64°44'15,07"
20 de Enero	21°30'2,24"	64°44'15,21"

Fuente: Elaboración propia

3.3. CRITERIO DE SELECCIÓN DE MUESTRAS

Específicamente el estudio del suelo con el que se trabajara, se realizara mediante la ejecución de pruebas de laboratorio que permitan determinar sus características y propiedades; pero para alcanzar resultados razonablemente dignos de crédito, es preciso cumplir en forma adecuada una etapa previa e imprescindible: La obtención de las muestras de suelo apropiadas para la realización de las correspondientes pruebas de laboratorio.

Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas.

Alterada: Es aquella muestra que no mantiene las mismas condiciones que presentaba en el terreno, la cual es extraída 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 este trabajo este proyecto de investigación, las muestras son de tipo alteradas.

3.3.1. Toma de muestras

El objetivo es realizar la extracción o muestreo adecuado y representativo para poder determinar de forma correcta las características y propiedades del suelo mediante ensayos de laboratorio.

3.3.1.1. Equipo utilizado

El material utilizado para la extracción de las muestras es el siguiente:

Pico.

Pala.

Bolsas.

3.3.1.2. Procedimiento de extracción de la muestra

El procedimiento para la obtención de muestras para el caso de cortes, es el que se describe a continuación:

Se retira la capa de despilme superficial limpiando el lugar de extracción y se evita de esta manera, que el suelo recolectado sufra alguna mezcla.

Se quita el material seco y/o suelto para dejar una superficie limpia de donde se pueda obtener la muestra.

Se excava en forma de canales verticales de sección más o menos uniforme desde la parte superior hasta el fondo.

Se recoge todo el material excavado, se coloca en una bolsa con su etiqueta de identificación para posteriormente llevarlo al laboratorio.

Para muestras en donde no presente corte, el procedimiento a seguir es el siguiente:

Se debe excavar un hueco de profundidad de 50 cm, a partir de este nivel extraer la muestra y colocarlo en una bolsa con su etiqueta de identificación para posteriormente llevarlo al laboratorio.

Imagen 3. 9. Extracción de muestras

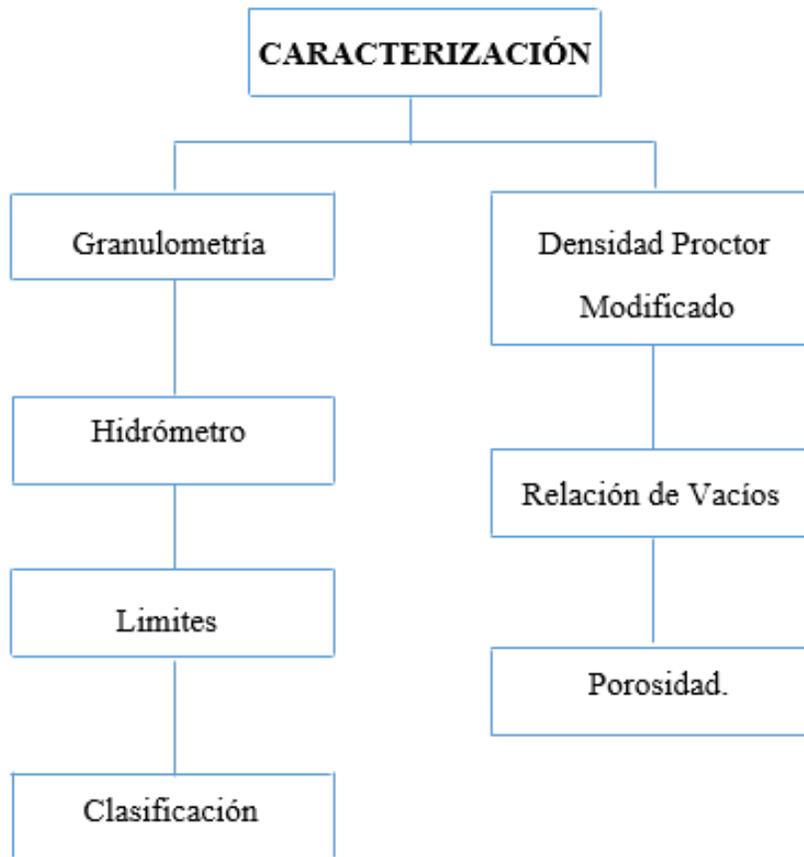


Fuente: Elaboración propia

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

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

Imagen 3. 10. Caracterización de los suelos



Fuente: Elaboración propia

3.5. ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

(Documento referencial ASTM D 422 – AASHTO T88)

3.5.1. Introducción

El proceso de separar un agregado de suelo en sus diferentes fracciones cada una consistente en granos de tamaño distinto, dentro de ciertos límites se conoce análisis mecánico o análisis granulométrico.

Por medio del análisis granulométrico se ha encontrado que la mayoría de los suelos naturales contienen granos de 2 o más fracciones.

3.5.2. Objetivo

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

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

Tabla 3. 2. Resumen de los resultados de la granulometría

Granulometría				
Barrio	% que pasa del total N° 4	% que pasa del total N° 10	% que pasa del total N° 40	% que pasa del total N° 200
El Portillo	100	100	99,79	98,93
Pedro Antonio Flores	100	100	99,39	98,35
San Salvador	100	100	99,26	97,78
Los Chapacos	100	100	100	99,20
20 de Enero	100	100	100	99,01
La Florida	100	100	100	99,31

Fuente: Elaboración propia

3.6. ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO

(Documento referencial ASTM D 422)

3.6.1. Introducción

El análisis hidrométrico se basa 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 tamaño.

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de 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 pasa el tamiz de 2 mm (N° 10) para suelos granulares.

3.6.2. Objetivo

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 arcilla de una muestra de suelo.

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

Tabla 3. 3. Resumen de los resultados del hidrómetro

Barrio	Hidrómetro	
	Arcilla (%)	Limo (%)
El Portillo	14,18	84,75
Pedro Antonio Flores	13,24	85,11
San Salvador	12,52	85,26
Los Chapacos	22,27	76,93
20 de Enero	21,01	78,00
La Florida	25,01	74,30

Fuente: Elaboración propia

3.7. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LOS SUELOS

(Documento referencial ASTM D854; AASHTO T 100)

3.7.1. Objetivo

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

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

Tabla 3. 4. Resumen de los resultados de peso específico

Barrio	Peso específico
	(gr/cm ³)
El Portillo	2,71
Pedro Antonio Flores	2,70
San Salvador	2,68
Los Chapacos	2,74
20 de Enero	2,73
La Florida	2,76

Fuente: Elaboración propia

3.8. ENSAYO DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS

(Documento referencial ASTM D4318; AASHTO T89)

3.8.1. 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.

3.8.2. Objetivo

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina de Casagrande. Estos datos son necesarios para realizar la clasificación SUCS y AASHTO de los sitios estudiados.

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

3.9. ENSAYO DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

(Documento referencia ASTM D4318; AASHTO T90)

3.9.1. Introducción

Límite plástico: 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 0,50 a 1 cm de largo y no puedan ser reamados ni reconstruidos.

3.9.2. Objetivo

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos. Estos datos son necesarios para realizar la clasificación SUCS y AASHTO de los sitios estudiados.

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

Tabla 3. 5. Resumen de los resultados de los límites de consistencia

Barrio	Límites		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)
El Portillo	41	25	17
Pedro Antonio Flores	39	23	15
San Salvador	38	24	14
Los Chapacos	54	29	24
20 de Enero	52	28	24
La Florida	57	31	26

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 6. Resumen de los resultados de clasificación

Clasificación		
Barrio	SUCS	Descripción
El Portillo	CL	Arcilla inorgánica de mediana compresibilidad.
Pedro Antonio Flores	CL	Arcilla inorgánica de mediana compresibilidad.
San Salvador	CL	Arcilla inorgánica de mediana compresibilidad.
Los Chapacos	CH	Arcilla inorgánica de alta compresibilidad.
20 de Enero	CH	Arcilla inorgánica de alta compresibilidad.
La Florida	CH	Arcilla inorgánica de alta compresibilidad.

Fuente: Elaboración propia

3.10. ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO

(Documento referencial AASHTO T180)

3.10.1. Introducción

La compactación de los suelos, es importante como medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos, no fue reconocida ampliamente sino hasta la aparición del rodillo pata de cabra en 1906. Sin embargo, fue hasta 1933, año en el que R. Proctor publicó sus investigaciones sobre el tema, cuando se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo, el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva, en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación.

3.10.2. Objetivo

Determinar el peso unitario máximo y de la humedad óptima de una muestra de suelo.

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

Tabla 3. 7. Resumen de los resultados de compactación

Compactación T180			
Barrio	Muestra	Densidad seca	Humedad
	N°	gr/cm³	%
El Portillo	1	1,776	14,869
	2	1,788	15,114
	3	1,778	15,341
	4	1,772	14,381
	5	1,765	15,836
Pedro Antonio Flores	6	1,804	14,227
	7	1,793	13,938
	8	1,795	14,557
	9	1,784	13,402
	10	1,783	15,044
San Salvador	11	1,815	12,906
	12	1,817	13,402
	13	1,825	13,146
	14	1,804	12,478
	15	1,805	13,758
Los Chapacos	16	1,703	16,962
	17	1,692	16,790
	18	1,693	17,276
	19	1,687	16,323
	20	1,684	17,513
20 de Enero	21	1,684	18,097
	22	1,677	18,308
	23	1,674	17,994
	24	1,670	17,570
	25	1,669	18,512
La Florida	26	1,652	19,326
	27	1,644	19,500
	28	1,642	19,127
	29	1,637	18,828
	30	1,634	19,881

Fuente: Elaboración propia

3.11. POROSIDAD, RELACIÓN DE VACÍOS Y EXPANSIÓN

Tabla 3. 8. Resumen de los resultados de porosidad y relación de vacíos iniciales

Barrio	Muestra	Porosidad	Relación de vacíos
	N°	n_i	e_i
El Portillo	1	0,287	0,403
	2	0,291	0,410
	3	0,294	0,416
	4	0,280	0,390
	5	0,300	0,429
Pedro Antonio Flores	6	0,278	0,384
	7	0,273	0,376
	8	0,282	0,392
	9	0,266	0,362
	10	0,289	0,406
San Salvador	11	0,257	0,346
	12	0,264	0,359
	13	0,261	0,352
	14	0,251	0,334
	15	0,269	0,369
Los Chapacos	16	0,317	0,465
	17	0,315	0,460
	18	0,321	0,473
	19	0,309	0,447
	20	0,324	0,480
20 de Enero	21	0,331	0,494
	22	0,333	0,500
	23	0,329	0,491
	24	0,324	0,480
	25	0,336	0,505
La Florida	26	0,348	0,533
	27	0,350	0,538
	28	0,346	0,528
	29	0,342	0,520
	30	0,354	0,549

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 9. Resumen de los resultados de expansión

Barrio	Muestra	Expansión	
	N°	Cm	%
El Portillo	1	1,016	7,937
	2	1,092	8,532
	3	1,168	9,128
	4	0,991	7,739
	5	1,194	9,327
Pedro Antonio Flores	6	1,041	8,135
	7	0,965	7,540
	8	1,092	8,532
	9	0,940	7,342
	10	1,118	8,731
San Salvador	11	0,711	5,556
	12	0,838	6,548
	13	0,762	5,953
	14	0,660	5,159
	15	0,864	6,747
Los Chapacos	16	1,727	13,493
	17	1,651	12,898
	18	1,778	13,890
	19	1,600	12,502
	20	1,829	14,288
20 de Enero	21	1,854	15,943
	22	1,905	16,380
	23	1,778	15,288
	24	1,727	14,851
	25	1,930	16,598
La Florida	26	2,159	16,867
	27	2,235	17,462
	28	2,108	16,470
	29	2,057	16,073
	30	2,286	17,859

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 10. Resumen de los resultados de porosidad y relación de vacíos finales

Barrio	Muestra	Porosidad	Relación de vacíos
	N°	n _f	e _f
El Portillo	1	0,345	0,527
	2	0,352	0,542
	3	0,358	0,559
	4	0,338	0,511
	5	0,366	0,576
Pedro Antonio Flores	6	0,337	0,509
	7	0,330	0,493
	8	0,344	0,525
	9	0,322	0,476
	10	0,351	0,542
San Salvador	11	0,301	0,430
	12	0,314	0,458
	13	0,307	0,442
	14	0,292	0,413
	15	0,320	0,472
Los Chapacos	16	0,407	0,688
	17	0,403	0,675
	18	0,413	0,704
	19	0,396	0,656
	20	0,418	0,719
20 de Enero	21	0,429	0,751
	22	0,433	0,765
	23	0,425	0,739
	24	0,419	0,721
	25	0,437	0,775
La Florida	26	0,451	0,823
	27	0,456	0,839
	28	0,448	0,812
	29	0,444	0,798
	30	0,462	0,859

Fuente: Elaboración propia

3.12. ENSAYO DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD EN LABORATORIO, (PERMEÁMETRO DE COMPACTACIÓN H – 4146 DE CARGA VARIABLE)

Tabla 3. 11. Resumen de los resultados de permeabilidad, permeámetro de compactación H-4146 de carga variable

Barrio	Muestra	Ensayo	Permeabilidad
	N°	N°	k (cm/s)
El Portillo	1	1	6,465E-07
	2	2	6,248E-07
	3	3	6,164E-07
	4	4	6,682E-07
	5	5	6,029E-07
Pedro Antonio Flores	6	6	7,176E-07
	7	7	7,391E-07
	8	8	6,921E-07
	9	9	7,487E-07
	10	10	6,789E-07
San Salvador	11	11	8,170E-07
	12	12	7,913E-07
	13	13	7,797E-07
	14	14	8,342E-07
	15	15	7,541E-07
Los Chapacos	16	16	3,238E-07
	17	17	3,582E-07
	18	18	3,018E-07
	19	19	3,684E-07
	20	20	2,831E-07
20 de Enero	21	21	2,469E-07
	22	22	2,294E-07
	23	23	2,790E-07
	24	24	2,953E-07
	25	25	2,136E-07
La Florida	26	26	2,137E-07
	27	27	2,113E-07
	28	28	2,474E-07
	29	29	2,586E-07
	30	30	1,941E-07

Fuente: Elaboración propia

3.13. ENSAYO DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD EN LABORATORIO, (PERMEÁMETRO DE PARED FLEXIBLE DE CARGA VARIABLE)

Tabla 3. 12. Resumen de los resultados de permeabilidad, permeámetro de pared flexible de carga variable

Barrio	Muestra	Ensayo	Permeabilidad
	N°	N°	k (cm/s)
El Portillo	1	31	6,169E-07
	2	32	5,597E-07
	3	33	5,844E-07
Pedro Antonio Flores	6	34	6,678E-07
	7	35	7,024E-07
	8	36	6,332E-07
San Salvador	11	37	7,802E-07
	12	38	7,477E-07
	13	39	7,640E-07
Los Chapacos	16	40	3,040E-07
	17	41	3,366E-07
	18	42	2,954E-07
20 de Enero	21	43	2,176E-07
	22	44	2,038E-07
	23	45	2,305E-07
La Florida	26	46	1,731E-07
	27	47	1,554E-07
	28	48	1,886E-07

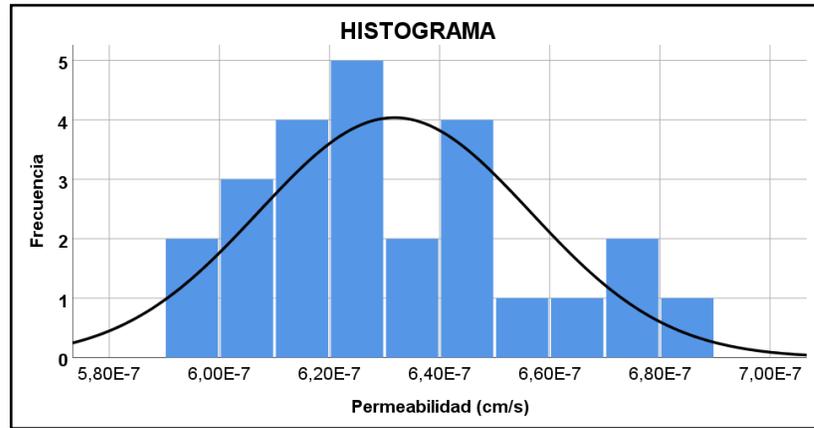
Fuente: Elaboración propia

3.14. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

3.14.1. Método de permeámetro de compactación H - 4146 de carga variable

Mediante las herramientas del paquete SPSS se representó los histogramas de frecuencias y se determinó las medidas estadísticas de las muestras estudiadas.

Gráfico 3. 1. Histograma de permeabilidad muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



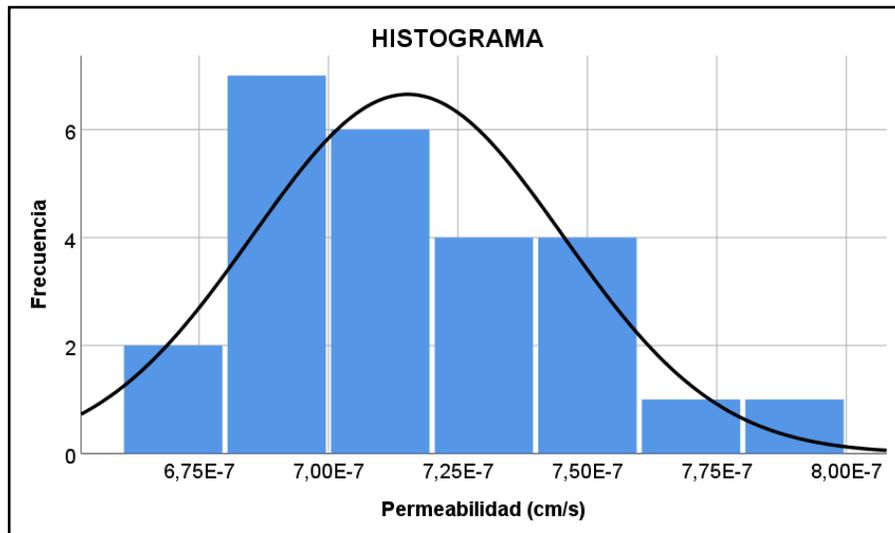
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 13. Medidas estadísticas muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	25
Media	6,318E-07
Error estándar de la media	4,940E-09
Mediana	6,248E-07
Moda	6,460E-07
Desv. Desviación	2,470E-08
Varianza	6,101E-16
Asimetría	0,447
Error estándar de asimetría	0,464
Curtosis	-0,745
Error estándar de curtosis	0,902
Rango	8,710E-08
Mínimo	5,942E-07
Máximo	6,813E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 2. Histograma de permeabilidad muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



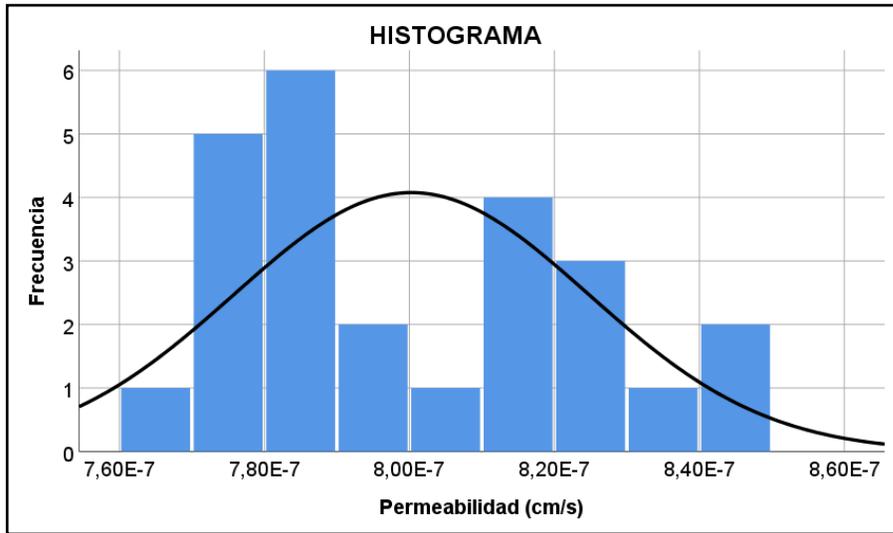
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 14. Medidas estadísticas muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	25
Media	7,153E-07
Error estándar de la media	5,996E-09
Mediana	7,156E-07
Moda	6,670E-07
Desv. Desviación	2,998E-08
Varianza	8,989E-16
Asimetría	0,335
Error estándar de asimetría	0,464
Curtosis	-0,484
Error estándar de curtosis	0,902
Rango	1,167E-07
Mínimo	6,670E-07
Máximo	7,837E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 3. Histograma de permeabilidad muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



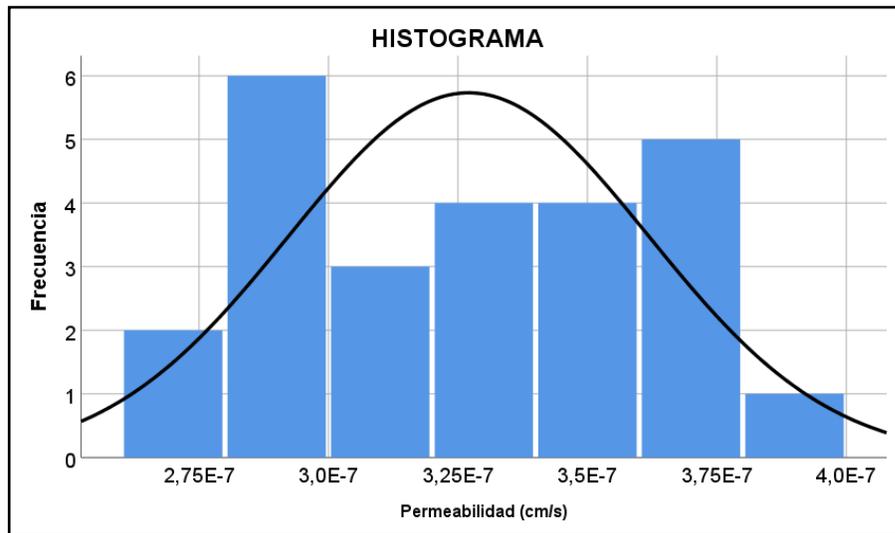
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 15. Medidas estadísticas muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	25
Media	8,003E-07
Error estándar de la media	4,894E-09
Mediana	7,909E-07
Moda	7,611E-07
Desv. Desviación	2,447E-08
Varianza	5,988E-16
Asimetría	0,325
Error estándar de asimetría	0,464
Curtosis	-1,164
Error estándar de curtosis	0,902
Rango	8,120E-08
Mínimo	7,611E-07
Máximo	8,423E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 4. Histograma de permeabilidad muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



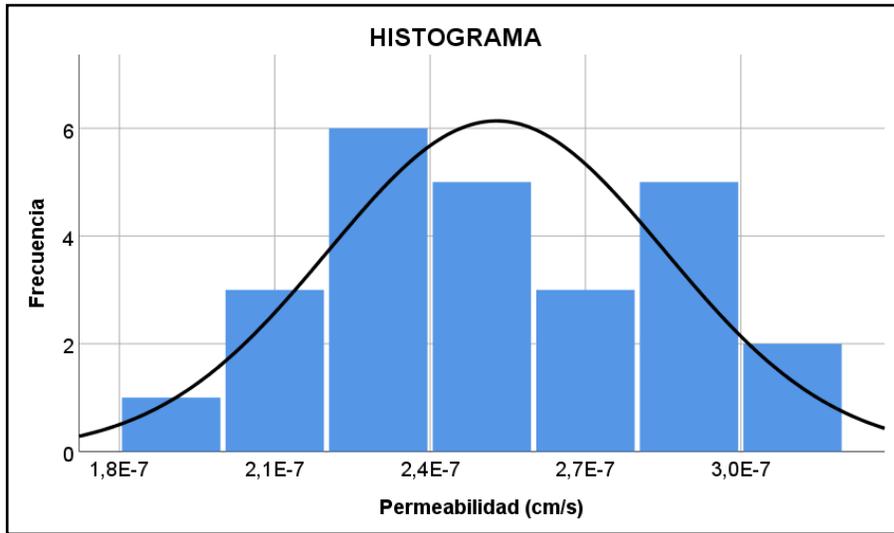
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 16. Medidas estadísticas muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	25
Media	3,271E-07
Error estándar de la media	6,959E-09
Mediana	3,298E-07
Moda	2,918E-07
Desv. Desviación	3,480E-08
Varianza	1,211E-15
Asimetría	0,029
Error estándar de asimetría	0,464
Curtosis	-1,483
Error estándar de curtosis	0,902
Rango	1,080E-07
Mínimo	2,737E-07
Máximo	3,817E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 5. Histograma de permeabilidad muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



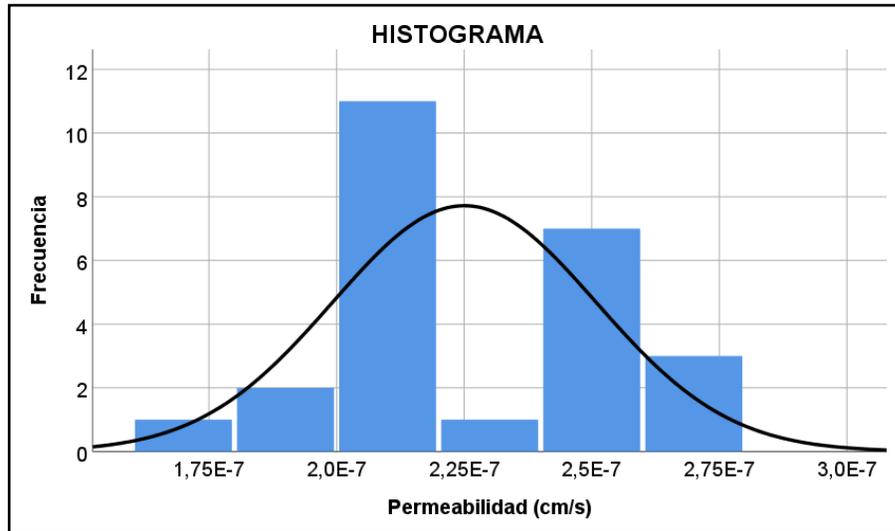
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 17. Medidas estadísticas muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	25
Media	2,528E-07
Error estándar de la media	6,502E-09
Mediana	2,482E-07
Moda	1,999E-07
Desv. Desviación	3,251E-08
Varianza	1,057E-15
Asimetría	0,098
Error estándar de asimetría	0,464
Curtosis	-1,204
Error estándar de curtosis	0,902
Rango	1,079E-07
Mínimo	1,999E-07
Máximo	3,078E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 6. Histograma de permeabilidad muestras barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 18. Medidas estadísticas muestras barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH

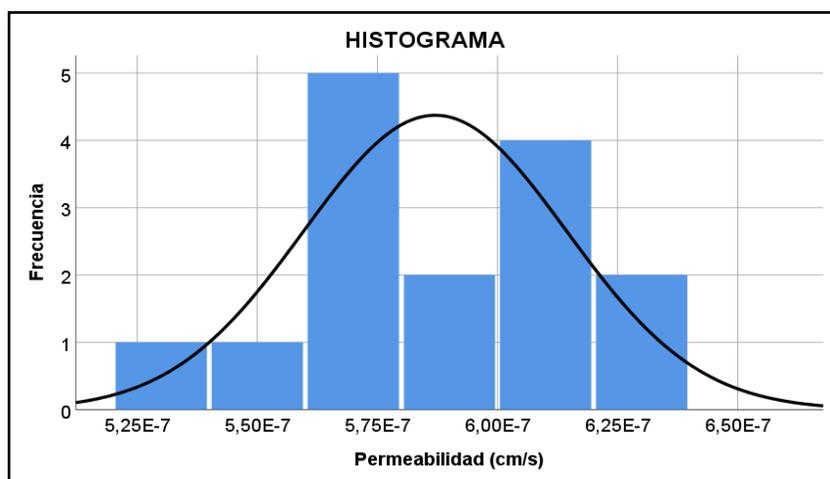
Estadísticos	
Permeabilidad	
N	25
Media	2,250E-07
Error estándar de la media	5,168E-09
Mediana	2,172E-07
Moda	1,777E-07
Desv. Desviación	2,584E-08
Varianza	6,678E-16
Asimetría	0,058
Error estándar de asimetría	0,464
Curtosis	-1,124
Error estándar de curtosis	0,902
Rango	9,040E-08
Mínimo	1,777E-07
Máximo	2,681E-07

Fuente: Elaboración propia

3.14.2. Método del permeámetro de pared flexible carga variable

Mediante las herramientas del paquete SPSS se representó los histogramas de frecuencias y se determinó las medidas estadísticas de las muestras estudiadas.

Gráfico 3. 7. Histograma de permeabilidad muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



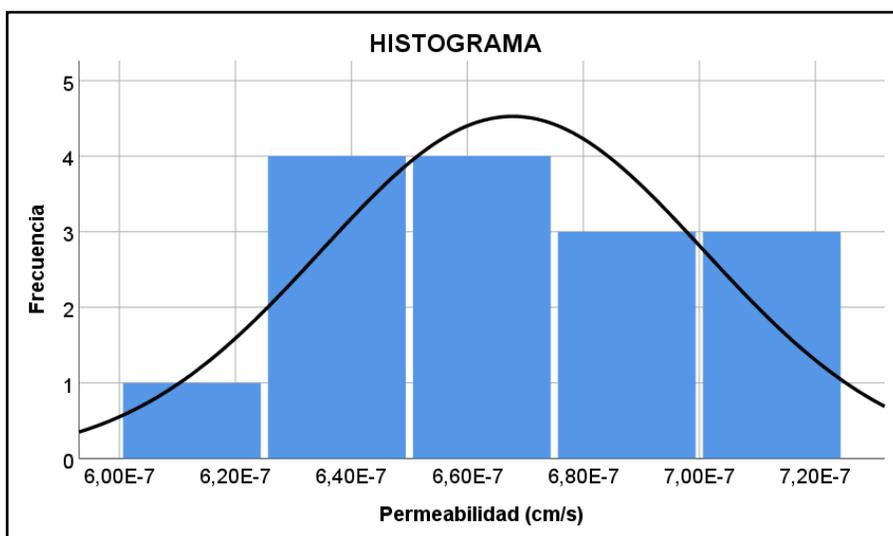
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 19. Medidas estadísticas muestras barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	15
Media	5,870E-07
Error estándar de la media	7,066E-09
Mediana	5,861E-07
Moda	5,374E-07
Desv. Desviación	2,737E-08
Varianza	7,489E-16
Asimetría	-0,237
Error estándar de asimetría	0,580
Curtosis	-1,181
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	8,600E-08
Mínimo	5,374E-07
Máximo	6,234E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 8. Histograma de permeabilidad muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



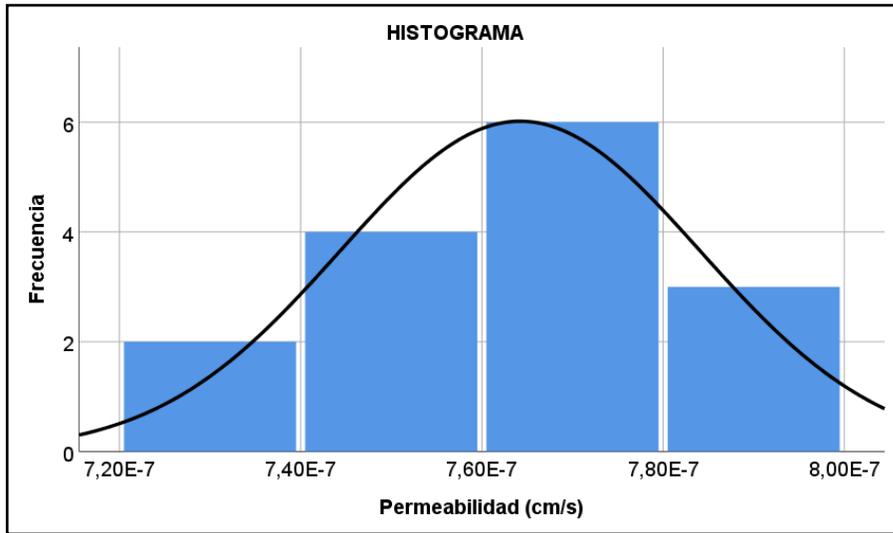
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 20. Medidas estadísticas muestras barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	15
Media	6,678E-07
Error estándar de la media	8,534E-09
Mediana	6,721E-07
Moda	6,058E-07
Desv. Desviación	3,305E-08
Varianza	1,092E-15
Asimetría	-0,084
Error estándar de asimetría	0,580
Curtosis	-0,631
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	1,161E-07
Mínimo	6,058E-07
Máximo	7,219E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 9. Histograma de permeabilidad muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



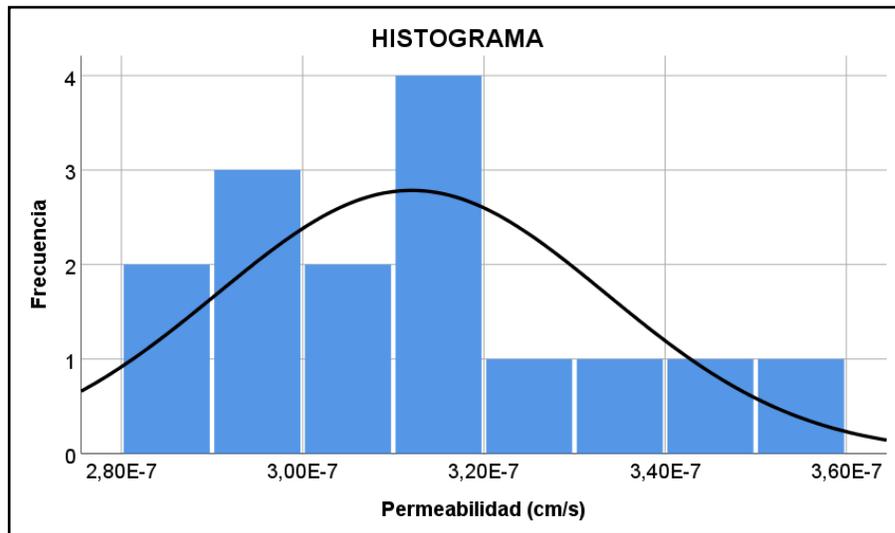
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 21. Medidas estadísticas muestras barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	15
Media	7,642E-07
Error estándar de la media	5,136E-09
Mediana	7,661E-07
Moda	7,237E-07
Desv. Desviación	1,989E-08
Varianza	3,956E-16
Asimetría	-0,345
Error estándar de asimetría	0,580
Curtosis	-0,047
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	7,180E-08
Mínimo	7,237E-07
Máximo	7,955E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 10. Histograma de permeabilidad muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



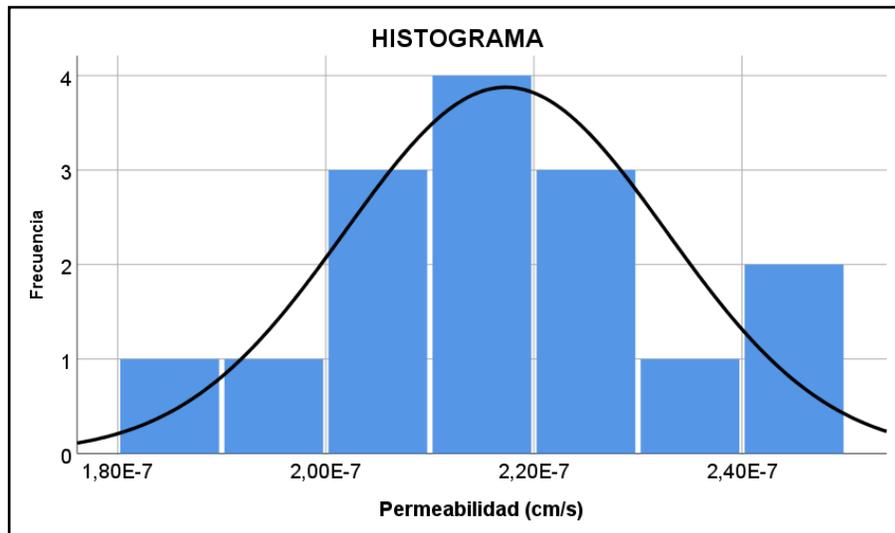
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 22. Medidas estadísticas muestras barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	15
Media	3,120E-07
Error estándar de la media	5,548E-09
Mediana	3,126E-07
Moda	2,839E-07
Desv. Desviación	2,149E-08
Varianza	4,618E-16
Asimetría	0,475
Error estándar de asimetría	0,580
Curtosis	-0,704
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	6,940E-08
Mínimo	2,839E-07
Máximo	3,533E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 11. Histograma de permeabilidad muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



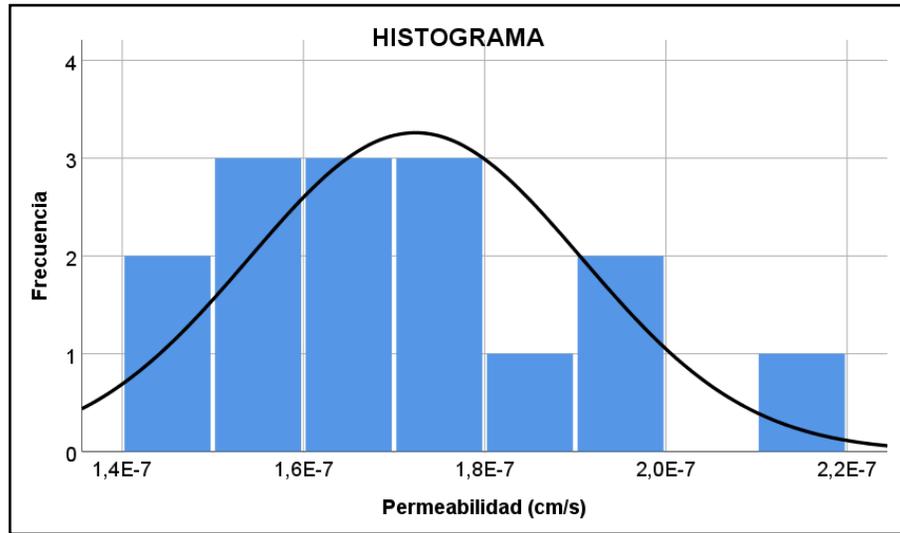
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 23. Medidas estadísticas muestras barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	15
Media	2,173E-07
Error estándar de la media	3,986E-09
Mediana	2,167E-07
Moda	1,868E-07
Desv. Desviación	1,544E-08
Varianza	2,383E-16
Asimetría	-0,003
Error estándar de asimetría	0,580
Curtosis	-0,040
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	5,630E-08
Mínimo	1,868E-07
Máximo	2,431E-07

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. 12. Histograma de permeabilidad muestras barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 24. Medidas estadísticas muestras barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH

Estadísticos	
Permeabilidad	
N	15
Media	1,724E-07
Error estándar de la media	4,739E-09
Mediana	1,699E-07
Moda	1,453E-07
Desv. Desviación	1,836E-08
Varianza	3,369E-16
Asimetría	0,520
Error estándar de asimetría	0,580
Curtosis	-0,127
Error estándar de curtosis	1,121
Rango	6,530E-08
Mínimo	1,453E-07
Máximo	2,106E-07

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. PRUEBAS DE DISTRIBUCIÓN

4.1.1. Distribución normal de permeabilidad medida con el permeámetro de compactación H-4146

Tabla 4. 1. Distribución normal de permeabilidades medidas con el permeámetro de compactación H-4146

Permeabilidad	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
El Portillo	0,156	25	0,119	0,953	25	0,294
Pedro Antonio Flores	0,126	25	0,200*	0,973	25	0,727
San Salvador	0,169	25	0,063	0,932	25	0,097
Los Chapacos	0,151	25	0,146	0,927	25	0,075
20 de Enero	0,108	25	0,200*	0,955	25	0,317
La Florida	0,159	25	0,103	0,941	25	0,152

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis

Ho = La distribución de los datos es igual a la distribución normal.

Hi = La distribución de los datos no es igual a la distribución normal.

Significancia = 5 %.

Sig. < 0,05: se rechaza la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Sig. > 0,05: se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Se realizó la prueba de normalidad a través de los métodos Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, donde se puede evidenciar que la significancia de cada muestra analizada es Sig. > 0,05; siendo la más baja la del barrio San Salvador con una significancia Sig. = 0,063 por lo cual se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza cumpliéndose el supuesto de normalidad.

4.1.2. Distribución normal de permeabilidad medida con el permeámetro de pared flexible

Tabla 4. 2. Distribución normal de permeabilidades medidas con el permeámetro de pared flexible

Permeabilidad	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
El Portillo	0,150	15	0,200*	0,938	15	0,357
Pedro Antonio Flores	0,097	15	0,200*	0,977	15	0,950
San Salvador	0,106	15	0,200*	0,973	15	0,904
Los Chapacos	0,117	15	0,200*	0,947	15	0,481
20 de Enero	0,087	15	0,200*	0,979	15	0,965
La Florida	0,118	15	0,200*	0,968	15	0,826

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis

Ho = La distribución de los datos es igual a la distribución normal.

Hi = La distribución de los datos no es igual a la distribución normal.

Significancia = 5 %.

Sig. < 0,05: se rechaza la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Sig. > 0,05: se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Se realizó la prueba de normalidad a través de los métodos Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, donde se puede evidenciar que la significancia de cada muestra analizada es Sig. > 0,05; siendo la significancia más baja Sig. = 0,200 la cual corresponde a todas las muestras de los barrios analizados, por lo cual se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza cumpliéndose el supuesto de normalidad.

4.2. PRUEBAS T DE STUDENT

4.2.1. Prueba t para una muestra

Tabla 4. 3. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio El Portillo, medidas con el permeámetro de compactación H-4146

	Estadísticas para una muestra			
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	25	6,318E-07	2,470E-08	4,940E-09

Prueba para una muestra					
Valor de prueba = 6,350E-07					
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
-0,648	24	0,523	-3,200E-09	-1,340E-08	6,996E-09

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis.

Ho = El centro de la población es igual a 6,350E-07.

Significancia = 5%.

Sig. < 0,05: se rechaza la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Sig. > 0,05: se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Se realizó la prueba t de Student para la muestra del barrio El Portillo, de la cual se obtuvo el estadístico $t = -0,648$; $gl = 24$ y una significación $Sig. = 0,523$ la cual es $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

También se puede observar que la diferencia de medias entre la media de la muestra y la media de la población asumida, es igual a $3,200E-9$.

Con un 95 % de confianza se puede afirmar que la media de la población se encuentra entre el rango $[6,22E-7 - 6,42E-7]$.

Tabla 4. 4. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio Pedro Antonio Flores, medidas con el permeámetro de compactación H-4146

	Estadísticas para una muestra			
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	25	7,153E-07	2,998E-08	5,996E-09

Prueba para una muestra					
Valor de prueba = 7,100E-07					
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
0,881	24	0,387	5,280E-09	-7,096E-09	1,766E-08

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis.

Ho = El centro de la población es 7,100E-07.

Significancia = 5%.

Sig. < 0.05, se rechaza la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Sig. > 0.05, se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Se realizó la prueba t de Student para la muestra del barrio Pedro Antonio Flores, de la cual se obtuvo el estadístico $t = 0,881$; $gl = 24$ y una significación Sig. = 0,387 la cual es $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

También se puede observar que la diferencia de medias entre la media de la muestra y la media de la población asumida, es igual a 5,280E-09.

Con un 95 % de confianza se puede afirmar que la media de la población se encuentra entre el rango [7,03E-07 – 7,28E-07].

Tabla 4. 5. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio San Salvador, medidas con el permeámetro de compactación H-4146

	Estadísticas para una muestra			
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	25	8,003E-07	2,447E-08	4,894E-09

Prueba para una muestral					
Valor de prueba = 7,950E-07					
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
1,077	24	0,292	5,272E-09	-4,829E-09	1,537E-08

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis.

Ho = El centro de la población es 7,950E-07.

Significancia = 5%.

Sig. < 0,05: se rechaza la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Sig. > 0,05: se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

Se realizó la prueba t de Student para la muestra del barrio San Salvador, de la cual se obtuvo el estadístico $t = 1,077$; $gl = 24$ y una significación $Sig. = 0,292$ la cual es $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis Ho con un 95 % de confianza.

También se puede observar que la diferencia de medias entre la media de la muestra y la media de la población asumida, es igual a 5,272E-09.

Con un 95 % de confianza se puede afirmar que la media de la población se encuentra entre el rango $[7,90E-07 - 8,10E-07]$.

Tabla 4. 6. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio Los Chapacos, medidas con el permeámetro de compactación H-4146

	Estadísticas para una muestra			
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	25	3,271E-07	3,480E-08	6,959E-09

Prueba para una muestra					
Valor de prueba = 3,200E-07					
T	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
1,013	24	0,321	7,052E-09	-7,311E-09	2,141E-08

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la prueba t de Student para la muestra del barrio Los Chapacos, de la cual se obtuvo el estadístico $t = 1,013$; $gl = 24$ y una significación $Sig. = 0,321$ la cual es $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_0 con un 95 % de confianza.

También se puede observar que la diferencia de medias entre la media de la muestra y la media de la población asumida, es igual a $7,052E-09$.

Con un 95 % de confianza se puede afirmar que la media de la población se encuentra entre el rango $[3,13E-07 - 3,41E-07]$.

Tabla 4. 7. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio 20 de Enero, medidas con el permeámetro de compactación H-4146

	Estadísticas para una muestra			
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	25	2,528E-07	3,251E-08	6,502E-09

Prueba para una muestral					
Valor de prueba = 2,450E-07					
T	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
1,202	24	0,241	7,816E-09	-5,603E-09	2,123E-08

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la prueba t de Student para la muestra del barrio 20 de Enero, de la cual se obtuvo el estadístico $t = 1,202$; $gl = 24$ y una significación $Sig. = 0,241$ la cual es $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_0 con un 95 % de confianza.

También se puede observar que la diferencia de medias entre la media de la muestra y la media de la población asumida, es igual a $7,816E-09$.

Con un 95 % de confianza se puede afirmar que la media de la población se encuentra entre el rango $[2,39E-07 - 2,66E-07]$.

Tabla 4. 8. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio La Florida, medidas con el permeámetro de compactación H-4146

	Estadísticas para una muestra			
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	25	2,250E-07	2,584E-08	5,168E-09

Prueba para una muestra					
Valor de prueba = 2,200E-07					
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
0,974	24	0,340	5,032E-09	-5,635E-09	1,570E-08

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la prueba t de Student para la muestra del barrio La Florida, de la cual se obtuvo el estadístico $t = 0,974$; $gl = 24$ y una significación $Sig. = 0,340$ la cual es $> 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_0 con un 95 % de confianza.

También se puede observar que la diferencia de medias entre la media de la muestra y la media de la población asumida, es igual a $5,032E-09$.

Con un 95 % de confianza se puede afirmar que la media de la población se encuentra entre el rango $[2,14E-07 - 2,36E-07]$.

4.2.2. Prueba t para muestras independientes

Tabla 4. 9. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio El Portillo, medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible

	Estadísticas de grupo				
	Grupo	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	H – 4146	15	6,292E-07	1,435E-08	3,704E-09
	Pared flexible	15	5,870E-07	2,736E-08	7,064E-09

Prueba de muestras independientes			
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	Sig.
Permeabilidad	Se asumen varianzas iguales	9,512	0,0046
	No se asumen varianzas iguales		

Prueba t para la igualdad de medias						
t	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
5,291	28	0,000	4,220E-08	7,976E-09	2,586E-08	5,854E-08
5,291	21,157	0,000	4,220E-08	7,976E-09	2,562E-08	5,878E-08

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis

Hi = Existe una diferencia significativa entre las permeabilidades medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible.

Ho = No existe una diferencia significativa entre las permeabilidades medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible.

Significancia = 5 %

Sig. < 0,05: se acepta la hipótesis Hi con una confiabilidad del 95%.

Sig. > 0,05: se rechaza la hipótesis Hi, y se acepta Ho con una confiabilidad del 95%.

Se aplicó la prueba de igualdad de varianzas mediante el método de Levene donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,0046 la cual es $< 0,05$ lo que nos indica que existe diferencias significativas entre las varianzas.

De la prueba t de Student se obtuvieron los siguientes resultados, $t = 5,291$; $gl = 21,157$ y Sig. = 0,000 el cual es $< 0,05$. Por lo cual rechazamos H_0 y aceptamos H_1 con un 95 % de confianza.

La diferencia de medias es igual a $4,22E-08$.

Tabla 4. 10. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio Pedro Antonio Flores, medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible

	Estadísticas de grupo				
	Grupo	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	H – 4146	15	7,163E-07	2,496E-08	6,446E-09
	Pared flexible	15	6,678E-07	3,305E-08	8,534E-09

Prueba de muestras independientes			
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	Sig.
Permeabilidad	Se asumen varianzas iguales	2,068	0,161
	No se asumen varianzas iguales		

Prueba t para la igualdad de medias						
T	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
4,533	28	0,000	4,848E-08	1,069E-08	2,657E-08	7,039E-08
4,533	26,051	0,000	4,848E-08	1,069E-08	2,650E-08	7,046E-08

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la prueba de igualdad de varianzas mediante el método de Levene donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,161 la cual es $> 0,05$ lo que nos indica que no existe diferencias significativas entre las varianzas.

De la prueba t de Student se obtuvieron los siguientes resultados, $t = 4,533$; $gl = 28$ y $Sig. = 0,000$ el cual es $< 0,05$. Por lo cual rechazamos H_0 y aceptamos H_1 con un 95 % de confianza.

La diferencia de medias es igual a $4,848E-08$.

Tabla 4. 11. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio San Salvador, medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible

	Estadísticas de grupo				
	Grupo	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	H – 4146	15	7,960E-07	1,994E-08	5,148E-09
	Pared flexible	15	7,642E-07	1,989E-08	5,136E-09

Prueba de muestras independientes			
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	Sig.
Permeabilidad	Se asumen varianzas iguales	0,111	0,742
	No se asumen varianzas iguales		

Prueba t para la igualdad de medias						
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
4,370	28	0,000	3,177E-08	7,272E-09	1,688E-08	4,667E-08
4,370	28	0,000	3,177E-08	7,272E-09	1,688E-08	4,667E-08

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la prueba de igual de varianzas mediante el método de Levene donde se obtuvo una significancia $Sig. = 0,742$ la cual es $> 0,05$ lo que nos indica que no existe diferencias significativas entre las varianzas.

De la prueba t de Student se obtuvieron los siguientes resultados, $t = 4,370$; $gl = 28$ y $Sig. = 0,000$ el cual es $< 0,05$. Por lo cual rechazamos H_0 y aceptamos H_1 con un 95 % de confianza.

La diferencia de medias es igual a $3,177E-08$.

Tabla 4. 12. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio Los Chapacos, medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible

	Estadísticas de grupo				
	Grupo	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	H – 4146	15	3,279E-07	2,681E-08	6,923E-09
	Pared flexible	15	3,120E-07	2,149E-08	5,548E-09

Prueba de muestras independientes			
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	Sig.
Permeabilidad	Se asumen varianzas iguales	1,391	0,248
	No se asumen varianzas iguales		

Prueba t para la igualdad de medias						
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
1,791	28	0,084	1,589E-08	8,872E-09	-2,280E-09	3,407E-08
1,791	26,732	0,085	1,589E-08	8,872E-09	-2,319E-09	3,411E-08

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la prueba de igual de varianzas mediante el método de Levene donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,248 la cual es $> 0,05$ lo que nos indica que no existe diferencias significativas entre las varianzas.

De la prueba t de Student se obtuvieron los siguientes resultados, $t = 1,791$; $gl = 28$ y Sig. = 0,084 el cual es $> 0,05$. Por lo cual aceptamos H_0 con un 95 % de confianza.

La diferencia de medias es igual a 1,589E-08.

Tabla 4. 13. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio 20 de Enero, medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible

	Estadísticas de grupo				
	Grupo	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	H – 4146	15	2,517E-07	2,326E-08	6,005E-09
	Pared flexible	15	2,173E-07	1,544E-08	3,986E-09

Prueba de muestras independientes			
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	Sig.
Permeabilidad	Se asumen varianzas iguales	2,961	0,096
	No se asumen varianzas iguales		

Prueba t para la igualdad de medias						
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
4,781	28	0,000	3,446E-08	7,207E-09	1,970E-08	4,922E-08
4,781	24,332	0,000	3,446E-08	7,207E-09	1,960E-08	4,932E-08

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la prueba de igual de varianzas mediante el método de Levene donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,096 la cual es $> 0,05$ lo que nos indica que no existe diferencias significativas entre las varianzas.

De la prueba t de Student se obtuvieron los siguientes resultados, $t = 4,781$; $gl = 28$ y Sig. = 0,000 el cual es $< 0,05$. Por lo cual rechazamos H_0 y aceptamos H_1 con un 95 % de confianza.

La diferencia de medias es igual a 3,446E-08.

Tabla 4. 14. Prueba t de Student de las permeabilidades del barrio La Florida, medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible

	Estadísticas de grupo				
	Grupo	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Permeabilidad	H – 4146	15	2,242E-07	1,816E-08	4,690E-09
	Pared flexible	15	1,724E-07	1,836E-08	4,740E-09

Prueba de muestras independientes			
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas	
		F	Sig.
Permeabilidad	Se asumen varianzas iguales	0,162	0,690
	No se asumen varianzas iguales		

Prueba t para la igualdad de medias						
t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
7,769	28	0,000	5,180E-08	6,668E-09	3,814E-08	6,546E-08
7,769	27,997	0,000	5,180E-08	6,668E-09	3,814E-08	6,546E-08

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la prueba de igual de varianzas mediante el método de Levene donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,690 la cual es $> 0,05$ lo que nos indica que no existe diferencias significativas entre las varianzas.

De la prueba t de Student se obtuvieron los siguientes resultados, $t = 7,769$; $gl = 28$ y Sig. = 0,000 el cual es $< 0,05$. Por lo cual rechazamos H_0 y aceptamos H_1 con un 95 % de confianza.

La diferencia de medias es igual a 5,180E-08.

4.3. CONFIABILIDAD

4.3.1. Coeficiente alfa de Cronbach

Tabla 4. 15. Matriz de alfa Cronbach

Ensayo	El Portillo	P. A. Flores	San Salvador	Los Chapaco	20 de Enero	La florida
1	6,383E-07	7,060E-07	8,172E-07	2,918E-07	2,417E-07	2,195E-07
2	6,460E-07	7,133E-07	8,187E-07	3,298E-07	2,373E-07	2,266E-07
3	6,540E-07	7,332E-07	8,018E-07	3,327E-07	2,505E-07	2,145E-07
4	6,490E-07	7,156E-07	8,294E-07	3,392E-07	2,482E-07	2,059E-07
5	6,460E-07	7,199E-07	8,178E-07	3,252E-07	2,565E-07	2,020E-07
6	6,247E-07	7,287E-07	7,837E-07	3,458E-07	2,249E-07	2,172E-07
7	6,153E-07	7,195E-07	7,734E-07	3,574E-07	2,129E-07	2,133E-07
8	6,234E-07	7,366E-07	7,966E-07	3,661E-07	2,364E-07	2,115E-07
9	6,258E-07	7,837E-07	8,141E-07	3,499E-07	2,266E-07	2,053E-07
10	6,346E-07	7,271E-07	7,889E-07	3,718E-07	2,461E-07	2,094E-07
11	6,119E-07	6,933E-07	7,909E-07	2,963E-07	2,681E-07	2,515E-07
12	6,248E-07	6,827E-07	7,830E-07	2,974E-07	2,849E-07	2,467E-07
13	6,158E-07	6,911E-07	7,742E-07	3,035E-07	2,806E-07	2,482E-07
14	6,203E-07	7,001E-07	7,891E-07	3,110E-07	2,911E-07	2,411E-07
15	6,092E-07	6,935E-07	7,611E-07	3,009E-07	2,704E-07	2,497E-07
16	6,813E-07	7,412E-07	8,223E-07	3,817E-07	3,078E-07	2,485E-07
17	6,661E-07	7,487E-07	8,256E-07	3,766E-07	3,008E-07	2,529E-07
18	6,707E-07	7,504E-07	8,390E-07	3,691E-07	2,967E-07	2,601E-07
19	6,737E-07	7,614E-07	8,418E-07	3,616E-07	2,922E-07	2,634E-07
20	6,495E-07	7,417E-07	8,423E-07	3,532E-07	2,788E-07	2,681E-07
21	5,961E-07	6,670E-07	7,870E-07	2,918E-07	2,293E-07	1,777E-07
22	6,135E-07	6,714E-07	7,776E-07	2,890E-07	2,209E-07	1,838E-07
23	6,064E-07	6,810E-07	7,751E-07	2,820E-07	2,147E-07	1,964E-07
24	5,942E-07	6,856E-07	7,854E-07	2,737E-07	2,031E-07	2,014E-07
25	6,044E-07	6,893E-07	7,708E-07	2,788E-07	1,999E-07	2,111E-07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 16. Coeficiente de confiabilidad alfa de Cronbach

Estadísticas de confiabilidad	
Alfa de Cronbach	N° de elementos
0,891	6

Fuente: Elaboración propia

Mediante el programa IBM SPSS se calculó el coeficiente alfa de Cronbach dando como resultado $\alpha = 0.891$.

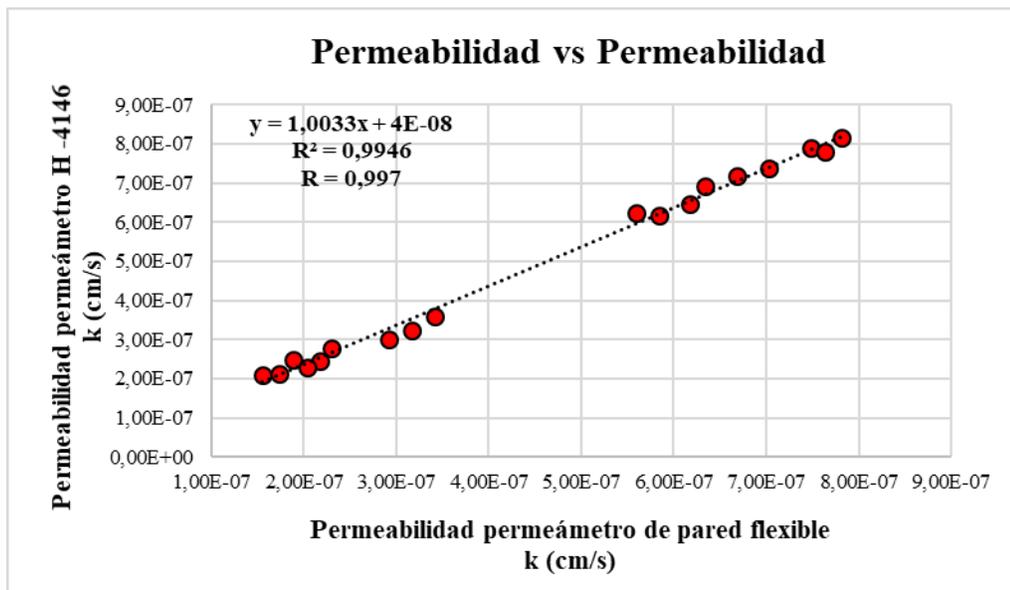
Este coeficiente de confiabilidad nos indica que el 89,1 % de la varianza empírica de la prueba se deben a la varianza verdadera, o que es lo mismo, que un 10,9 % de la varianza empírica es varianza de error.

Autores como Tavakol y Dennick, 2011; De Vellis, 2003; Streiner, 2003; Nunnally y Bernstein, 1994; Petterson, 1994 consideran que el coeficiente de confiabilidad debe estar entre 0,70 y 0,90 para que los resultados tengan una alta consistencia.

Por lo cual los resultados de permeabilidad obtenidos con el permeámetro de compactación H-4146, tienen una alta consistencia entre sí.

4.3.2. Coeficiente de forma paralelas

Grafico 4. 1. Coeficiente forma paralelas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 17. Coeficiente de confiabilidad de formas paralelas

Estadísticas de confiabilidad	
Coeficiente formas paralelas	N de elementos
0,997	2

Fuente: Elaboración propia

Mediante el paquete Microsoft Excel se calculó la correlación que existe entre los resultados de permeabilidad medidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el

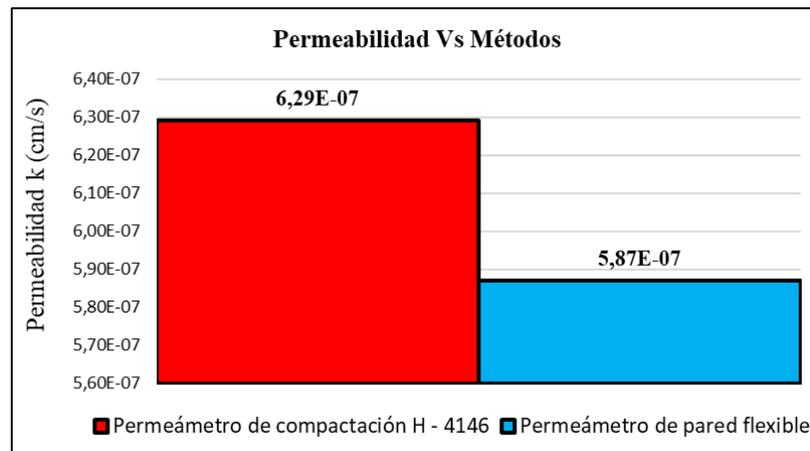
permeámetro de pared flexible dando como resultado un coeficiente de confiabilidad igual a 0,997.

Este coeficiente de confiabilidad nos indica que el 99,7 % de la varianza empírica de la prueba se deben a la varianza verdadera y el 0,3 % se debe a la varianza de error.

Lo que confirma que los resultados que de permeabilidad obtenidos con el permeámetro de compactación H-4146 son altamente confiables.

4.4. COMPARACIÓN DE LAS PERMEABILIDADES OBTENIDAS POR LOS DIFERENTES MÉTODOS

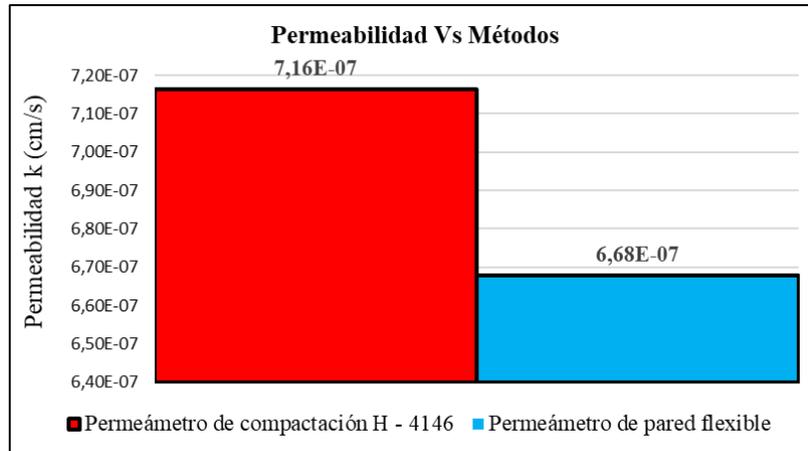
Gráfico 4. 2. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio El Portillo, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,42E-07 \text{ cm/s}$$

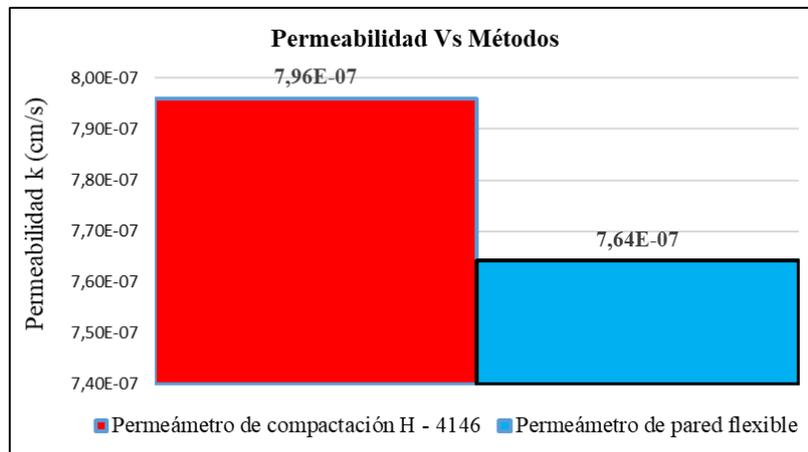
Gráfico 4. 3. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio Pedro Antonio Flores, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,48E-07 \text{ cm/s}$$

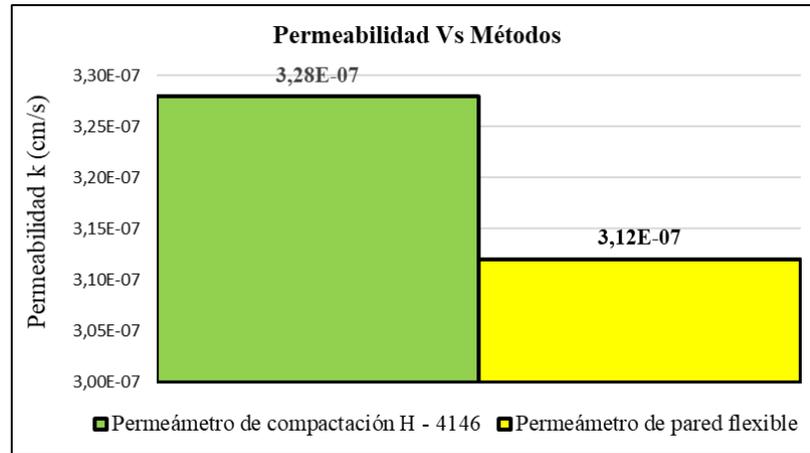
Gráfico 4. 4. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio San Salvador, arcilla inorgánica de mediana compresibilidad CL



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,31E-07 \text{ cm/s}$$

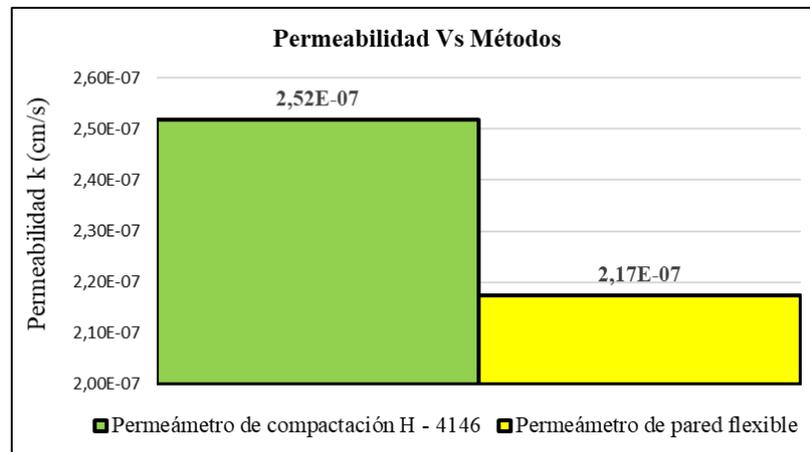
Gráfico 4. 5. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio Los Chapacos, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,15E-07 \text{ cm/s}$$

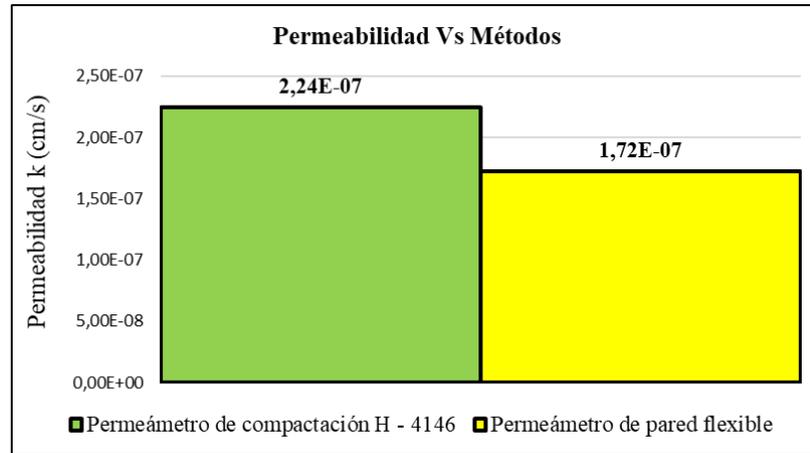
Gráfico 4. 6. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio 20 de Enero, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,34E-07 \text{ cm/s}$$

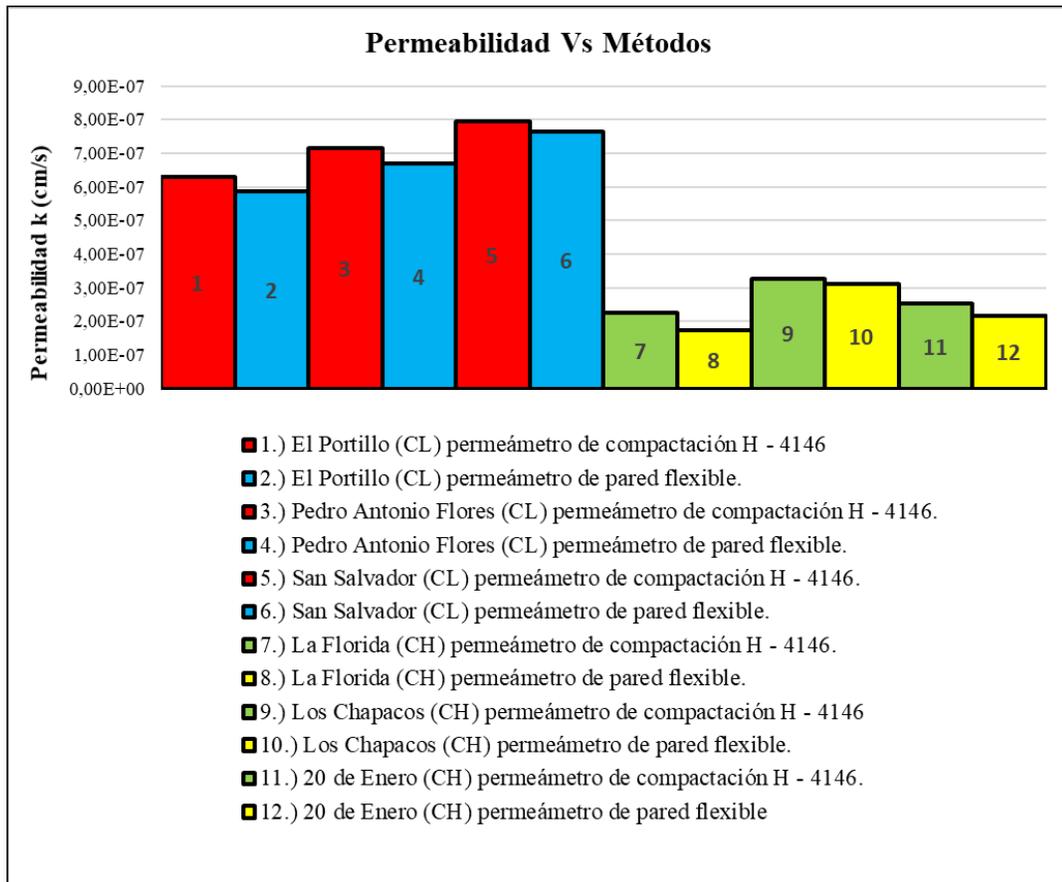
Gráfico 4. 7. Comparación de la permeabilidad obtenida por los dos métodos, barrio La Florida, arcilla inorgánica de alta compresibilidad CH



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,51E-07 \text{ cm/s}$$

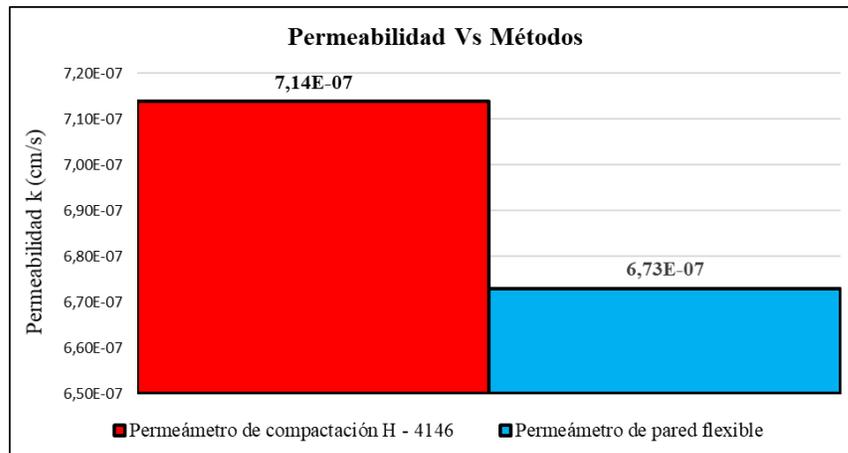
Gráfico 4. 8. Comparación general de la permeabilidad obtenida mediante el permeámetro de compactación H-4146 y permeámetro de pared flexible



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 4.8., representa la variación de la permeabilidad de todas las muestras ensayadas, determinadas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible de carga variable. Cada número en el gráfico especifica la muestra de estudio y el tipo de suelo.

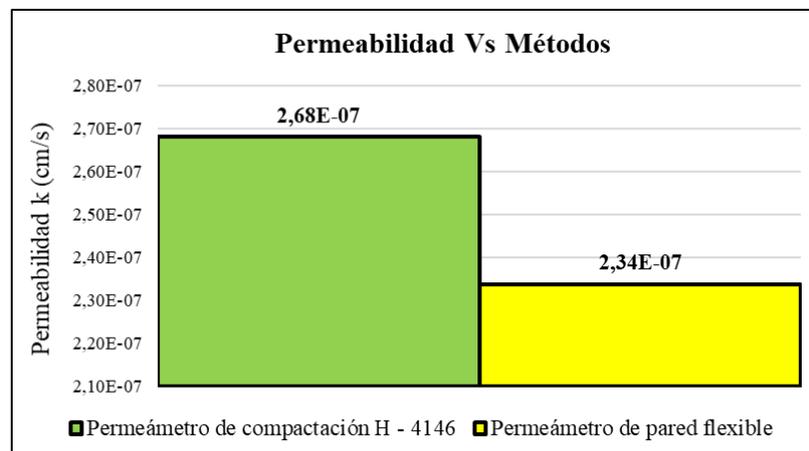
Gráfico 4. 9. Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los dos métodos, en suelos arcillosos de mediana compresibilidad (CL)



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,40E-07 \text{ cm/s}$$

Gráfico 4. 10. Comparación de la permeabilidad promedio obtenida por los dos métodos, en suelos arcillosos de alta compresibilidad (CH)



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta = 0,341E-07 \text{ cm/s}$$

Al analizar los gráficos comparativos entre las permeabilidades obtenidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible, se puede observar claramente que los suelos clasificados como CH (arcillas de alta

compresibilidad) con una permeabilidad promedio de $k = 2,68E-07$ cm/s presentan permeabilidades más pequeñas que las obtenidas de los suelos CL (arcillas de mediana compresibilidad) con una permeabilidad promedio de $k = 7,14E-07$ cm/s.

Otro punto de análisis que se pudo observar en los resultados, es que las permeabilidades medidas con el permeámetro de pared flexible son más pequeñas que las medidas con el permeámetro de compactación H-4146.

Se plantea las siguientes hipótesis, la primera fue de errores en la medición al darle un mal manejo al permeámetro de pared flexible, esta queda descartada ya que todos los resultados son más pequeños que los medidos con el permeámetro de compactación H - 4146.

La segunda hipótesis la cual es más certera, es que la variación se debe a la naturaleza del molde de los permeámetros, presentando mayor rugosidad el permeámetro de compactación H – 4146, el cual provoca una reducción en la cantidad de partículas que obstruyen el paso del agua provocando una disminución en la resistencia al flujo.

4.5. REGRESIÓN Y CORRELACIÓN

4.5.1. Correlación

Tabla 4. 18. Correlación Pearson entre permeabilidad y densidad

Correlación			
		Permeabilidad	Densidad
Permeabilidad	Correlación de Pearson	1	0,979**
	Sig. (bilateral)		0,00
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	1,608E-12	4,418E-07
	Covarianza	5,545E-14	1,524E-08
	N	30	30
Densidad	Correlación de Pearson	0,979**	1
	Sig. (bilateral)	0,00	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	4,418E-07	1,267E-01
	Covarianza	1,524E-08	4,369E-03
	N	30	30
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).			

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis.

Ho = No existe correlación entre la densidad y permeabilidad.

Hi = Existe correlación entre la densidad y permeabilidad.

Significancia = 5 %.

Se aplicó la prueba de hipótesis de correlación de Pearson donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,00 la cual es $< 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis Hi con un 95 % de confianza, afirmando que si existe correlación entre la densidad y la permeabilidad.

El valor del coeficiente de correlación de Pearson es $R = 0,979$; el cual indica que existe una correlación positiva muy fuerte.

Tabla 4. 19. Correlación Spearman entre permeabilidad y densidad

Correlaciones				
Rho de Spearman	Permeabilidad	Coeficiente de correlación	1	,950**
		Sig. (bilateral)		0,000
		N	30	30
	Densidad	Coeficiente de correlación	,950**	1
		Sig. (bilateral)	0,000	
		N	30	30
**. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).				

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó la prueba de hipótesis de correlación de Rho de Spearman donde se obtuvo una significancia Sig. = 0,00 la cual es $< 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis Hi con un 95 % de confianza, afirmando que si existe correlación entre la densidad y la permeabilidad.

El valor del coeficiente de correlación de Spearman es $Rho = 0,950$; el cual indica que existe una muy buena correlación positiva.

4.5.2. Regresión

Lineal.

Tabla 4. 20. Regresión lineal entre permeabilidad y densidad

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,979	0,958	0,957	0,000
La variable independiente es Densidad.			

ANOVA					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1,541E-12	1	1,541E-12	639,379	0,000
Residuo	6,747E-14	28	2,410E-15		
Total	1,608E-12	29			
La variable independiente es Densidad.					

Coeficientes			
	Coeficientes no estandarizados	Coeficientes estandarizados	
	B	Desv. Error	Beta
Densidad	3,487E-06	0,000	0,979
(Constante)	-5,546E-06	0,000	

Fuente: Elaboración propia

Se realizó una regresión lineal a la variable permeabilidad en función a la densidad, donde se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,958$ el cual indica que el 95,8 % de la variación de la permeabilidad esta explicada por la densidad.

El coeficiente de Pearson es $R = 0,979$ el cual indica que existe una correlación positiva muy fuerte.

El error estándar de estimación es igual a 0,00 lo que representa una medida de la parte de la variabilidad de la permeabilidad.

Hipótesis para la prueba ANOVA.

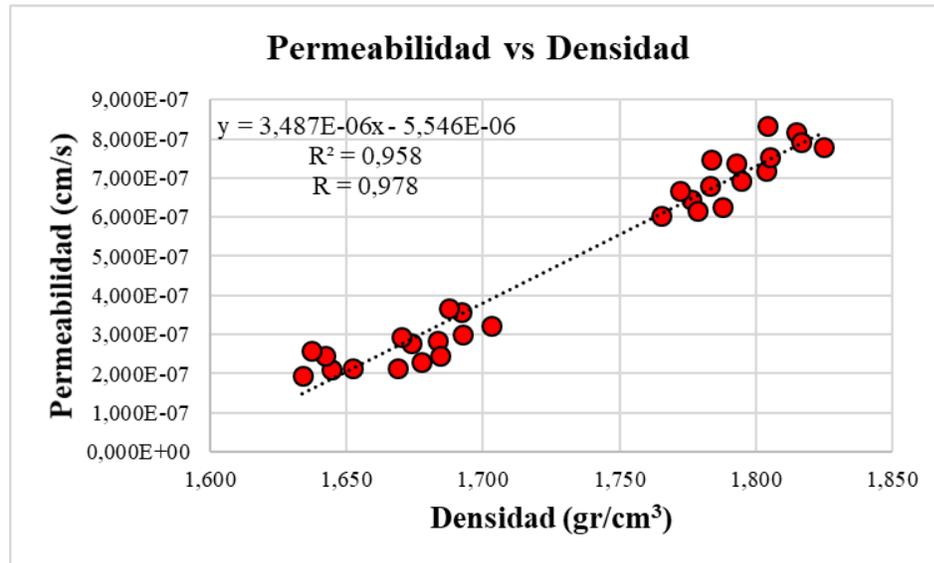
H_0 = El coeficiente de correlación Pearson es $R = 0$.

H_1 = El coeficiente de correlación Pearson es $R > 0$.

Significancia = 5%.

Se realizó la prueba de ANOVA, de la cual se obtuvo $F = 639,379$ y un valor de significancia $\text{Sig.} = 0,00$ la cual es $< 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_i con un 95 % de confianza, por lo que se concluye que las variables están linealmente relacionadas.

Gráfico 4. 11. Regresión lineal entre permeabilidad y densidad



Fuente: Elaboración propia

Logarítmica.

Tabla 4. 21. Regresión logarítmica entre permeabilidad y densidad

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,978	0,956	0,954	0,000
La variable independiente es Densidad.			

ANOVA					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1,537E-12	1	1,537E-12	606,089	0,000
Residuo	7,101E-14	28	2,536E-15		
Total	1,608E-12	29			
La variable independiente es Densidad.					

Coeficientes			
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados
	B	Desv. Error	Beta
ln(Densidad)	6,019E-06	0,000	0,978
(Constante)	-2,809E-06	0,000	

Fuente; Elaboración propia

Se realizó una regresión logarítmica a la variable permeabilidad en función a la densidad, donde se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,956$ el cual indica que el 95,6 % de la variación de la permeabilidad esta explicada por la densidad.

El coeficiente de Pearson es $R = 0,978$ el cual indica que existe una correlación positiva muy fuerte.

El error estándar de estimación es igual a 0,00 lo que representa una medida de la parte de la variabilidad de la permeabilidad.

Hipótesis para la prueba ANOVA.

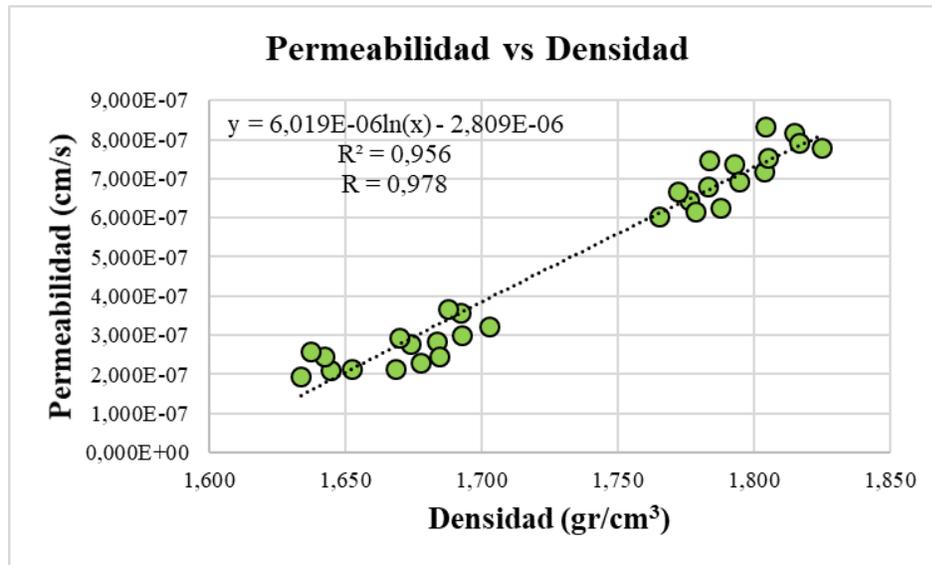
H_0 = El coeficiente de correlación Pearson es $R = 0$.

H_1 = El coeficiente de correlación Pearson es $R > 0$.

Significancia = 5%.

Se realizó la prueba de ANOVA, de la cual se obtuvo $F = 606,089$ y un valor de significancia $\text{Sig.} = 0,00$ la cual es $< 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_i con un 95 % de confianza, por lo que se concluye que las variables están logarítmicamente relacionadas.

Gráfico 4. 12. Regresión logarítmica entre permeabilidad y densidad



Fuente: Elaboración propia

Potencial

Tabla 4. 22. Regresión potencial entre permeabilidad y densidad

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,977	0,955	0,953	0,114
La variable independiente es Densidad.			

ANOVA					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	7,720	1	7,720	594,987	0,000
Residuo	0,363	28	0,013		
Total	8,083	29			
La variable independiente es Densidad.					

Coefficientes					
	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes estandarizados	T	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
ln(Densidad)	13,489	0,553	0,977	24,392	0,000
(Constante)	2,655E-10	8,069E-11			

Fuente: Elaboración propia

Se realizó una regresión potencial a la variable permeabilidad en función a la densidad, donde se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,955$ el cual indica que el 95,5 % de la variación de la permeabilidad esta explicada por la densidad.

El coeficiente de Pearson es $R = 0,977$ el cual indica que existe una correlación positiva muy fuerte.

El error estándar de estimación es igual a 0,114 lo que representa una medida de la parte de la variabilidad de la permeabilidad.

Hipótesis para la prueba ANOVA.

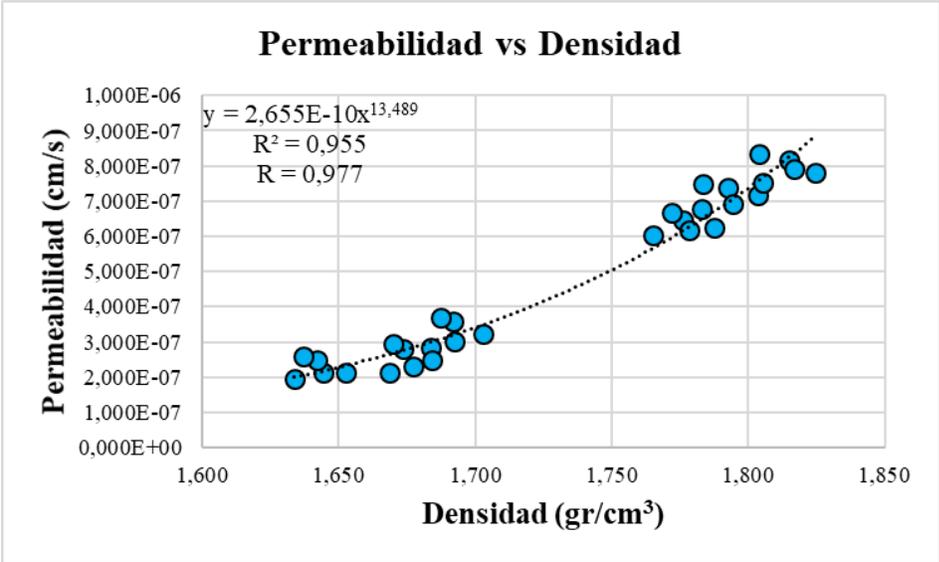
H_0 = El coeficiente de correlación Pearson es $R = 0$.

H_1 = El coeficiente de correlación Pearson es $R > 0$.

Significancia = 5%.

Se realizó la prueba de ANOVA, de la cual se obtuvo $F = 594,987$ y un valor de significancia $\text{Sig.} = 0,00$ la cual es $< 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_i con un 95 % de confianza, por lo que se concluye que las variables están potencialmente relacionadas.

Gráfico 4. 13. Regresión potencial entre permeabilidad y densidad



Fuente: Elaboración propia

Exponencial

Tabla 4. 23. Regresión exponencial entre permeabilidad y densidad

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,977	0,955	0,954	0,114
La variable independiente es Densidad.			

ANOVA					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	7,720	1	7,720	595,718	0,000
Residuo	0,363	28	0,013		
Total	8,083	29			
La variable independiente es Densidad.					

Coeficientes					
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	T	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
Densidad	7,806	0,320	0,977	24,407	0,000
(Constante)	5,840E-13	3,236E-13			

Fuente: Elaboración propia

Se realizó una regresión exponencial a la variable permeabilidad en función a la densidad, donde se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,955$ el cual indica que el 95,5 % de la variación de la permeabilidad esta explicada por la densidad.

El coeficiente de Pearson es $R = 0,977$ el cual indica que existe una correlación positiva muy fuerte.

El error estándar de estimación es igual a 0,114 lo que representa una medida de la parte de la variabilidad de la permeabilidad.

Hipótesis para la prueba ANOVA.

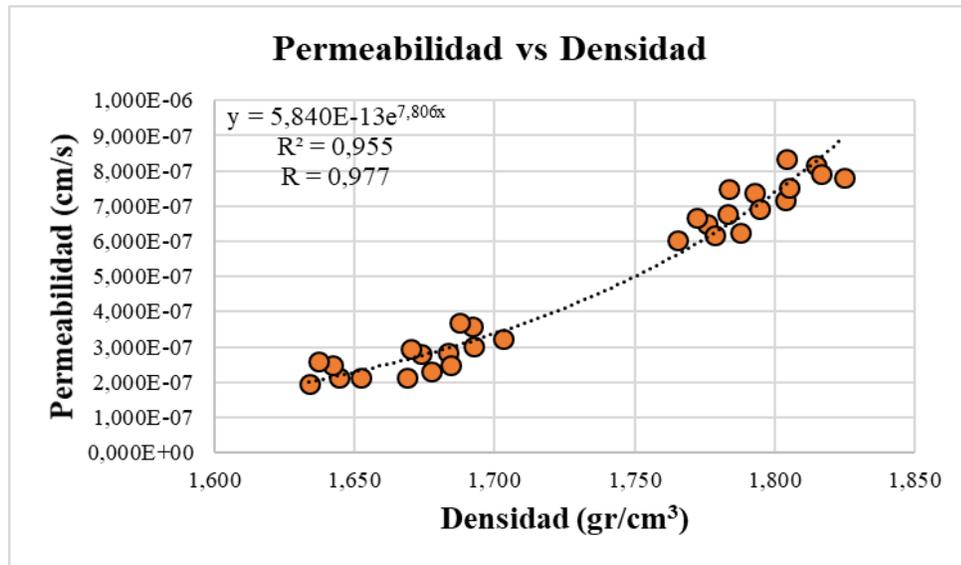
H_0 = El coeficiente de correlación Pearson es $R = 0$.

H_1 = El coeficiente de correlación Pearson es $R > 0$.

Significancia = 0,05

Se realizó la prueba de ANOVA, de la cual se obtuvo $F = 595,718$ y un valor de significancia $\text{Sig.} = 0,00$ la cual es $< 0,05$ por lo que se acepta la hipótesis H_i con un 95 % de confianza, por lo que se concluye que las variables están exponencialmente relacionadas.

Gráfico 4. 14. Regresión exponencial entre permeabilidad y densidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 24. Comparación de regresiones

Regresión	R	R ²	Error estándar de la estimación
Lineal	0,979	0,958	0,000
Logarítmica	0,978	0,956	0,000
Exponencial	0,977	0,955	0,114
Potencial	0,977	0,955	0,114

Fuente: Elaboración propia

Después de haber realizado el análisis estadístico de los resultados de permeabilidad y densidad obtenidos en laboratorio, se obtiene una alta correlación de Pearson entre ambas variables, siendo todos los $R > 0,95$ en los 4 modelos de regresión que se utilizó (lineal, logarítmica, exponencial y potencial), por lo cual se demuestra la consistencia de los resultados obtenidos con el permeámetro de compactación H-4146, cumpliendo la hipótesis planteada en la investigación.

De las gráficas se puede observar que mientras más denso sea el tipo de suelo, este es más permeable, es por eso que las arcillas CL que tienen partículas más gruesas, son más permeables que las arcillas CH que tiene partículas más finas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Después de haber realizado la investigación mediante determinados ensayos de laboratorio y haber analizado los resultados obtenidos, se llega a las siguientes conclusiones:

- El grado de confiabilidad de los resultados de permeabilidad obtenidos con el permeámetro de compactación H – 4146 son los siguientes: coeficiente alfa de Cronbach = 0,891 y coeficiente de formas paralelas = 0,997, lo cual indica que existe una alta consistencia en las mediciones de permeabilidad.
- En los 4 modelos de regresión (lineal, logarítmica, exponencial y potencial) se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0,95 por lo tanto existe una alta correlación entre la permeabilidad y la densidad máxima correspondiente a cada muestra de suelo arcilloso, con lo cual se demuestra la confiabilidad de los resultados obtenidos con el permeámetro de compactación H – 4146.
- Se proporciona gráficas y ecuaciones que relacionan la permeabilidad con la densidad máxima de cada muestra ensayada en laboratorio, a través de las cuales se puede seleccionar de manera rápida, ágil y practica un banco de arcilla para la construcción de una presa, bajo el criterio de la permeabilidad que tendrá el conglomerado arcilloso.
- Se realizó la guía de ensayo de laboratorio del permeámetro de compactación H – 4146, mediante un reporte fotográfico e indicaciones, la cual permitirá la correcta ejecución de la prueba al momento de determinar la permeabilidad de un suelo. La guía de ensayo de laboratorio se encuentra ubicada en el ANEXO V.
- Después de realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos entre el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible de carga variable, se obtuvieron las siguientes variaciones promedio de permeabilidad:

En arcillas inorgánicas de mediana compresibilidad $\Delta = 4,08E-08$ cm/s.

En arcillas inorgánicas de alta compresibilidad $\Delta = 3,41E-08$ cm/s.

Generando una variación porcentual entre ambos equipos $VP = 9,22 \%$.

- Las variaciones de permeabilidades obtenidas con el permeámetro de compactación H-4146 y el permeámetro de pared flexible, se debe a la rugosidad del material del molde de cada equipo, donde se puede afirmar que mientras más rugoso sea el material que entra en contacto con el suelo ensayado, mayor será la disminución en la resistencia al flujo. Es por esto que al ser el molde del permeámetro de compactación H-4146, de hierro, este tiene una mayor rugosidad, lo cual reduce la cantidad de partículas que obstruyen el paso del agua. Esto se pudo comprobar en laboratorio, ya que el permeámetro analizado proporcionó permeabilidades más grandes que el permeámetro de pared flexible.
- De los resultados se determinó las permeabilidades que pueden ser utilizadas como referencia, dando como valores promedios para suelos CH permeabilidades de $2,67E-07$ cm/s y para suelos CL permeabilidades de $7,13E-07$ cm/s, para las condiciones utilizadas en laboratorio.

5.2. RECOMENDACIONES

Después de haber realizado la investigación mediante determinados ensayos en laboratorio, se puede brindar las siguientes recomendaciones:

- Al momento de compactar la muestra a ensayar, se debe utilizar la base del molde T180, debido a que la base del permeámetro de compactación H - 4146 es de aluminio, y si aplicamos cierta energía al suelo, esta podría sufrir daños irreversibles.
- La muestra de suelo a ensayar, debe de estar saturada, dicho procedimiento se puede realizar sumergiendo las muestras en contenedores de agua con la mayor altura de carga posible. Todo esto para apresurar tiempo de saturación en el caso de suelos arcillosos.
- Uno de los mayores problemas al realizar la prueba, es la formación de burbujas de aire en el trayecto del agua, lo cual puede influir al momento de medir la permeabilidad de un suelo. Para minimizar este efecto se debe utilizar la válvula de escape de aire del equipo en todas las mediciones.

- Para la manipulación del permeámetro de compactación H-4146 y el procesamiento de datos obtenidos en el laboratorio, se provee en la presente investigación; la guía de ensayo de laboratorio ubicada en el ANEXO V y la norma ASTM D5856 ubicada en el ANEXO I, las cuales son recomendadas a utilizar, a laboratoristas, al momento de realizar los ensayos de permeabilidad de un suelo.
- Para futuras investigaciones, se recomienda analizar el comportamiento de la permeabilidad de una muestra de suelo arcilloso compactado a diferentes energías, lo cual permitirá reflejar la respuesta de esta propiedad frente a la acción del agua en la construcción de una presa de tierra.