

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los suelos expansivos resultan un problema para el ámbito de la construcción, siendo objeto de estudio en diversas investigaciones y artículos científicos en todo el mundo.

G. Wiseman, A. Komornik, y J. Greenstein (1985), realizaron un artículo científico referido a la “Experiencia con caminos y edificaciones sobre arcillas expansivas”, mismo en el que se analiza que los procedimientos usados para diseñar estructuras seguras y económicas para resistir la deformación inducida por carga son inadecuados para el diseño de caminos y edificios en arcillas expansivas, porque en estas arcillas el aumento de humedad provoca no solo una disminución de la resistencia, sino también una expansión del volumen que da como resultado edificios agrietados y pavimentos irregulares. Y en este artículo científico sugiere realizar un ensayo de hinchamiento unidimensional en laboratorio mediante el equipo del edómetro, para suelos arcillosos.

M.Sc. Llsandro Beltran Moreno (1991) realizó una investigación denominada “Expansión de los suelos arcillosos parcialmente saturados” en donde analiza los factores que influyen sobre la expansividad de suelos arcillosos parcialmente saturados. Concluye que el comportamiento expansivo de un suelo arcilloso se produce durante y después de terminada la construcción de una obra; que en los depósitos de suelos arcillosos parcialmente saturados, las expansiones responden a las disminuciones que se produce en los esfuerzos efectivos y que las condiciones impuestas por el medioambiente como el clima, que definen y limitan la expansión real que pueda presentar un depósito de suelo.

Costas Georghiou, Michael W. O'Neill. y Osman I. Ghazzaly (1985) estudiaron “Caracterización espacial de arcilla expansiva”, en donde se estudió un sitio en el que se iba a construir un edificio mediante la realización de un gran número de pruebas de pH y límite de Atterberg en muestras de suelo y en pruebas de resistividad in situ en un modelo de mueca rontour plotá w9r9 para intentar identificar zonas de altos y bajos gradientes de potencial de expansión y expansión horizontal. El estudio concluyó en que no se pudo

encontrar una correlación obvia entre PI y pH, la resistividad no era un indicador adecuado en el sitio de estudio.

Mohamed A, El Sohby, Sayyed A. Rabba, y Ossama Mazen (1985) realizó un estudio sobre el “Papel de la composición mineralógica en la actividad de suelos expansivos”, donde se utilizó el conocimiento de microestructura y composición de suelos arcillosos expansivos para evaluar la actividad definida por varios investigadores. Concluye que la fórmula propuesta por Skempton está directamente relacionado con el contenido de arcilla y el uso a ciegas de esta fórmula podría producir resultados poco fiables; el conocimiento de la mineralogía de suelos y rocas juega un papel importante en la comprensión de la mecánica y comportamiento de estos materiales.

El estudio de los suelos expansivos es esencial para determinar el comportamiento de una masa de suelo, porque estos suelos tienen un contenido de arcilla, el cual debido a cambios de humedad y a su alta capacidad para absorber y liberar agua, presenta un cambio volumétrico. Esto puede dar lugar a una expansión y contracción significativa del suelo sobre el que se apoyan las diferentes obras civiles y provocan, en la mayoría de los casos, daños estructurales importantes.

El desarrollo urbano de la ciudad de Tarija está en crecimiento y se está expandiendo hacia nuevos terrenos, donde no existe registro, ni experiencia previa en cuanto al tipo y comportamiento del suelo del lugar, incluida la presencia de arcillas expansivas; siendo necesaria la identificación de estos suelos con posibles problemas expansivos.

El presente trabajo de investigación tiene el objetivo de detectar experimentalmente la expansividad en suelos cohesivos en varios lugares de la ciudad de Tarija (Nueva Terminal, Moto Méndez, San Blas, Villa Avaroa, Lourdes, Fray Quebracho, Miraflores, Germán Buch y otros), por distintos métodos para luego realizar una comparación entre los mismos. Los métodos para la detección de suelos expansivos que se usará para este trabajo de investigación son los siguientes: Límite líquido, índice de plasticidad, mediante carta de actividad de la norma E.050 y prueba de edómetro.

Este trabajo de investigación permitirá identificar cuál de los métodos en estudio es más eficiente para predecir satisfactoriamente la expansividad detectada en los suelos,

basándose en los resultados de los ensayos realizados, sirviendo como referencia para implementar dichos métodos en la detección de suelos expansivos en subrasantes y otras obras civiles.

1.2. Situación problemática

Los suelos expansivos se encuentran ampliamente en áreas tropicales. La presencia de suelos expansivos afecta en gran medida las actividades de construcción en muchas partes del sudoeste de los Estados Unidos, América del Sur, Canadá, África, Australia, Europa, India, China y Oriente Medio. Cada vez se descubren más regiones de suelos expansivos cada año con un aumento en la cantidad de actividades de construcción, particularmente en las naciones subdesarrolladas (Sridharan & Prakash, 2000).

En la ciudad de Tarija en estos últimos años, por el crecimiento demográfico de la población ante la necesidad de adquirir nuevos terrenos para construcción de viviendas, apertura de calles y caminos, mismos que pueden contener suelos expansivos, llegando a ser un potencial problema para las obras civiles que se vayan a realizar en los diferentes barrios de la ciudad de Tarija.

1.2.1. Problema

¿Cómo determinar la eficiencia para clasificar los suelos expansivos entre los métodos de límite líquido, índice de plasticidad, carta de actividad de la norma E050 y prueba de edómetro, en la ciudad de Tarija?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

Al comparar los procedimientos para la clasificación de suelos expansivos presentados por esta investigación, se tendrá un impacto en la construcción, debido a que los suelos expansivos representan un desafío significativo en la construcción de infraestructuras, ya que su comportamiento puede causar daños en estructuras y provocar costosos problemas de mantenimiento. Y en la ciudad de Tarija se tiene una gran cantidad de suelos finos por lo que es de relevancia realizar una la investigación de procedimientos que puedan clasificar los suelos expansivos. Al encontrar el método más eficiente para clasificar estos suelos permitiría tomar medidas preventivas adecuadas y minimizar los riesgos en el diseño y construcción de proyectos.

La investigación sobre la comparación de procedimientos para la clasificación de suelos expansivos es factible debido a que en la ciudad de Tarija existe una gran cantidad de suelos finos.

Hay una variedad de tecnologías y herramientas disponibles para llevar a cabo pruebas y análisis de suelos expansivos, mismas que no requieren una sofisticación instrumental. Esto facilita la recopilación de datos y la comparación de los procedimientos existentes.

Los resultados de la investigación tendrán un impacto práctico con beneficios directos en la industria de la construcción. Esto fomenta el interés y el apoyo para llevar a cabo este trabajo de investigación.

La presente investigación es factible debido a la disponibilidad de suelos cohesivos, tecnología y el impacto práctico que se espera obtener.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

La delimitación temporal y espacial establece los límites en términos de tiempo y espacio dentro de los cuales se llevará a cabo el presente trabajo de investigación.

- Delimitación temporal: El estudio se llevará a cabo durante un periodo de 1 año, desde julio del 2022 hasta julio del 2023.
- Delimitación espacial: El estudio se centrará en la ciudad de Tarija, y se tomarán en cuenta los suelos expansivos presentes en esta área a través de un muestreo.

1.3. Justificación

Los suelos expansivos causan daños significativos y afectan a todo tipo de obras civiles siendo un problema a nivel mundial, razón por la cual es necesario realizar estudios a estos suelos. El clima es un factor importante que influye a la expansión de este tipo de suelo y la ciudad de Tarija presenta variaciones de humedad lo que hace posible que estos cambios volumétricos se den lugar en las zonas con presencia de suelos expansivos.

Aunque existen varios métodos establecidos para la clasificación de suelos expansivos, puede haber una falta de comparación directa entre ellos. Realizar esta investigación permitiría cerrar esta brecha de conocimiento y proporcionar una evaluación más

completa mediante una comparación entre los métodos propuestos para determinar su eficiencia.

Los suelos expansivos representan un desafío para la construcción de estructuras estables y duraderas. Al determinar el método más eficiente para su clasificación, se puede mejorar la calidad y seguridad de las construcciones al adaptar los diseños y medidas preventivas adecuadas a las características del suelo.

Los resultados de esta investigación tendrán una aplicación directa en la industria de la construcción. Los profesionales y empresas del sector podrán utilizar el método más eficiente para la clasificación de suelos expansivos, lo que mejorará la seguridad reduciendo los riesgos y garantizará la calidad de las estructuras construidas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Comparar los procedimientos para determinar la expansión a través del límite líquido, el índice de plasticidad, la carta de actividad de norma E050 y la prueba de edómetro; para determinar eficiencia de cada uno de los procedimientos en los suelos en la ciudad de Tarija.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar muestreo de suelos expansivos en diferentes lugares de la ciudad de Tarija.
- Caracterizar mediante ensayos índices (granulometría, hidrómetro, límites líquido y plástico) las muestras de suelos en estudio.
- Realizar el ensayo edómetro para determinar la expansividad de las muestras de suelo.
- Determinar la expansividad de suelos cohesivos de varios lugares de ciudad de Tarija.
- Comparar los resultados obtenidos entre los procedimientos.
- Comparar los procedimientos respecto a un método patrón.
- Validar los resultados.

1.5. Hipótesis

Si se realiza una comparación entre los procedimientos para la clasificación de suelos expansivos, se determinará el procedimiento más eficiente.

1.6. Operacionalización de las variables

En el presente trabajo se realizará la operacionalización de las variables para definir y especificar cómo se medirá o cuantificará cada una de las variables que forman parte del estudio.

1.6.1. Variables independientes

- Límite líquido.
- Límite plástico.
- Porcentaje de arcilla en el suelo.
- Presión aplicada.
- Contenido de humedad.

1.6.2. Variables dependientes

- Grado de expansión del suelo.

En la siguiente tabla se muestra las variables dependientes e independientes respecto a cada método.

Tabla 1.1. Variables dependientes e independientes

Variables	
Dependientes	Independientes
Grado de expansión del suelo	Límite líquido
Grado de expansión del suelo	Límite líquido y límite plástico
Potencial expansión	Índice plástico y el porcentaje de arcilla
Grado de expansión del suelo	Presión aplicada y contenido de humedad.

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

Se realizará un tipo de investigación experimental y descriptiva.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

Es necesario definir los componentes del estudio metodológico para una mayor comprensión e implementación adecuada de este trabajo de investigación.

1.8.1. Unidad de estudio

En el presente proyecto de investigación, la unidad de estudio es el procedimiento más eficiente para la clasificación de suelos expansivos en la ciudad de Tarija.

1.8.2. Población

La población que viene a ser el conjunto total de suelos expansivos de la ciudad de Tarija.

1.8.3. Muestra

Dado que rara vez se puede medir la totalidad de la población, se opta por elegir una muestra. En el presente proyecto de investigación, la muestra elegida es el suelo expansivo de varias zonas de la ciudad de Tarija. El objetivo fundamental de elegir una muestra es permitir aprender algo sobre la población y sirve como auxiliar para tomar una decisión.

1.8.4. Selección de técnicas de muestreo

El muestreo de suelos expansivos es necesario porque es imposible medir la totalidad de la población suelos expansivos de la ciudad de Tarija. En realidad, el análisis de la población total puede no producir resultados más exactos que el del muestreo. Se ha demostrado que el realizar una revisión 100% en forma manual no da resultados tan precisos como el muestreo.

Existen varios tipos de técnicas de muestreo para obtener una muestra representativa de una población, entre ellas están: Muestreo aleatorio simple, muestreo estratificado, muestreo por conglomerados, muestreo sistemático, entre otros.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

El método y técnica empleadas me permitirá obtener una muestra que sea representativa de la población objetivo de suelos expansivos.

1.9.1. Métodos

Para poner en marcha el método en el presente proyecto de investigación “Comparación de procedimientos para la clasificación de suelos expansivos”, se utilizará el método experimental o cuasi experimental, eligiendo aleatoriamente un tamaño de muestra de 15 muestras de suelos expansivos, estableciéndose un tipo de plan de muestreo sencillo. La muestra escogida será tal que tienda a parecerse o a representar a toda la población de suelos expansivos de la ciudad de Tarija.

1.9.2. Técnicas

La técnica de muestreo que se utilizarán en el presente trabajo de investigación es el muestreo aleatorio simple, donde cada miembro de la población tiene una probabilidad igual de ser seleccionado para formar parte de la muestra.

Una vez realizado el muestreo de los suelos expansivos de diferentes lugares de la ciudad de Tarija, se realizará ensayos de laboratorio como granulometría, hidrómetro, peso específico, límites de consistencia y ensayo de edómetro, para luego determinar el grado de expansión de las muestras y finalmente realizar una comparación entre los resultados obtenidos de los procedimientos para la clasificación de suelos expansivos y así determinar el método más eficiente.

1.9.3. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

En el presente proyecto de investigación “Comparación de procedimientos para la clasificación de suelos expansivos”, se aplicará la estadística inductiva, cuyo objeto es, a partir de una determinada cantidad de datos (muestra), obtener una conclusión importante acerca de una mayor cantidad de datos (población).

1.9.4. Alcance de la investigación

Esta investigación se centra en comparar diferentes procedimientos utilizados para la clasificación de suelos expansivos. Se analizará y evaluarán los métodos escogidos en términos de su eficiencia para clasificar los suelos expansivos.

El alcance de esta investigación podría estar limitado a una región o ubicación geográfica específica afectada por suelos expansivos, debido a que el presente trabajo de investigación se realizó para la ciudad de Tarija. Esto permitiría tener en cuenta las características y condiciones locales que podrían influir en la eficiencia de los procedimientos de clasificación.

La investigación se realizará con un tamaño de 15 muestras e incluirá un análisis comparativo de los resultados obtenidos de los diferentes procedimientos evaluados. Se identificaría el método más eficiente en función de los criterios establecidos y se proporcionarían conclusiones basadas en la comparación realizada.

Con la determinación método adecuado de detección de suelos expansivos se permitirá prever daños en las fundaciones de las edificaciones y en los pavimentos. Permitiendo establecer un método con resultados más fiables, además de determinar cuan expansivo es el suelo en varios lugares de la ciudad de Tarija. Siendo de esta manera el presente trabajo de investigación un gran aporte para la buena ejecución de proyectos de obras civiles.

CAPÍTULO II

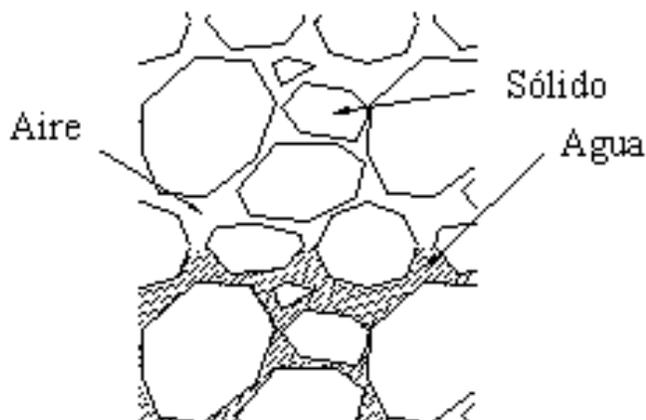
BASE TEÓRICA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

2.1. Suelo

Para propósitos de ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y con cimientos estructurales. Por lo tanto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como el origen, la distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga.

Los granos minerales que forman la fase sólida de un agregado del suelo son el producto de la intemperización y la erosión de la roca. El tamaño de los granos individuales varía en un amplio intervalo. Muchas de las propiedades físicas del suelo son dictadas por el tamaño, la forma y la composición química de los granos. Para entender mejor estos factores, uno debe estar familiarizado con los tipos de roca que forman la corteza terrestre. Con base en su origen, las rocas se pueden dividir en tres tipos básicos: ígneas, sedimentarias y metamórficas (Braja M. Das, 2013).

Figura 2.1. Suelo.



Fuente: Página ingenierocivilinfo.com

2.2. Meteorización

La meteorización de rocas y suelos es un proceso destructivo donde los desechos de varios tamaños y composiciones se forman. Las nuevas composiciones suelen ser más estables que el anterior e implican una disminución de la energía interna de los materiales. A medida que la erosión mueve la superficie del suelo hacia abajo, presiones y temperaturas en las rocas se reducen, por lo que entonces poseen una energía interna por encima de la del equilibrio en el nuevo ambiente. Esto, junto con la exposición a la atmósfera, el agua y diversas sustancias químicas y biológicas. agentes, da lugar a procesos de alteración.

Una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos actúan para descomponer las masas rocosas. Los procesos físicos reducen el tamaño de las partículas, aumentan el área superficial y aumentar el volumen a granel. Los procesos químicos y biológicos pueden causar cambios completos tanto en los aspectos físicos como en las propiedades químicas (Mitchell & Soga, 2005).

La meteorización o intemperismo es el proceso de descomposición de las rocas por procesos mecánicos y químicos en fragmentos más pequeños. La meteorización mecánica puede ser causada por la expansión y contracción de las rocas a partir de la ganancia y la pérdida continua de calor, que da lugar a la desintegración final. Con frecuencia el agua se filtra en los poros y fisuras existentes en las rocas. A medida que la temperatura desciende, el agua se congela y se expande. La presión ejercida por el hielo debido a la expansión de volumen es lo suficientemente fuerte como para romper incluso rocas de gran tamaño. Otros agentes físicos que ayudan a desintegrar las rocas son los glaciares (de hielo), el viento, el agua de los arroyos y ríos, y las olas del mar. Es importante darse cuenta que, en la meteorización mecánica, rocas grandes se descomponen en partes más pequeñas sin ningún cambio en la composición química (Braja M. Das, 2013).

Según Mitchell & Soga (2005), los procesos de meteorización física son generalmente los precursores de la meteorización química. Sus principales contribuciones son aflojar macizos rocosos, reducir el tamaño de las partículas, y aumentar el área de superficie disponible para el ataque químico.

Los procesos de meteorización física provocan averías in situ sin cambio químico. Cinco procesos son importantes:

- Descarga. Pueden formarse grietas y juntas para profundidades de cientos de metros bajo tierra superficie cuando la presión de confinamiento efectiva es reducida. La reducción en la presión de confinamiento puede resultar del levantamiento, erosión o cambios en la presión del fluido. La exfoliación es el desconchado o desprendimiento de capas superficiales de rocas. Puede ocurrir exfoliación durante la excavación de rocas y túneles. El término estallido de roca se usa para describir el desprendimiento repentino de losas de roca como resultado de la liberación de tensión.
- Expansión y contracción térmica. Los efectos del rango de expansión y contracción térmica de la creación de planos de debilidad de las tensiones ya presente en una roca para completar la fractura.
Heladas repetidas e insolación (calefacción diurna) puede ser importante en algunas áreas desérticas. Los incendios pueden provocar un aumento muy rápido de la temperatura y la roca meteorización.
- Crecimiento de cristales, incluida la acción de las heladas presiones de cristalización de las sales y la presión asociado con la congelación del agua en condiciones saturadas las rocas pueden causar una desintegración significativa. Muchos los depósitos de talud se han formado por la acción de las heladas. Sin embargo, el papel de la congelación-descongelación en la física se ha debatido la meteorización (Birkeland, 1984).
Las tasas rápidas y la gran amplitud de cambio de temperatura requeridas para producir la presión necesaria no han sido confirmadas en el campo. En cambio, algunos investigadores favorecen el proceso en el que delgadas películas de agua adsorbida es el agente que promueve meteorización. Estas películas se pueden adsorber firmemente que no se pueden congelar. Sin embargo, el agua es atraída por un frente helado y las presiones ejercida durante la migración de estas películas puede romper la roca.
- Desplume coloidal. La contracción de materiales coloidales al secarse puede ejercer un esfuerzo de tracción sobre superficies con las que están en contacto.

- Actividad orgánica. El crecimiento de las raíces de las plantas en fracturas existentes en las rocas es un importante proceso de meteorización. Además, las actividades de gusanos, roedores y humanos pueden causar una mezcla considerable en la zona de meteorización.

Los productos de la meteorización, varios de los cuales coexistirán generalmente al mismo tiempo, incluyen:

- Minerales inalterados que son muy resistentes o recién expuesto
- Minerales más estables recién formados que tienen la misma estructura que el mineral original
- Minerales recién formados que tienen una forma similar al original, pero una estructura interna modificada
- Productos de minerales fragmentados, ya sea en el sitio o transportados desde el mismo. Tales minerales pueden incluir
 - Geles coloidales de Al_2O_3 y SiO_2
 - Minerales de arcilla
 - Zeolitas
 - Cationes y aniones en solución.
 - Precipitados minerales
- Reactivos invitados no utilizados

2.2.1. Efectos microbiológicos

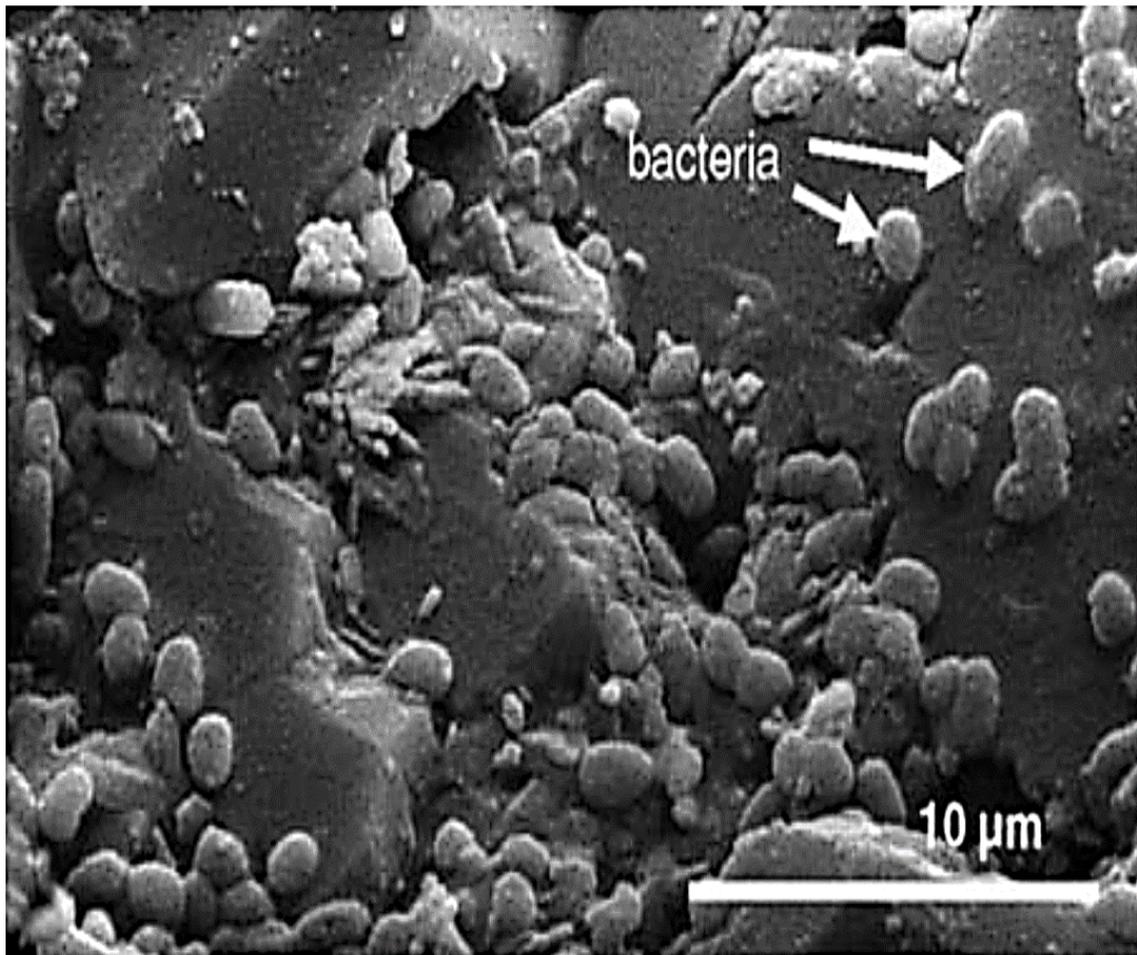
Según Mitchell & Soga (2005), varios tipos de microorganismos se encuentran en los suelos; hay microorganismos celulares (bacterias, arqueas, algas, hongos, protozoos y mohos mucilaginosos) y no celulares. microorganismos (virus). Pueden ser casi redondos, en forma de varilla o espiral y varían en tamaño desde menos de 1 a 100 μm , lo que equivale a tamaño de arcilla gruesa a un tamaño de arena fina. La figura 2.2 muestra las bacterias que se adhieren a granos de arena de cuarzo, y la figura 2.3 muestra minerales arcillosos revestidos alrededor de la envoltura celular, formando lo que son llamados microagregados bacterianos. Unos pocos miles de millones a 3 trillones de microorganismos existen en un kilogramo de suelo cerca la superficie del suelo y las

bacterias son dominantes. Los microorganismos pueden reproducirse muy rápidamente. La velocidad de replicación está controlada por factores como la temperatura, el pH, concentraciones iónicas, nutrientes y disponibilidad de agua.

En condiciones ideales, el “tiempo de generación” para la fisión bacteriana puede ser tan breve como 10 minutos; sin embargo, una escala de horas es típica. Esta generación de alta velocidad, las tasas, la mutación y la selección natural conducen a cambios muy rápidos, además que lleva a una adaptación y extraordinaria biodiversidad.

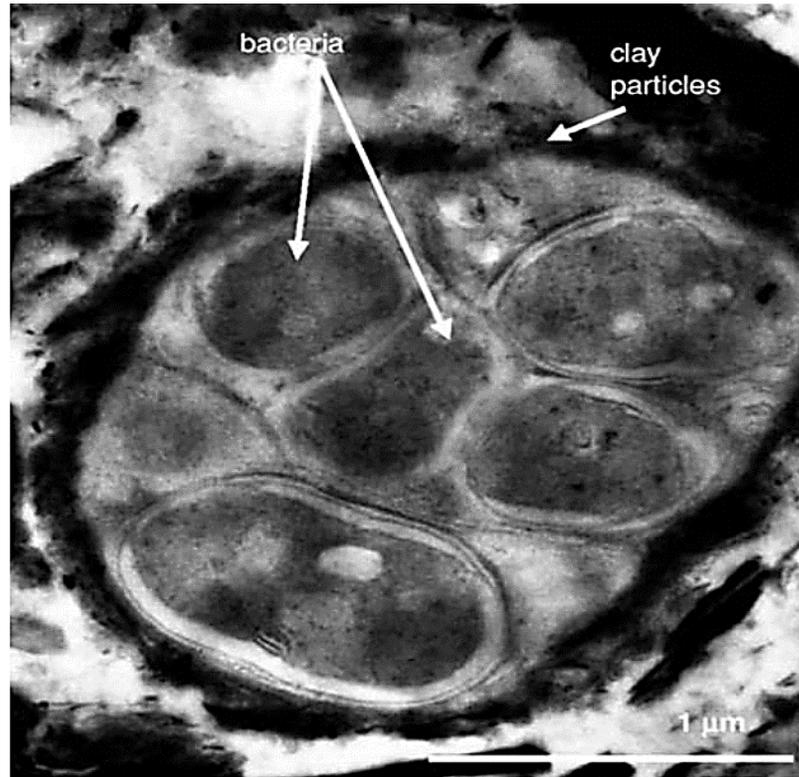
Las bacterias fotosintéticas autótrofas, es decir, las fotoautótrofas, desempeñaron un papel crucial en la evolución geológica de la tierra.

Figura 2.2. Bacterias adheridas a partículas de arena



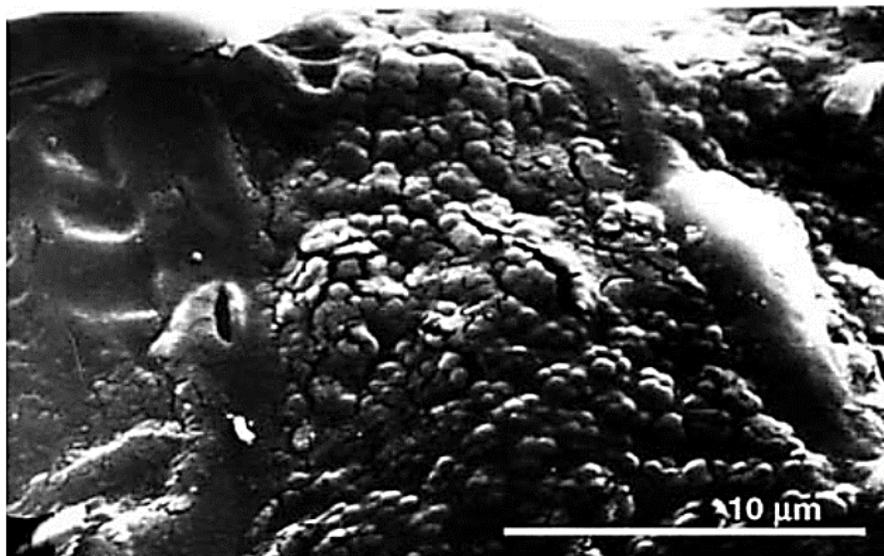
Fuente: Chenu y Stotzky (2002)

Figura 2.3. Microagregado bacteriano



Fuente: Chenu y Stotzky (2002)

Figura 2.4. Biopelícula en la superficie del suelo



Fuente: Chenu y Stotzky (2002)

2.3. Transporte de productos de la meteorización

Los productos de la meteorización pueden permanecer en el mismo lugar o pueden ser movidos a otros lugares por el hielo, el agua, el viento y la gravedad.

Los suelos formados por los productos en su lugar de origen son llamados suelos residuales.

Una característica importante del suelo residual es la gradación del tamaño de partícula. Los suelos de grano fino se encuentran en la superficie y el tamaño de grano aumenta con la profundidad.

A mayores profundidades, también se pueden encontrar fragmentos de rocas angulares (Braja M. Das, 2013, p. 21).

Los suelos transportados se pueden clasificar en varios grupos, dependiendo de su modo de transporte y deposición:

- Suelos glaciales, formados por el transporte y la deposición de los glaciares.
- Suelos aluviales, transportados por corrientes de agua y depositados a lo largo de los arroyos.
- Suelos lacustres, formados por deposición en los lagos.
- Suelos marinos, formados por deposición en los mares.
- Suelos eólicos, transportados y depositados por el viento.

2.4. Tamaño de la partícula

El suelo está compuesto por diferentes fracciones de partículas, que se clasifican según su tamaño, varía desde partículas más grandes como grava, arena hasta partículas más pequeñas de limo y arcilla.

Braja M. Das (2013) considera que independientemente de su origen, los tamaños de partículas que conforman el suelo pueden variar en un amplio intervalo. Los suelos son generalmente llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del suelo. Para describir los suelos por su tamaño de partícula, varias organizaciones han desarrollado límites de separación de tamaño de suelo.

Tabla 2.1. Clasificación de suelos según tamaño de partícula

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos p. ej. , limos y arcillas < 0,075	

Fuente: Braja M. Das (2013)

El proceso de separar un agregado del suelo en sus diferentes fracciones, cada una consiste en granos de tamaños distintos, dentro de ciertos límites, se conoce con el nombre de análisis mecánico o análisis granulométrico.

Por medio del análisis granulométrico se ha encontrado que la mayoría de los suelos naturales contiene granos de dos o más fracciones. Las características particulares de un suelo compuesto están casi enteramente determinadas por las propiedades de la fracción más fina. En ese aspecto, los suelos son similares al hormigón, cuyas propiedades están determinadas principalmente por el cemento, mientras que el agregado, que constituye su mayor parte, actúa como inerte. El “agregado” o parte inerte de un suelo compuesto forma entre el 80 y el 90 por ciento de su peso seco total, y la parte decisiva o activa del resto.

Las fracciones muy gruesas, por ejemplo, la grava, consisten en fragmentos de rocas compuestos de uno o más minerales. Los fragmentos pueden ser angulares, redondeados o chatos. Pueden ser sanos o mostrar signos de considerable descomposición, ser resistentes o deleznales.

Las fracciones gruesas, representadas por las arenas, consisten en granos compuestos por lo general de cuarzo. Los granos pueden ser angulares o redondeados. Algunas arenas contienen un porcentaje importante de escamas de mica, que las hace muy elásticas o esponjosas.

Las fracciones finas y muy finas cada grano está constituido generalmente de un solo mineral. Las partículas pueden ser angulares, en forma de escamas y ocasionalmente con forma tubular, pero nunca redondeadas.

En algunos casos excepcionales, la fracción fina contiene un alto porcentaje de fósiles porosos, como diatomeas o radiolarias, que imparten al suelo propiedades mecánicas poco comunes. En general, el porcentaje de partículas escamosas aumenta en un suelo dado a medida que decrece el tamaño de sus fracciones.

Si el tamaño de la mayoría de los granos de un agregado de partículas de un suelo está comprendido dentro de los límites dados para una de las fracciones, el agregado constituye un suelo uniforme. Los suelos uniformes de granos muy gruesos y gruesos son comunes, pero muy raramente se encuentran en suelos muy finos o coloidales de este tipo. Todas las arcillas contienen elementos finos, muy finos y coloidales y a veces hasta partículas gruesas. Las fracciones más finas de las arcillas consisten principalmente en partículas con forma de escamas.

El predominio de partículas escamosas en la fracción muy fina de los suelos naturales es consecuencia de los procesos geológicos de su formación. La gran mayoría de los suelos deriva de procesos químicos que se deben a la acción de los agentes climáticos sobre las rocas, las que están constituidas, en parte de elementos químicamente muy estables y, en parte, de minerales menos estables. Los agentes climáticos transforman los minerales menos estables en una masa friable de partículas muy pequeñas de minerales secundarios que, comúnmente, tienen forma de escamas, mientras que los minerales estables permanecen prácticamente inalterados. Es así como el proceso de descomposición por los agentes climáticos reduce las rocas a un agregado consistente en fragmentos de minerales inalterados o prácticamente inalterados, embebidos en una matriz compuesta principalmente de partículas con forma de escama. Durante el transporte por agua que

sigue este fenómeno, el agregado es desmenuzado y sus elementos, sujetos a impactos y al desgaste.

El proceso puramente mecánico de desgaste no alcanza a reducir los granos duros y equidimensionales de minerales inalterados en fragmentos menores de unos 10 micrones (0.01 milímetro). En contraposición, las partículas friables, constituidas por minerales secundarios con forma de escamas, aunque inicialmente muy pequeñas, son fácilmente desgastadas y desmenuzadas en partículas aún menores. Esto explica porque las fracciones muy finas de los suelos naturales se componen principalmente de tal clase de partículas (Terzaghi & Peck, 1978).

2.5. Suelo expansivo

Los suelos expansivos, también conocidos como arcilla activa, son aquellos que se hinchan cuando están expuestos a la humedad y se encogen cuando se secan, lo que puede generar huecos en el suelo. Los suelos que contienen arcilla expansiva se vuelven muy pegajosos cuando se mojan y se agrietan cuando secan, pudiendo tener una apariencia hinchada (arcilla desecada).

“Un suelo expansivo puede definirse, como un tipo de suelo que se hincha y contrae causando daños, frecuentemente presenta un contenido coloidal alto, con valores altos de límite líquido, altos índices de plasticidad y de actividad. Pueden ser de origen variado, duros en estado seco, pero se vuelven blandos cuando se les permite absorber agua y pueden ejercer grandes presiones de expansión. La permeabilidad es muy baja salvo cuando el suelo esta fisurado, seco y el agua puede circular por las grietas abiertas” (Moreno, 1991).

Estos suelos se caracterizan por la presencia de una gran proporción de minerales arcillosos altamente activos del grupo de las montmorillonitas que son responsables de la pronunciada capacidad de cambio de volumen de los suelos (Sridharan & Prakash, 2000).

Figura 2.5. Suelo expansivo, ubicado en el Barrio Los Olivos



Fuente: Elaboración propia

La capacidad expansiva de un suelo arcilloso está determinada en buena medida por su composición química y mineralógica. Se acepta, que los factores que influyen sobre la expansividad potencial de un suelo arcilloso se encuentran descritos y asociados con el tipo de minerales y la cantidad relativa de cada uno de ellos, el hidróxido de entre capas, el tipo de cationes absorbidos y, finalmente, la composición del agua de poros,

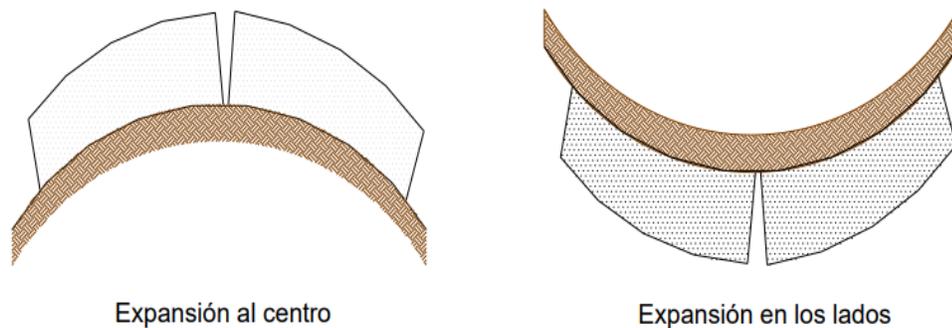
Se ha encontrado una gran cantidad de daños causados por el comportamiento expansivo en suelos que contienen los minerales arcillosos montmorillonita y vermiculita. No obstante, según Mitchell (2005), hay casos en los que se han producido considerable expansión y presión de expansión en suelos ílíticos y caoliníticos. Lambe y Whitman (1959), presentan resultados indicando que la capacidad de expansión disminuye en el orden, montmorillonita, ilita, atapulguita, caolinita. Esta diferenciación, que ha sido reconocida por muchos años, se debe en parte a la deficiencia en carga eléctrica por unidad de cada mineral, siendo las mayores expansiones para aproximadamente una deficiencia de carga por celda. Se puede indicar así mismo, que el tipo de minerales arcillosos que forma un suelo puede explicar, por lo menos en parte, sus características expansivas. Aceptando esta conclusión algunos autores han señalado (e.g Holtz, 1959; Mielenz & King, 1951; Warkentin, 1958) que si en un depósito de suelo se encuentra una cantidad

relativamente grande de minerales arcillosos altamente expansivos, existe un alto grado de cambio potencial de volumen en todo el depósito (Moreno, 1995).

El suelo expansivo se caracteriza por su alto potencial de dilatarse o contraerse como cambios en el contenido de agua. El comportamiento de hinchamiento del suelo expansivo se debe a la presencia de minerales arcillosos activos como la montmorillonita. Estos suelos pueden ser encontrados en casi todos los continentes de la tierra.

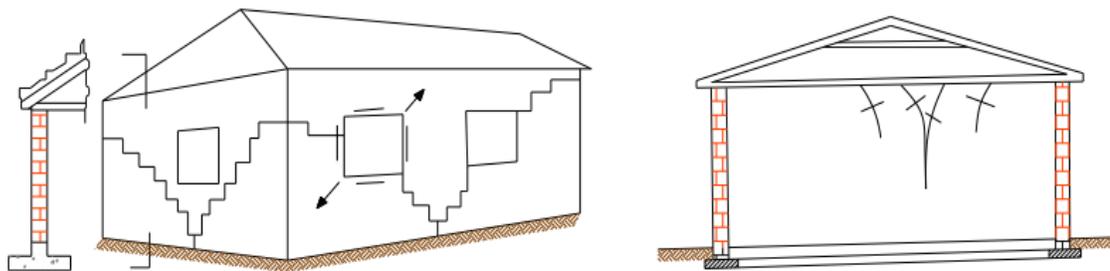
La identificación de suelos expansivos se puede realizar por muchos métodos. Las físicas propiedades del suelo; tales como: Los límites de Atterberg y la actividad de los suelos arcillosos pueden ser usadas indirectamente para determinar el potencial de hinchamiento de los suelos. El oleaje libre y prueba de presión de hinchazón por el edómetro son métodos directos para identificar los suelos expansivos (Nelson & Miller, 1992).

Figura 2.6. Posible pandeo en pavimentos debido a la expansión del subsuelo



Fuente: Kalantari (2012)

Figura 2.7. Distinto tipos de daño en los muros debido al subsuelo expansivo.



Fuente: Kalantari (2012)

2.6. Arcillas

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y submicroscópicas derivadas de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas. Son suelos plásticos dentro de límites extensos en contenido de humedad y cuando están secos son duros, sin que sea posible despejar polvo de una pasta frotada con los dedos. Tienen además una permeabilidad extremadamente baja.

Las arcillas orgánicas son aquellos suelos de este tipo que derivan alguna de sus propiedades físicas más significativas de la presencia de materia orgánica finamente dividida. Cuando están saturados son generalmente muy compresibles, y secos presentan una resistencia muy alta. Tienen colores que varían del gris oscuro a negro, y pueden poseer un olor característico.

Las bentonitas son arcillas con un alto contenido de montmorillonita. La mayoría de las bentonitas se formaron de la alteración química de cenizas volcánicas. En contacto con el agua, las bentonitas secas se esponjan más que otros tipos de arcillas secas, y saturadas se contraen más también. (Terzaghi & Peck, 1978)

2.7. Minerales de la arcilla

Los minerales de arcilla son silicatos de aluminio complejos compuestos de una de las dos unidades básicas: (1) sílice tetraédrica y (2) aluminio octaédrico. Cada unidad del tetraedro consiste de cuatro átomos de oxígeno que rodean un átomo de silicio. La combinación de unidades tetraédricas de sílice da una lámina de sílice. Tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros en la vecindad. Las unidades octaédricas consisten en seis hidroxilos rodeando un átomo de aluminio, y la combinación de las unidades hidroxilo de aluminio octaédricas da una capa octaédrica. (Esto también se llama una lámina de gibsita). A veces el magnesio sustituye a los átomos de aluminio en las unidades octaédricas, en cuyo caso la capa octaédrica se llama lámina de brucita.

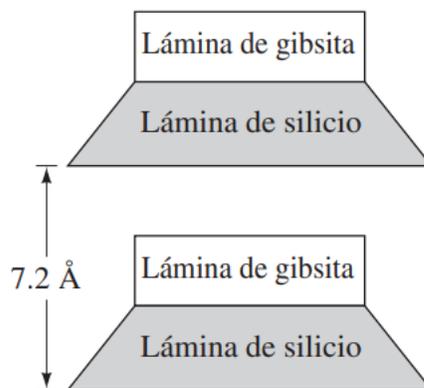
En una lámina de sílice, cada átomo de silicio con una valencia positiva de 4 está ligado a cuatro átomos de oxígeno, con una valencia negativa total de 8. Sin embargo, cada átomo de oxígeno en la base del tetraedro está vinculado a dos átomos de silicio. Esto significa

que el átomo de oxígeno en la parte superior de cada unidad tetraédrica tiene una valencia negativa de 1 para ser contrarrestado. Cuando la lámina de sílice se apila sobre la lámina octaédrica, estos átomos de oxígeno remplazan los hidroxilos para satisfacer sus enlaces de valencia (Braja M. Das, 2013).

Prácticamente todos los minerales de estructura follada, presentes en las fracciones más finas de los suelos, pertenecen a un grupo que se conoce como minerales arcillosos. La mayoría de los minerales de este grupo se pueden clasificar en tres subgrupos conocidos por: Las caolinitas, las ilitas y las montmorillonitas. Cada uno de ellos se caracteriza por una distribución de átomos que produce una carga eléctrica negativa en las superficies chatas de los cristales (Terzaghi & Peck, 1978).

La caolinita consiste de capas repetidas de láminas de sílice-gibsita elementales. Cada capa es de aproximadamente 7.2 Å de espesor. Las capas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno. La caolinita se produce como plaquetas, cada una con una dimensión lateral de 1000 a 20 000 Å y un espesor de 100 a 1000 Å. El área de la superficie de las partículas de caolinita por unidad de masa es de aproximadamente 15 m²/g. El área de superficie por unidad de masa se define como superficie específica (Braja M. Das, 2013).

Figura 2.8. Diagrama de las estructuras de la caolinita

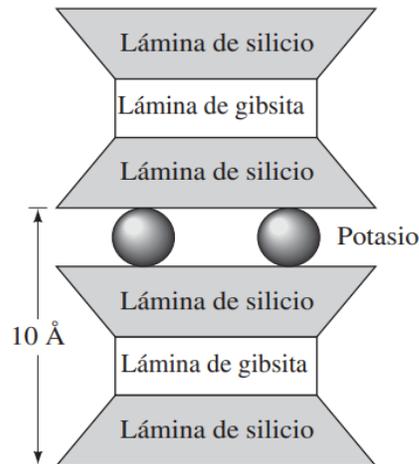


Fuente: Braja M. Das (2013)

La ilita consiste de una lámina de gibsita unida a dos láminas de sílice, una en la parte superior y otra en la parte inferior. A veces se llama arcilla micácea. Las capas de ilita están unidas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para equilibrar los iones de

potasio proviene de la sustitución de aluminio por alguno de silicio en las láminas tetraédricas. La sustitución de un elemento por otro sin ningún cambio en la forma cristalina se conoce como sustitución isomorfa. Las partículas de ilita tienen generalmente dimensiones laterales que van de 1000 a 5000 Å, y espesores de 50 a 500 Å. La superficie específica de las partículas es de aproximadamente 80 m²/g (Braja M. Das, 2013).

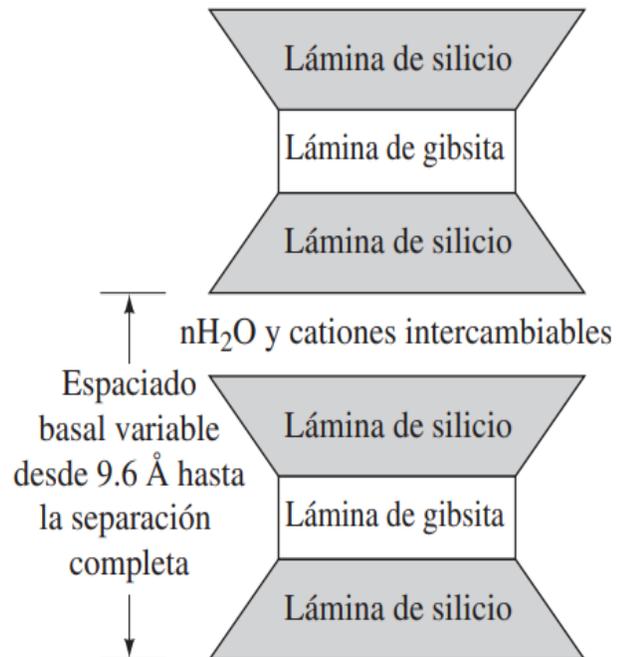
Figura 2.9. Diagrama de las estructuras de la ilita



Fuente: Braja M. Das (2013)

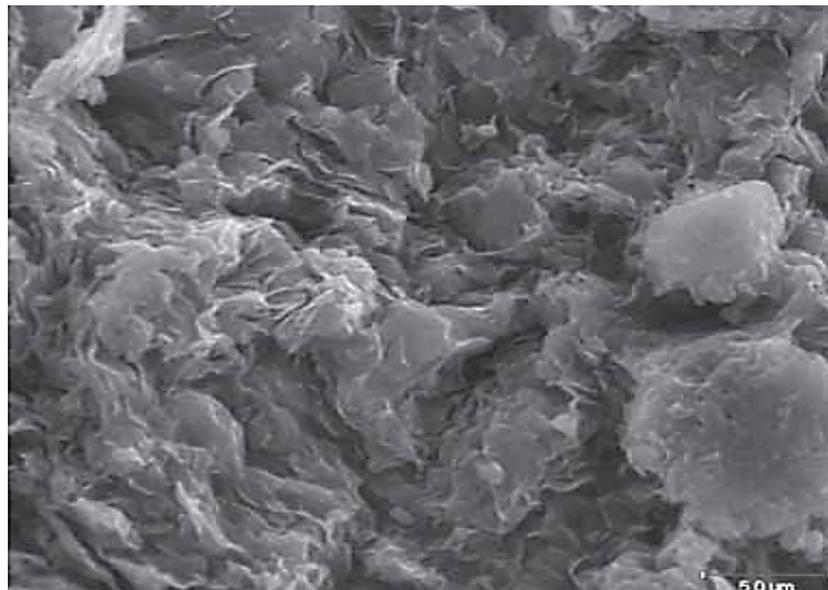
La montmorillonita tiene una estructura similar a la de la ilita, es decir, una lámina de gibsita intercalada entre dos láminas de sílice. En la montmorillonita existe sustitución isomorfa de magnesio y hierro para el aluminio en las láminas octaédricas. Aquí no están presentes los iones de potasio, como en el caso de la ilita, y una gran cantidad de agua es atraída al espacio entre las capas. Las partículas de montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 50 Å. La superficie específica es de aproximadamente 800 m²/g. La figura 2.12 es una micrografía electrónica de barrido que muestra el tejido de la montmorillonita. Además de la caolinita, ilita y montmorillgibbsiteonita, otros minerales comunes de la arcilla que se encuentran generalmente son clorita, haloisita, vermiculita y atapulgita. Las partículas de arcilla tienen una carga neta negativa en sus superficies. Éste es el resultado de la sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes (Braja M. Das, 2013).

Figura 2.10. Diagrama de las estructuras de la montmorillonita



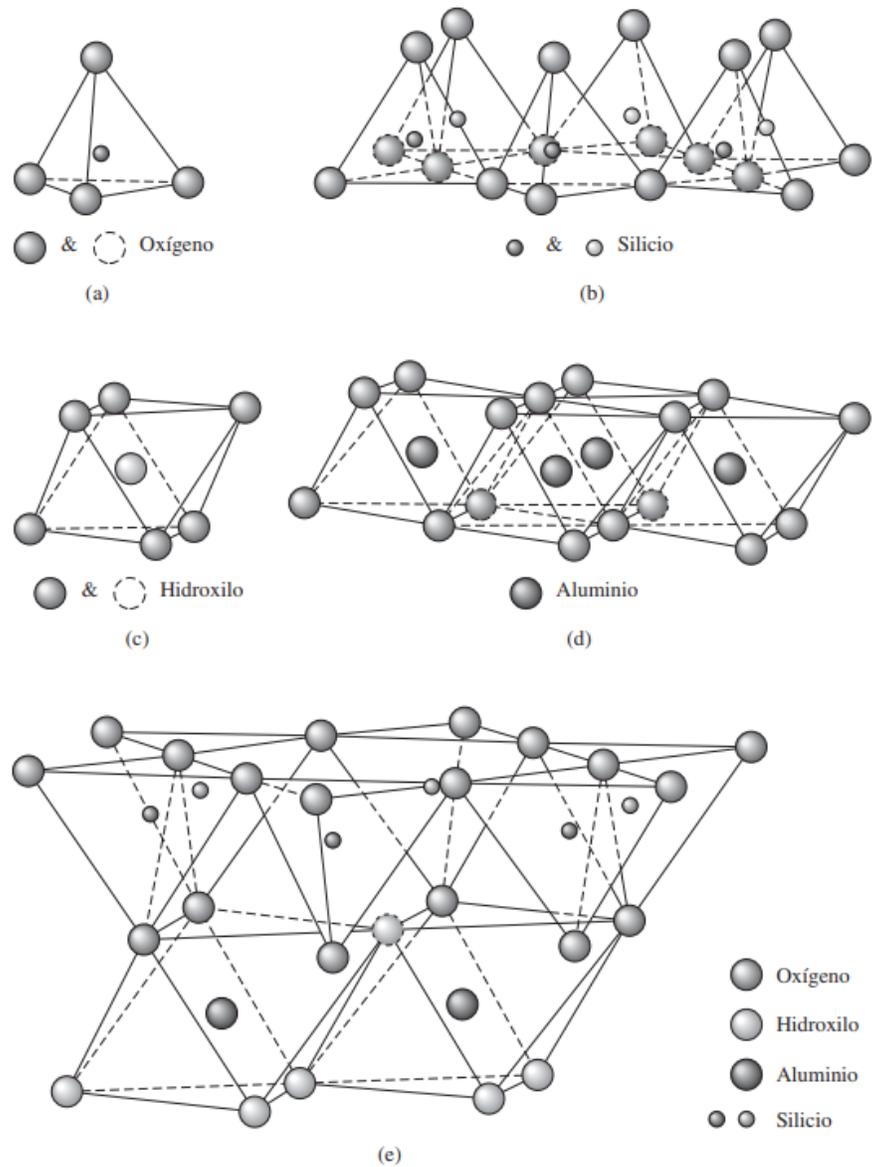
Fuente: Braja M. Das (2013).

Figura 2.11. Micrografía electrónica de barrido que muestra el tejido de la montmorillonita.



Fuente: David J. White, Iowa State University, Ames, Iowa

Figura 2.12. (a) Sílice tetraédrico, (b) lámina de sílice, (c) lámina de aluminio octaédrico, (d) lámina octaédrica (gibbsite), (e) lámina de sílice gibbsite elemental



Fuente: Braja M. Das (2013)

Los minerales arcillosos se forman a través de un proceso complicado a partir de una variedad de materiales. Los materiales originales incluyen feldespatos, micas y calizas. El proceso de alteración que tiene lugar en tierra se denomina meteorización y que en el fondo del mar o lago como Halmirólisis. El proceso de alteración incluye la desintegración, oxidación, hidratación y lixiviación (Chen, 1975).

2.8. El agua en las arcillas

La absorción de agua por las arcillas conduce a la expansión. Desde el punto de vista mineralógico, la magnitud de la expansión depende del tipo y la cantidad de minerales arcillosos presentes, sus iones intercambiables, contenido de electrolitos de la fase acuosa y la estructura interna (Chen, 1975).

El espesor de las dobles capas es, por tanto, la distancia a la superficie necesaria para neutralizar la carga neta de la partícula, es decir la distancia en la que existe un potencial eléctrico. El agua de la doble capa está sometida a una fuerza de atracción hacia la partícula de suelo ya que el agua es solidaria de los iones de cambio que, a su vez, resultan atraídos hacia la superficie del suelo. El agua también es atraída hacia la superficie mineral por otras fuerzas (la fuerza que existe entre el agua polar y las cargas eléctricas repartidas sobre la superficie de la partícula, enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals). Aunque existe controversia respecto a la naturaleza exacta del agua en la inmediata proximidad a la superficie mineral, se suele admitir generalmente que, por lo menos, las primeras capas moleculares de agua en torno a la partícula están fuertemente atraídas a la misma (Lambe & Whitman, 1969).

Tabla 2.2. Agua absorbida según el tipo de mineral

Mineral	Área de superficie específica (m²/g)	Agua absorbida (%)
Cuarcita	0,03	$1,5 \times 10^{-4}$
Caolinita	10	0,5
Ilita	100	5
Montmorillonita	1000	50

Fuente: Lambe y Whitman (1969)

2.9. Caracterización de los suelos expansivos

La caracterización de los suelos expansivos se realiza través de diversos ensayos que indican características específicas de la muestra ensayada, mismas que permiten determinar si se trata de un suelo expansivo.

2.9.1. Gravedad específica

La gravedad específica de los sólidos del suelo, G_s , n-relación entre la masa de un volumen unitario de los sólidos del suelo y la masa del mismo volumen de agua destilada sin gas a 20 ° C (ASTM D 854, 2003).

2.9.2. Ensayo de granulometría

El propósito del análisis mecánico o análisis granulométrico es determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y fijar, en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distintos tamaños que contiene. El método más directo, consiste en hacerlo pasar a través de un juego de tamices.

2.9.3. Ensayo de hidrómetro

El análisis de hidrómetro se basa en el principio de la sedimentación de los granos del suelo en agua. Cuando una muestra de suelo se dispersa en agua, las partículas se depositan a diferentes velocidades, en función de su forma, tamaño y peso. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas del suelo puede ser expresada por la ley de Stokes (Braja M. Das, 2013).

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \quad (2.1)$$

Donde:

v = Velocidad

ρ_s = Densidad de las partículas del suelo

ρ_w = Densidad del agua

η = Viscosidad del fluido

D = Diámetro de las partículas de suelo

Despejando D de la ecuación

$$D = \sqrt{\frac{18\eta v}{\rho_s - \rho_w}} = \sqrt{\frac{18\eta}{\rho_s - \rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2.2)$$

Donde $v = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} = \frac{L}{t}$

Observe que

$$\rho_s = G_s \rho_w \quad (2.3)$$

En consecuencia, al combinar las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2.4)$$

Si las unidades de η son $(g \cdot s) / cm^2$, ρ_w está en g/cm^3 , L en cm, t en min y D en mm, entonces

$$\frac{D(mm)}{10} = \sqrt{\frac{18\eta[(g \cdot s)/cm^2]}{(G_s - 1)\rho_w(g/cm^3)}} \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min) \times 60}}$$

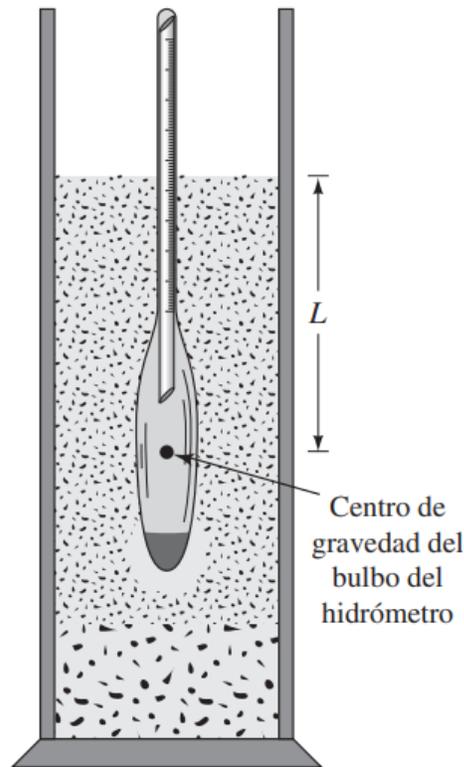
$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{(G_s - 1)\rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2.5)$$

Suponiendo que ρ_w es aproximadamente igual a 1 g/cm^3 , se tiene

$$D(mm) = K \sqrt{\frac{L(cm)}{t(min)}} \quad (2.6)$$

Donde $K = \sqrt{\frac{30\eta}{(G_s - 1)}} \quad (2.7)$

Figura 2.13. Definición de L en una prueba de hidrómetro



Fuente: Braja M. Das (2013)

2.9.4. Límites de consistencia

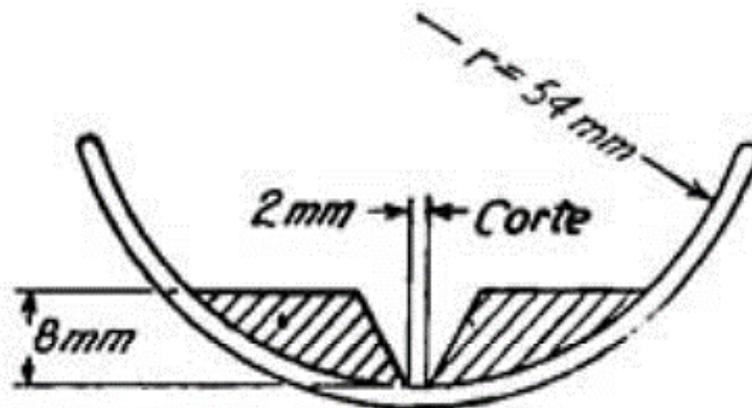
En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido (Braja M. Das, 2013).

La consistencia de las arcillas y de otros suelos cohesivos se describe comúnmente con los términos de blando, compacto, resistente y duro. (Terzaghi & Peck, 1978)

El límite líquido, es el contenido de humedad, en porcentaje del peso del suelo seco para el cual dos secciones de una pasta de suelo, alcanzan apenas a tocarse sin unirse cuando

la taza que las contiene es sometida al impacto de un número fijo de golpes verticales secos. Como la ecuación personal tiene una influencia importante en los resultados del ensayo, se utiliza para ejecutarlo un aparato mecánico normalizado. (Terzaghi & Peck, 1978).

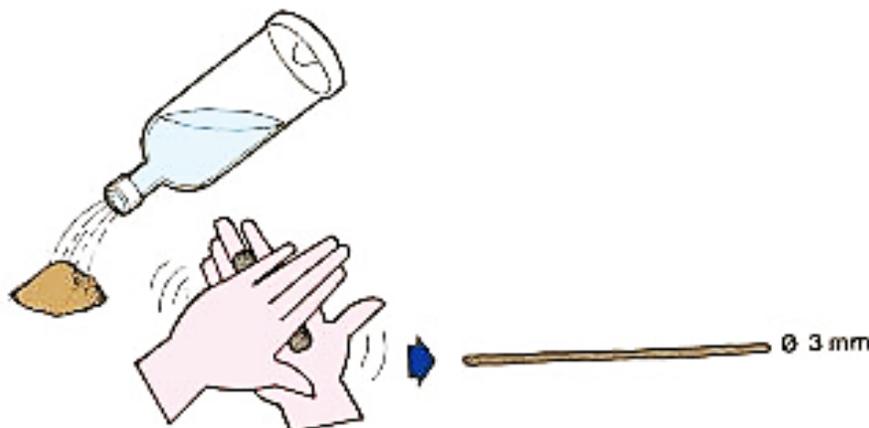
Figura 2.14. Corte de la taza para determinar el límite líquido



Fuente: A. Casagrande (1932)

El límite plástico, límite inferior del estado plástico, es el contenido de humedad para el cual el suelo comienza a fracturarse cuando es amasado en pequeños cilindritos, haciendo rodar la masa de suelo entre la mano y la superficie lisa (Terzaghi & Peck, 1978).

Figura 2.15. Ensayo para determinar el límite plástico



Fuente: Fao.org.

Límite de contracción, límite inferior de cambio de volumen, es el contenido de humedad por debajo del cual la pérdida de humedad por evaporación no trae aparejada una reducción de volumen. Cuando el contenido de humedad pasa por debajo del límite de contracción el suelo cambia de color, tornándose más claro (Terzaghi & Peck, 1978).

En resumen:

- Límite Líquido: El contenido de humedad en el punto de transición del estado plástico al estado líquido.
- Límite Plástico: El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al estado plástico.
- Límite de Contracción: El contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el que se lleva a cabo la transición del estado sólido al estado semisólido.
- Índice de Plasticidad: El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

$$IP = LL - LP \quad (2.8)$$

Donde:

IP= Índice de plasticidad

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

2.10. Clasificación de suelos expansivos

2.10.1. Límite líquido

El límite líquido se lo determinará mediante el uso la cuchara de Casa Grande, se colocará la muestra de suelo en la cuchara normalizada y cuando el surco abierto con un acanalador normalizado se cierre por el efecto de los golpes de la cuchara sobre una base rígida y se procederá a determinar el contenido de humedad de dicha muestra.

En la siguiente tabla se tiene una relación entre el límite líquido y el grado de expansión, los intervalos de valores fueron propuestos por Chen (1975) y por la norma IS 1498 (1970).

Tabla 2.3. Predicción de la expansividad del suelo por límite líquido

Grado de expansión	wL: %	
	Chen	IS 1498
Bajo	<30	20-35
Medio	30-40	35-50
Alto	40-60	50-70
Muy alto	>60	70-90

Fuente: Chen (1975), IS 1498 (1970)

2.10.2. Índice de plasticidad

El índice de plasticidad se lo determina midiendo el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo de 3mm.

En la siguiente tabla se tiene una predicción de la expansividad con intervalos propuestos por la norma IS 1498 (1970) y Chen (1975).

Tabla 2.4. Predicción de la expansividad del suelo por índice de plasticidad

Grado de expansión	IP: %	
	Chen	IS 1498
Bajo	0-15	<12
Medio	10-35	12-23
Alto	20-55	23-32
Muy alto	>35	>32

Fuente: Chen (1975), IS 1498 (1970)

2.10.3. Actividad

Skempton (1953) define una cantidad denominada actividad, que es la pendiente de la línea de correlación de PI y el porcentaje más fino que 2 μ . Se puede expresar como:

$$A = \frac{PI}{\text{Porcentaje de tamaño arcilloso}} \quad (2.9)$$

Donde:

PI= Índice de plasticidad

Porcentaje de tamaño arcilloso (< 2 μ m)

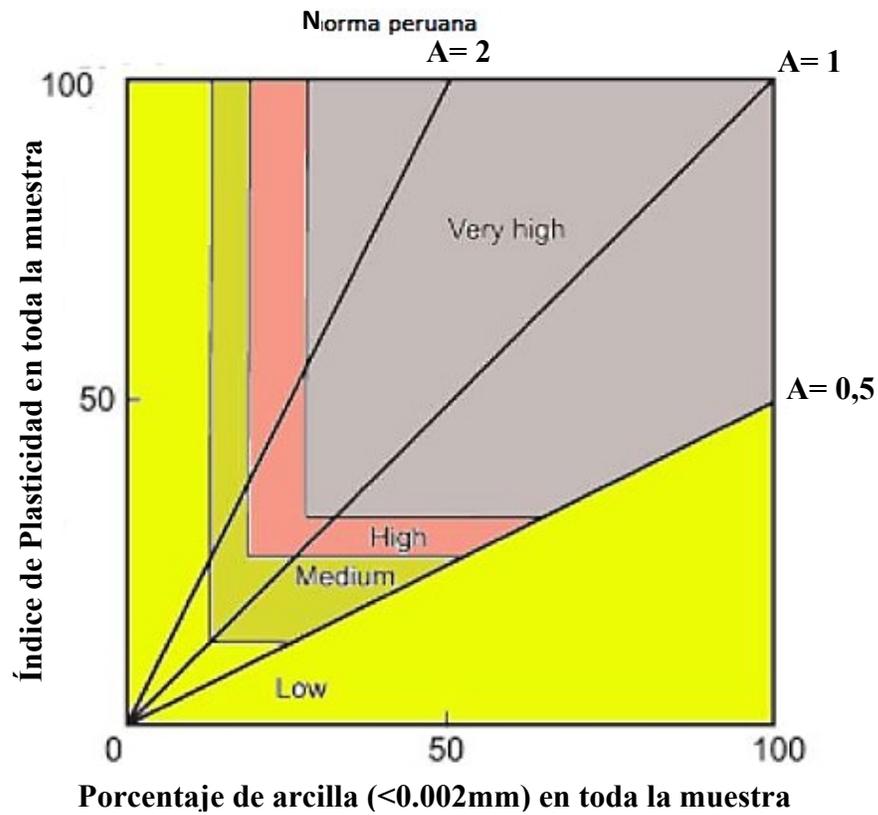
La potencial expansión se determina mediante la siguiente tabla:

Tabla 2.5. Predicción de la potencial expansión en arcillas

Actividad	Potencial de expansión
A < 0,75	Arcilla inactiva
0,75 < A < 1,25	Arcilla normal
A > 1,25	Arcillas Activa

Fuente: Holtz y Kovacs (1981)

Figura 2.16. Grado de expansión según el índice de plasticidad y el porcentaje de arcilla en el suelo



Fuente: Norma peruana E.050. Suelos y cimentaciones

2.10.4. Prueba de edómetro

El edómetro es un instrumento de laboratorio utilizado para medir la capacidad de deformación y resistencia de un material, especialmente su capacidad para soportar tensiones y cargas. También se conoce como dispositivo de consolidación uniaxial.

El edómetro se utiliza comúnmente en estudios de mecánica de suelos y geotecnia para medir la compresibilidad de los suelos, lo que es importante para predecir cómo se comportarán los suelos bajo cargas y cómo se asentará una estructura construida sobre ellos. Este equipo también es usado para determinar la expansión o hinchamiento libre que pueda tener un suelo cohesivo.

Según la experiencia de los autores Sridharan & Prakash, las predicciones de expansión de la prueba del edómetro propuesta por Holtz y Gibbs, están ligeramente subestimadas. Con su experiencia y considerando la mineralogía arcillosa de los suelos, los autores proponen un criterio para clasificar los suelos en base a su carácter expansivo como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.6. Predicción de la expansividad del suelo por edómetro

Porcentaje de expansión en edómetro	Tipo	Expansión del suelo
<1	No hinchado	Despreciable
1-5	Mezcla entre hinchamiento y no hinchamiento	Bajo
5-15	Hinchado	Medio
15-25	Hinchado	Alto
>25	Hinchado	Muy alto

* De seco al aire a condición saturada bajo un recargo de 7KPa.

Fuente: Sridharan & Prakash (2000)

Condición de uso de tabla: El porcentaje de cambio volumétrico se determina usando el edómetro, sobrecargado la muestra con una presión de 0.07 kg/cm² y llevándola de un estado seco al aire a un estado de saturación.

2.10.4.1. Método para medir el potencial de asentamiento o expansión unidimensional de suelos cohesivos I.N.V.E – 173 - 07

Objeto:

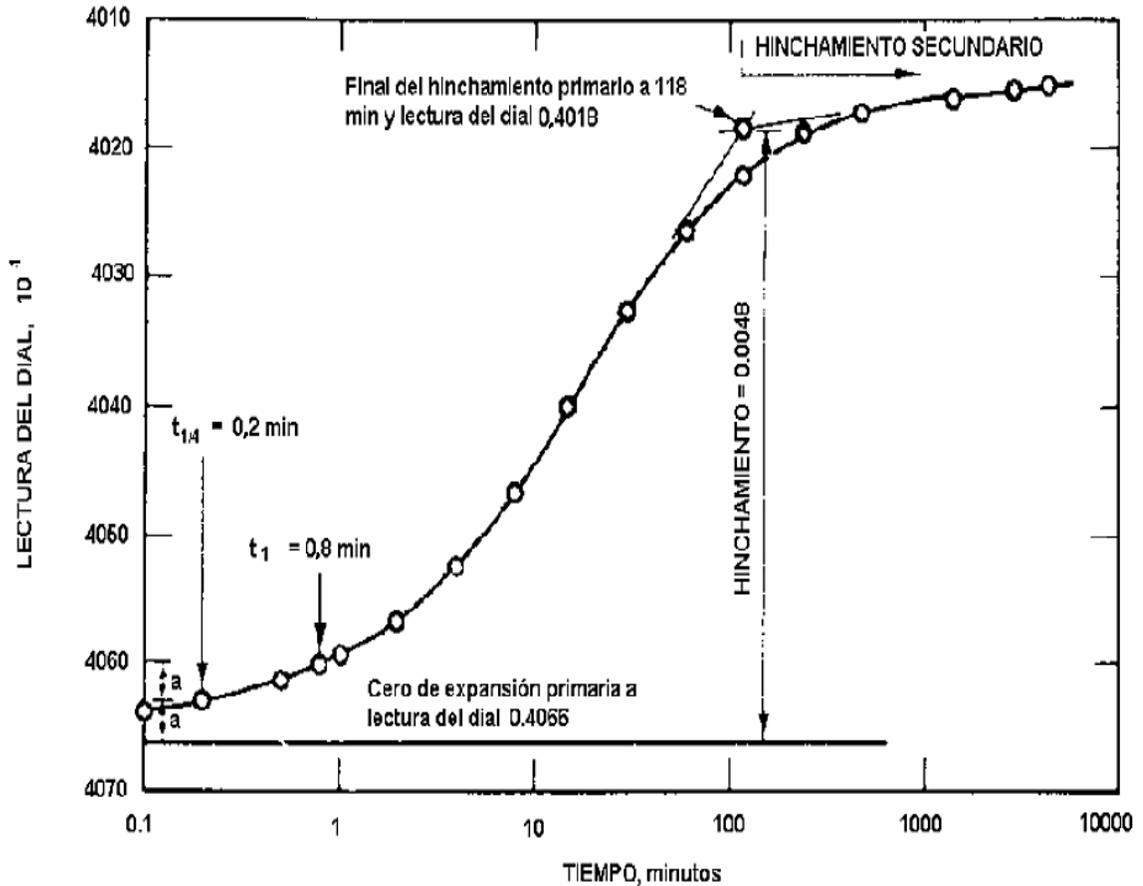
Esta norma contiene tres métodos alternativos de laboratorio para la determinación de la magnitud del hinchamiento o asentamiento de un suelo cohesivo relativamente inalterado o compactado.

Los métodos de prueba se pueden usar para determinar: a) La magnitud de hinchamiento bajo una presión vertical (axial) conocida, o b) la magnitud de la presión vertical necesaria para mantener sin cambio de volumen especímenes confinados lateralmente y cargados sobre un eje axial.

Definiciones:

- Levantamiento, L – Aumento en la altura vertical, Δh , de una columna de suelo in-situ de altura h , luego de absorber agua.
- Porcentaje de hinchamiento o asentamiento, % – Aumento o disminución de la proporción de cambio en la altura vertical, $\% \Delta h$, con respecto a la altura original de una columna de suelo in-situ.
- Asentamiento, L – Disminución en altura vertical, $\% \Delta h$, de una columna de suelo in-situ de altura h .
- Expansión, L – Aumento en elevación o dilatación de columna de suelo después de absorción de agua.
- Expansión libre, % – Porcentaje de levantamiento, después de absorción de agua a la presión de asentamiento σ .
- Expansión primaria – Un hinchamiento de corto plazo, definido de manera arbitraria, generalmente se considera que ha sido completado en el tiempo correspondiente a la intersección de la tangente de curvatura inversa con la prolongación del tramo recto final, que representa el hinchamiento a largo plazo o secundario, en un trazo semilogarítmico, cambio dimensional vs. Logaritmo de tiempo.
- Expansión secundaria – Un hinchamiento de largo plazo, definido de manera arbitraria, generalmente caracterizado como la porción lineal final de la curva de cambio dimensional contra logaritmo de tiempo, al completar el hinchamiento de corto plazo o primario.
- Presión de expansión – Una presión que evita el hinchamiento del espécimen cómo se obtiene en el método C, o 2) aquella presión que se requiere para devolver el espécimen a su estado original (relación de vacíos, altura) después del hinchamiento en el método A o B.

Figura 2.17. Curva tiempo-hinchamiento



Fuente: Norma I.N.V.E-173-07

Preparación del espécimen:

Se miden la altura del anillo portamuestra que se utilice, h_0 , en mm, y el diámetro interior, con el fin de determinar la sección recta, S , en mm^2 , y el volumen interior del anillo en cm^3 .

El espécimen para el ensayo se puede preparar por diferentes procedimientos, a partir de la muestra de suelo que se disponga. Cualquiera que sea el procedimiento, se debe operar en un ambiente que tenga una humedad relativa no inferior al 50%. En el caso de suelos sensibles a la pérdida de humedad, es necesario tallar el espécimen en cámara húmeda o un recinto análogo que tenga una humedad relativa del $90\% \pm 5\%$.

Por extrusión de una muestra inalterada contenida en un tubo portamuestras. -

- Es necesario utilizar un anillo portamuestra con borde cortante si el diámetro de la muestra es mayor que el diámetro del anillo y se procede de la forma siguiente: Se sujeta el tubo portamuestra en el equipo de extracción y se coloca el anillo de manera que su eje coincida con el del tubo. Si se utiliza un anillo con borde cortante, éste debe estar en contacto con la superficie de la muestra.
- Se extrae la muestra de manera que vaya penetrando en el anillo, hasta que sobresalga del mismo.
- Se corta la muestra por el otro extremo con una sierra de hilo, dejando un espesor algo mayor que el del anillo.
- Cuando se trate de suelos que contengan partículas gruesas u otros elementos que puedan dar lugar a alteraciones de la muestra durante el proceso de extrusión, se debe utilizar un anillo portamuestra de borde cortante y cuyo diámetro interior sea igual que el de la muestra.

Por tallado, partiendo de una muestra inalterada en bloque. -

- Se emplea el anillo con borde cortante, y se procede como se indica a continuación:
- Se prepara en la muestra una zona con la superficie horizontal, de un tamaño apreciablemente mayor que el diámetro interior del anillo, con la precaución de mantener la orientación que tenía la muestra en el terreno.
- Se sitúa el anillo sobre la mencionada superficie, con el borde cortante en contacto con la muestra.
- Utilizando como guía la pared exterior del anillo, se talla un cilindro cuyo diámetro sea aproximadamente el diámetro exterior del anillo y de altura superior a éste.
- Se va introduciendo el anillo en la muestra, hasta que ésta sobresalga por la parte opuesta al borde cortante, cortando seguidamente por debajo de éste.

Por remoldeo, cuando así se especifique. –

- Se prepara la muestra, realizando la compactación con las condiciones deseadas, en un molde adecuado.
- Se aplica seguidamente uno de los procedimientos antes descritos, según sea el caso.

- En todos los procedimientos mencionados, se engrasan las dos caras del espécimen de forma que queden planas y al mismo nivel que los bordes del anillo, evitando pulirlas durante el proceso.
- Una vez preparado el espécimen dentro del anillo, se determina inmediatamente su masa en gramos y se coloca el conjunto dentro de un recipiente estanco, hasta el momento de montar el ensayo.

Resumen del método:

Los métodos de prueba se pueden usar para determinar: a) La magnitud de hinchamiento bajo una presión vertical (axial) conocida, o b) la magnitud de la presión vertical necesaria para mantener sin cambio de volumen especímenes confinados lateralmente y cargados sobre un eje axial.

Los siguientes tres métodos de prueba alternativos requieren que un espécimen de suelo sea confinado lateralmente y cargado de manera axial en un consolidómetro con acceso a agua libre.

Método A – Se inunda el espécimen permitiéndosele el hinchamiento vertical a la presión de asentamiento o fijamiento (presión de por lo menos 1 kPa (0.01 kgf/cm²) aplicada por medio de pesas colocadas sobre la piedra porosa hasta completar la expansión primaria.

Después de haber anotado la lectura inicial de deformación a la presión de asentamiento, se inunda el espécimen y se anotan las deformaciones después de varios tiempos. Lecturas a 1/10, 1/5, 1/2, 1, 2, 4, 8, 15, y 30 minutos y de 1, 2, 4, 8, 24, 48 y 72 horas, son generalmente satisfactorias. Se continúan las lecturas hasta que se haya completado la expansión primaria. Después de ocurrida la expansión primaria, el espécimen es cargado hasta obtener su relación de vacíos/altura inicial.

Método B – Una presión vertical que exceda la presión de asentamiento o fijamiento, es aplicada al espécimen antes de la colocación de agua libre en el consolidómetro. La magnitud de la presión vertical es generalmente equivalente a la presión de sobrecarga vertical o a la carga estructural in-situ o a ambas, pero pueden variar dependiendo de la aplicación de los resultados de prueba. Al espécimen se le da acceso a agua libre. Esto puede resultar en expansión, expansión y luego contracción, contracción, o contracción y

luego hinchamiento. La cantidad de hinchamiento o asentamiento se mide a la presión aplicada, después de que el movimiento sea insignificante.

Método C – El espécimen se mantiene a una altura constante por ajustes en la presión vertical después de haberse inundado el espécimen en agua libre para obtener la presión de expansión. Subsecuentemente se ejecuta una prueba de consolidación de acuerdo con la norma INV E – 151. Los datos relacionados con el rebote o descarga se emplean para calcular el potencial de expansión.

Cálculos:

$$\text{Hinchamiento libre} = \frac{\Delta h}{h_o} \times 100 = \frac{e_{se} - e_o}{1 + e_o} \times 100 = \left(\frac{\gamma_{do}}{\gamma_{dse}} - 1 \right) \times 100 \quad (2.10)$$

Donde:

Δh = Cambio de altura del espécimen

h_o = Altura inicial del espécimen

e_{se} = Relación de vacíos después de estabilizar la expansión a la presión de asentamiento, σ_{se} .

e_o = Relación de vacíos inicial

γ_{do} = Masa unitaria seca a la relación de vacíos e_o

γ_{dse} = Masa unitaria seca a la relación de vacíos e_{se} .

2.10.4.2. Ensayo de hinchamiento libre de un suelo en edómetro UNE 103 601

Objeto:

Esta norma tiene por objeto describir el método para la determinación del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.

Se denomina hinchamiento libre, al incremento de altura, expresado como tanto por ciento del valor inicial, que experimenta una probeta de suelo cuando se encuentra confinada lateralmente, sometida a una presión vertical y se inunda de agua.

Así mismo, se describe en esta norma el procedimiento para determinar el hinchamiento de una probeta de suelo sometida a una presión determinada.

Es aplicable tanto a suelos inalterados como remoldeados.

Proceso operatorio:

Montaje de la célula. -

- Se coloca la placa porosa inferior sobre la base de la célula, seguidamente el anillo con la probeta, la placa porosa superior y el pistón de carga, de manera que todos estos elementos queden centrados sobre la superficie de la probeta. A continuación, se coloca el cuerpo lateral de cierre. Si el anillo es de tipo confinado, se debe acoplar la pieza de engarce entre la base de la célula y aquél.
- Cuando se trate de suelos con baja capacidad de absorción, se debe eliminar el agua libre de las placas porosas antes de colocarlas. En suelos con gran capacidad de absorción, dichas placas se deben secar al aire antes de colocarlas en el equipo.

Montaje en la bancada y preparación del ensayo. -

- Se coloca la célula edométrica sobre la bancada, ajustando seguidamente el contrapeso de manera que entren en contacto todos los elementos de transmisión de la carga y que quede la palanca prácticamente horizontal.
- Se aplica una ligera presión de ajuste, no superior a 3 kPa, colocando la pesa adecuada en el colgadero.
- Se coloca el medidor de deformaciones en posición de manera que el vástago tenga suficiente recorrido.

Realización del ensayo:

Determinación del hinchamiento libre. -

- Se aplica sobre la probeta una presión vertical de 10 kPa. Después de 5 min, se anota la lectura del medidor de deformaciones y se toma esta lectura como valor inicial de referencia.
- Se llena de agua el recipiente de la célula y se toman lecturas del medidor de deformaciones hasta alcanzar el equilibrio. La diferencia entre la última lectura y la inicial es el incremento de altura, Δh , experimentado por la probeta.

NOTA – Normalmente, en la mayoría de los casos se puede considerar alcanzado el equilibrio en un periodo no superior a 72 h. No obstante, en algunos suelos el proceso de hinchamiento se prolonga durante períodos de tiempo mucho más amplios. En tales circunstancias, la representación gráfica de la evolución del hinchamiento en función del tiempo puede servir de ayuda al técnico encargado, para decidir el momento de dar por finalizado el ensayo.

Determinación del hinchamiento bajo una presión determinada. –

- En ocasiones interesa conocer el hinchamiento que se produce cuando se ejerce una presión vertical determinada, que pudiera ser la equivalente a la que existe en el terreno. En ese caso se procede igual que en el apartado anterior, sustituyendo la presión vertical de 10kPa por la presión deseada.
- Una vez finalizado este proceso, se quitan las pesas que queden, se retira la célula de la bancada, se vacía el agua de la misma y a continuación se desmonta la célula, retirando el anillo con la probeta en su interior. Se eliminan las gotas de agua que queden en el anillo mediante papel absorbente. Se determina la masa húmeda final de la probeta en gramos y se introduce ésta en estufa para que se deseque, hasta masa constante, siguiendo el proceso operatorio descrito en la Norma UNE 103 300. Se determina la masa de la probeta seca en gramos.

Cálculos:

El hinchamiento libre se determina, en porcentaje, mediante la expresión:

$$\text{Hinchamiento libre} = \frac{\Delta h}{h_o} \times 100 \quad (2.11)$$

Donde:

h_0 = Es la altura inicial de la probeta en mm, que coincide con el anillo

Δh = Es la diferencia entre la lectura final y la inicial del medidor de deformaciones

Correspondencia con otras normas:

Esta norma es parcialmente equivalente a la Norma: A.S.T.M. D 4546-85. Thest Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potencial of Cohesive Soils.

2.11. Estadística

La estadística desempeña un papel fundamental en la realización de comparaciones, ya que proporciona herramientas y técnicas para resumir datos, realizar análisis comparativos, basar decisiones en evidencia sólida, controlar variables y generalizar resultados.

2.11.1 Variables dependientes

“La variable dependiente es aquella que se considera como el resultado o el efecto que se quiere explicar o predecir” (Levin, R. & Rubin, D., 2004, p. 22).

Una variable dependiente es aquella que se mide o se observa en un estudio o experimento y que se espera que cambie en respuesta a las manipulaciones o intervenciones realizadas en otras variables. La variable dependiente es considerada la variable de resultado en el estudio, ya que su valor depende de las condiciones del experimento o estudio y se utiliza para evaluar el efecto de las variables independientes. En otras palabras, la variable dependiente es la variable que se utiliza para medir el resultado o efecto del estudio y se espera que muestre cambios o diferencias entre los grupos o condiciones experimentales en función de las manipulaciones o intervenciones realizadas en las variables independientes o condiciones del estudio.

2.11.2. Variables independientes

"La variable independiente es aquella que se considera como la causa o el factor explicativo en un estudio" (Levin, R. & Rubin, D., 2004, p. 22).

Una variable independiente es aquella que se manipula o se controla en un experimento o estudio para evaluar su efecto sobre la variable dependiente. La variable independiente es considerada la causa o el factor que se está evaluando para ver si produce cambios o diferencias en la variable dependiente. En otras palabras, la variable independiente es la que se controla y se varía sistemáticamente en el estudio, y se espera que produzca diferentes niveles de respuesta en la variable dependiente.

2.11.3. Media

La media es ampliamente utilizada en estadística debido a su simplicidad y capacidad para proporcionar una medida representativa del conjunto de datos, siendo esta el promedio numérico de un conjunto de datos (Murray & Larry, 2009).

La media se define de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.8)$$

Donde:

x_i = Datos

n = Número de datos

2.11.4. Mediana

La mediana de un conjunto de números acomodados en orden de magnitud (es decir, en una ordenación) es el valor central o la media de los dos valores centrales (Murray & Larry, 2009).

La mediana se expresa por la fórmula:

$$Mediana = L_1 + \left(\frac{\frac{N}{2} - (\Sigma f)_1}{f_{mediana}} \right) c \quad (2.9)$$

Donde:

L_1 = Frontera inferior de la clase mediana (es decir, de la clase que contiene la mediana)

N = Número de datos (es decir, la frecuencia total)

$(\Sigma f)_1$ = Suma de las frecuencias de todas las clases anteriores a la clase mediana

$f_{mediana}$ = Frecuencia de la clase mediana

c = Amplitud del intervalo de la clase mediana

2.11.5. Desviación media

La desviación media, o desviación promedio, de un conjunto de N números X_1, X_2, \dots, X_n se abrevia DM (Murray & Larry, 2009).

La desviación media está definida así:

$$Desviación\ media = \frac{\sum_{j=1}^N |X_j - \bar{X}|}{N} = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N} \quad (2.10)$$

Donde:

X_j = Datos

\bar{X} = Media aritmética

N = Número de datos

2.11.6. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida estadística que cuantifica la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos con respecto a su media. Es útil para comprender la dispersión de los valores individuales y evaluar la consistencia o variabilidad de los datos (Murray & Larry, 2009).

La desviación estándar se puede definir como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N}} \quad (2.11)$$

Donde:

a = Es un promedio cualquiera además de la media aritmética

X_j = Datos

N = Número de datos

De todas las desviaciones estándar, la mínima es aquella en la que $a = \bar{X}$

2.11.7. Coeficiente de variación

Si la dispersión absoluta es la desviación estándar s y el promedio es la media \bar{X} , entonces a la dispersión relativa se le llama coeficiente de variación o coeficiente de dispersión; este coeficiente se denota por CV (Murray & Larry, 2009).

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2.12)$$

Siempre que $\bar{X} \neq 0$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{X} = Media aritmética

Y expresado en porcentaje, es de la siguiente forma:

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad (2.13)$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{X} = Media aritmética

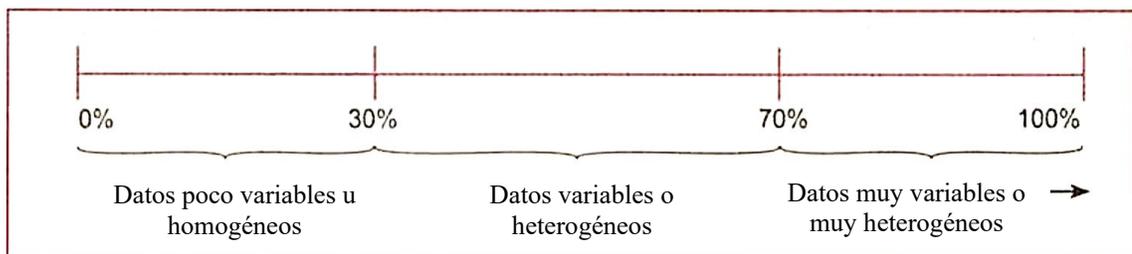
Esta medida es adimensional, por lo tanto, se convierte en un indicador efectivo para comparar dos o más variables distintas o dos o más poblaciones diferentes.

2.11.7.1. Interpretación del coeficiente de variación

Vargas (2007) nos presenta una forma de interpretar los valores del coeficiente de variación:

- $CV \leq 30\%$, los datos de la muestra son relativamente homogéneos. Por lo tanto, la media es representativa.
- $30\% < CV \leq 70\%$, los datos de la muestra son heterogéneos. Por lo tanto, la media no es representativa.
- $CV > 70\%$, los datos de la muestra son muy variables o heterogéneos. Por lo tanto, la media no es representativa.

Figura 2.18. Interpretación de los valores del coeficiente de variación



Fuente: Vargas (2007)

2.11.8. Prueba de hipótesis

Martínez (2012) define a la hipótesis estadística como pruebas de significación que tienen como objeto principal evaluar suposiciones o afirmaciones acerca de los valores estadísticos de la población, denominados parámetros.

Walpole et al (2012) definen que, “una hipótesis estadística es una aseveración o conjetura respecto a una o más poblaciones”.

2.11.8.1. La hipótesis nula y la hipótesis alternativa

Martínez (2012) define lo siguiente:

- La hipótesis nula es la que hace referencia al valor del parámetro que se quiere probar como verdadero.
- La hipótesis alternativa o falsa, a aquella que establece que el parámetro puede ser mayor, menor o distinto, de acuerdo con la propuesta hecha en la hipótesis nula.

La estructura de la prueba de hipótesis se establece utilizando el término hipótesis nula, el cual hace referencia a cualquier hipótesis que se desea probar y se denota con H_0 . El rechazo de H_0 conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa, que se denota con H_1 (Walpole et al., 2012).

2.11.8.2. Tipos de error

Existen dos tipos de errores que se pueden presentar al momento de probar una hipótesis.

Walpole et al (2012) define lo siguiente:

- El rechazo de la hipótesis nula cuando es verdadera se denomina error tipo I.
- No rechazar la hipótesis nula cuando es falsa se denomina error tipo II.

Tabla 2.7. Situaciones posibles al probar una hipótesis estadística

	H₀ es verdadera	H₀ es falsa
No rechazar H₀	Decisión correcta	Error tipo II
Rechazar H₀	Error tipo I	Decisión correcta

Fuente: Walpole et al (2012)

2.11.8.3. Propiedades de una prueba de hipótesis

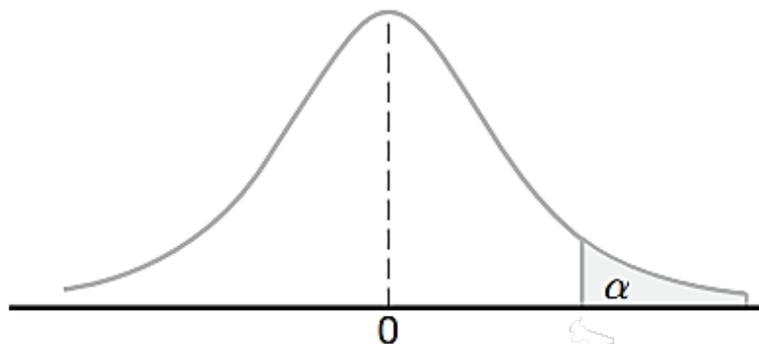
Walpole et al (2012) describe las siguientes propiedades:

- Los errores tipo I y tipo II están relacionados. Por lo general una disminución en la probabilidad de cometer uno da como resultado un incremento en la probabilidad de cometer el otro.
- El tamaño de la región crítica y, por lo tanto, la probabilidad de cometer un error tipo I, siempre se puede reducir ajustando el (los) valor(es) crítico(s).
- Un aumento en el tamaño de la muestra n reducirá α y β de forma simultánea.
- Si la hipótesis nula es falsa, β es un máximo cuando el valor verdadero de un parámetro se aproxima al valor hipotético. Cuanto más grande sea la distancia entre el valor verdadero y el valor hipotético, más pequeña será β .

2.11.8.4. Prueba unilateral

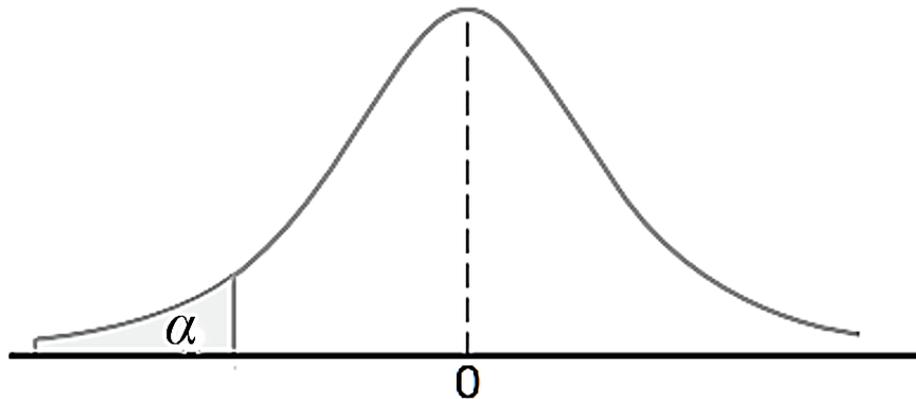
La prueba de hipótesis unilateral es aquella en la cual la zona de rechazo o zona crítica está completamente comprendida en uno de los extremos de la distribución. La prueba es unilateral a la derecha (de la curva); cuando la hipótesis alternativa de lo que se quiere probar, hace mención por ejemplo a que los salarios que paga una empresa son mayores; que la calidad de un producto es superior; que el rendimiento académico es mejor, etc. Si por el contrario, la hipótesis alternativa se refiere a que los salarios son inferiores, que el producto es de menor calidad, que el rendimiento académico es bajo, etc., corresponderá a una prueba unilateral a la izquierda (Martínez, 2012).

Figura 2.19. Prueba unilateral a la derecha



Fuente: Walpole et al (2012)

Figura 2.20. Prueba unilateral a la izquierda

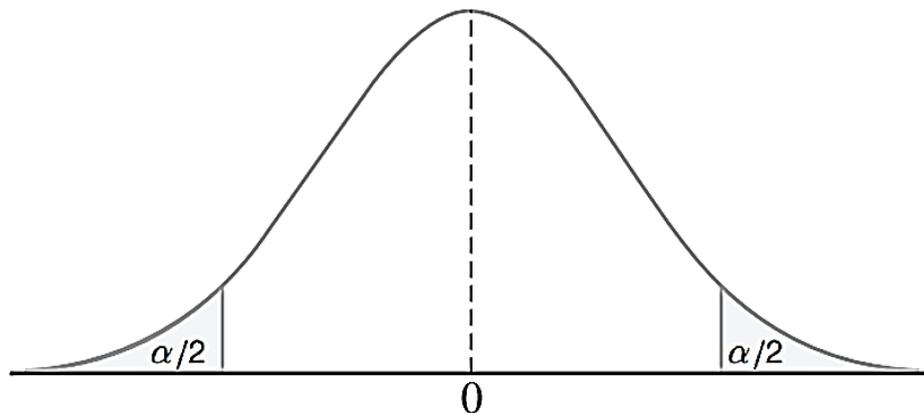


Fuente: Walpole et al (2012)

2.11.8.5. Prueba de bilateral

Martínez (2012) define que en el caso de que la prueba comprenda áreas o zonas de rechazo en ambos extremos de la distribución, se dice que la prueba es bilateral o sea que la hipótesis alternativa es diferente; por lo tanto se omiten los términos de superior, mayor, mejor, inferior, bajo, menor, etc.

Figura 2.21. Prueba bilateral



Fuente: Walpole et al (2012)

Se denomina prueba de dos colas, ya que la región crítica se divide en dos partes, a menudo con probabilidades iguales en cada cola de la distribución del estadístico (Walpole et al., 2012)

2.11.8.6. Nivel de significancia

El nivel de significancia, también conocido como nivel de confianza, es un parámetro utilizado en pruebas de hipótesis estadísticas para tomar decisiones sobre la aceptación o rechazo de una hipótesis nula. Se representa con el símbolo α . El nivel de significancia establece el umbral o límite de probabilidad bajo el cual se rechaza la hipótesis nula.

Walpole et al (2012) explica que la preselección de un nivel de significancia α tiene sus raíces en la filosofía de que se debe controlar el riesgo máximo de cometer un error tipo I. Sin embargo, este enfoque no explica los valores del estadístico de prueba que están “cercaños” a la región crítica.

Martínez (2012) explica que, se entiende por nivel de significación a la máxima probabilidad de que se especifique con el fin de hacer mínimo el error tipo I. Generalmente, esta probabilidad se fija antes de escoger la muestra. El nivel de significación se simboliza por α , siendo generalmente del 1%, 5% o 10%, pero se puede usar cualquier nivel, dependiendo del tipo de investigación que se realice.

Cuando se trabaja con un nivel del 5%, el resultado es significativo; si se emplea el 1%, el resultado es altamente significativo, y si es del 10%, se considera poco significativo.

2.11.8.7. Procedimiento a seguir en las pruebas de hipótesis

Martínez (2012) define los siguientes pasos a seguir para realizar una prueba de hipótesis:

- Formular la hipótesis nula y la alternativa.
- Seleccionar el nivel de significación.
- Conocer o estimar la varianza.
- Determinar la técnica y la prueba estadística.
- Determinar los valores críticos y sus regiones de rechazo.
- Calcular los datos muestrales, utilizando las fórmulas correspondientes.
- Tomar la decisión estadística, de aceptar o rechazar.

2.11.8.8. Distribución de medias muestrales

La distribución de las muestras de medios se refiere a la distribución de todas las muestras de medios posibles que se obtuvieron al tomar muestras de una población. Es una distribución teórica que se utiliza para comprender el comportamiento de los medios muestrales y hacer inferencias sobre la población.

2.11.8.8.1. Cuando la muestra es grande

Se dice que una muestra es grande cuando esta es mayor a 30. Cuando el tamaño de la muestra es grande, la distribución de los medios muestrales se aproxima a una distribución normal, independientemente de la forma de la distribución de la población original.

Según Martínez (2012) en el caso que se desconozca la desviación típica poblacional, se le podrá remplazar por la desviación estándar muestral, siempre que la muestra sea grande.

La siguiente fórmula es cuando se conoce la varianza poblacional:

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad \text{Cuando } n > 30 \quad (2.14)$$

Donde:

\bar{x} = Media de la muestra

μ = Media poblacional

σ = Varianza poblacional

n = Tamaño de la muestra

2.11.8.8.2. Cuando la muestra es pequeña

Cuando el problema nos da la desviación estándar muestral y a la vez el tamaño de la muestra es menor o igual a 30 ($n < 30$), se utiliza la distribución t de student y se aplica la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad \text{Cuando } n < 30 \quad (2.15)$$

Donde:

\bar{x} = Media de la muestra

μ = Media poblacional

s = Desviación estándar de la muestra

n = Tamaño de la muestra

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE DATOS

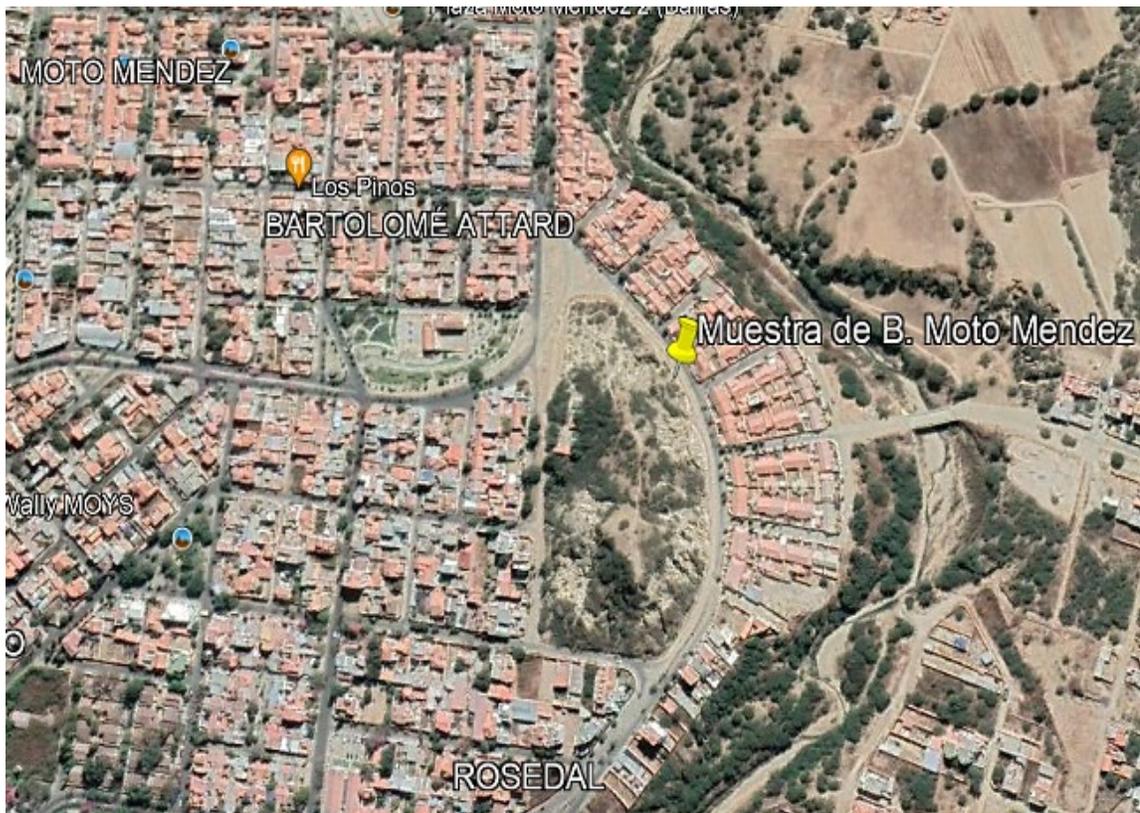
3.1. Reconocimiento y ubicación de las zonas de extracción de las muestras en estudio

3.1.1. Barrio Moto Méndez

El lugar donde se extrajo la muestra 1, está ubicado en el barrio Moto Méndez, específicamente en una colina que comparte con el barrio Juan Nicolai. Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°32'7.73" S
- Longitud: 64°42'17.48" O

Figura 3.1. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 1



Fuente: Google Earth

La muestra número 1 se extrajo al pie del talud de la colina, realizando una calicata.

El punto de extracción de la muestra se encuentra a una distancia vertical de 2 m respecto a la corona o cresta del talud.

Figura 3.2. Sitio de extracción de la muestra 1



Fuente: Elaboración propia

En dicha colina está previsto la construcción de un mirador tipo parque, esta información se me fue proporcionada por la Mesa Directiva del Barrio Moto Méndez.

Los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de dicha muestra, pueden ser de utilidad para el diseño de los cimientos de las futuras estructuras que se emplazarán en el lugar, debido a que estos brindan información del tipo de suelo del que se trata, las propiedades y expansión que este tiene.

La nota proporcionada por la Mesa Directiva del barrio Moto Méndez se encuentra en anexos.

3.1.2. Barrio Germán Busch

El lugar donde se extrajo la muestra 2, está ubicado en el barrio Germán Busch.

En las cercanías de este lugar de extracción, se pueden encontrar diversas ladrilleras artesanales, lo cual indica la presencia de arcilla en el suelo, motivo por el cual, la zona fue de interés como área de estudio.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°32'31.24" S
- Longitud: 64°44'16.58" O

Figura 3.3. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 2



Fuente: Google Earth

Esta muestra se extrajo de un talud de la mitad del cuerpo del talud.

Figura 3.4. Sitio de extracción de la muestra 1



Fuente: Elaboración propia

La extracción de esta muestra de este talud está debidamente justificada debido a la presencia de construcciones por encima del mismo.

Figura 3.5. Construcción que se encuentra por encima del talud en cuestión



Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Barrio 26 de Agosto

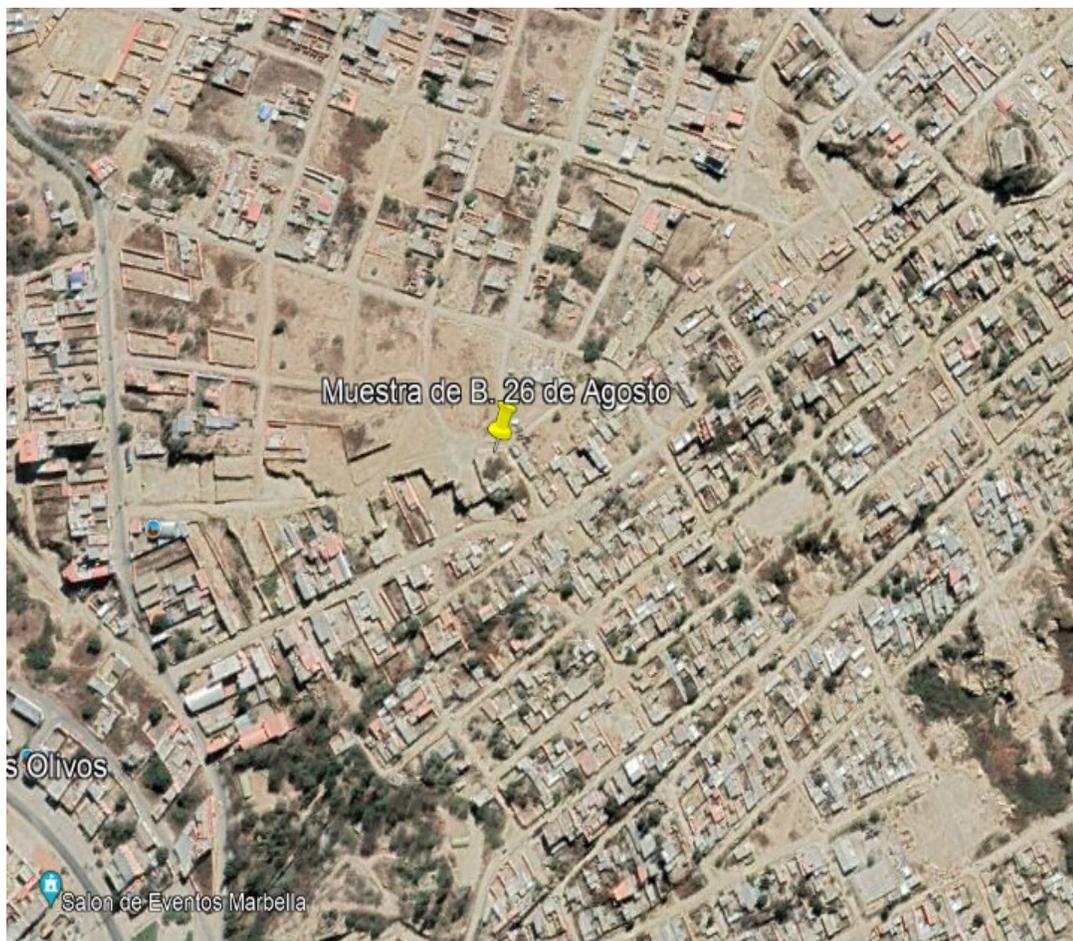
El lugar donde se extrajo la muestra 3, está ubicado en el barrio 6 de Agosto.

La zona es árida, con la presencia de muy poca vegetación. La muestra se extrajo a una profundidad de 1 m aproximadamente.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°29'52.99" S
- Longitud: 64°45'0.69" O

Figura 3.6. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 3



Fuente: Google Earth

3.1.4. Barrio Monte Sud

El lugar donde se extrajo la muestra 4, está ubicado en el barrio Monte Sud.

La muestra se extrajo de la base o pie de la colina que se encuentra en cercanías de la Quebrada El Monte.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°30'13.78" S
- Longitud: 64°43'15.87" O

Figura 3.7. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 4



Fuente: Google Earth

La muestra se extrajo de la base o pie del talud, como se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 3.8. Punto de extracción al pie del talud



Fuente: Elaboración propia

La extracción de esta muestra está justificada debido a que se extrajo de la parte de la base del mismo, lo cual refleja las condiciones naturales de un suelo a nivel subrasante.

3.1.5. Barrio San Bernardo

El lugar donde se extrajo la muestra 5, está ubicado en el barrio San Bernardo. Es un barrio poblado, la muestra se extrajo de un lote en el cual se planifica realizar una construcción y a una profundidad de 2 m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°31'27.90" S
- Longitud: 64°43'23.91" O

Figura 3.9. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 5



Fuente: Google Earth

3.1.6. Villa Avaroa

El lugar donde se extrajo la muestra 6, está ubicado en el barrio Avaroa entre las calles Ballivián y Ayoroa. Es un barrio que se encuentra cerca de la Bombonera. La muestra se extrajo de un lote en el cual se planifica realizar una construcción. La muestra se extrajo a una profundidad de 4m mediante el uso del tubo shelby de paredes delgadas.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°31'19.77" S
- Longitud: 64°43'58.25" O

Figura 3.10. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 6



Fuente: Google Earth

3.1.7. Zona avenida La Banda

El lugar donde se extrajo la muestra 7, está ubicado en cercanías del Puente Bolívar.

La muestra se extrajo mediante un tubo Shelby a una profundidad de 2,15m. El lugar de extracción es un lote en el cual se planifica realizar una construcción, la muestra de suelo tenía un color gris oscuro, húmeda y plástica al tacto.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°32'25.10" S
- Longitud: 64°44'7.15" O

Figura 3.11. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 7



Fuente: Google Earth

3.1.8. Barrio Miraflores

El lugar donde se extrajo la muestra 8, está ubicado en el barrio Miraflores y a una profundidad de aproximadamente 1m.

La zona es árida y en cercanías se encuentra la Villa Olímpica.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°33'20.56" S
- Longitud: 64°43'54.42" O

Figura 3.12. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 8



Fuente: Google Earth

3.1.9. Barrio Lourdes

El lugar donde se extrajo la muestra 9, está ubicado en el barrio Lourdes.

La muestra se extrajo de una zona árida, en plena esquina y que se encuentra al lado de la Iglesia Ríos de Agua Viva. La muestra se extrajo a una profundidad de 1m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°30'35.30" S
- Longitud: 64°43'28.95" O

Figura 3.13. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 9



Fuente: Google Earth

3.1.10. Zona de la Nueva Terminal

El lugar donde se extrajo la muestra 10 es de interés, debido a que se encuentra cerca de la nueva terminal de autobuses, lo que ha provocado un crecimiento y una mayor población en la zona y es de prever nuevas construcciones civiles. La muestra se extrajo a una profundidad de 1m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°33'44.92" S
- Longitud: 64°40'28.39" O

Figura 3.14. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 10



Fuente: Google Earth

3.1.11. Barrio San Blas

El lugar donde se extrajo la muestra 11, está ubicado en el barrio San Blas.

La muestra fue extraída de una zona árida que cuenta con la existencia de diversos lotes sin poblar por lo que se prevé la construcción de obras civiles en un futuro. La muestra se extrajo a una profundidad de 1m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°34'13.55" S
- Longitud: 64°43'31.22" O

Figura 3.15. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 11



Fuente: Google Earth

3.1.12. Barrio Fray Quebracho

El lugar donde se extrajo la muestra 13, está ubicado en el barrio Fray Quebracho, es una zona árida y se encuentra al frente de una avenida sin nombre, existen muchos lotes sin poblar por lo que se prevé construcciones civiles en un futuro. La muestra se extrajo a una profundidad de 0,5m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°30'1.29" S
- Longitud: 64°44'9.76" O

Figura 3.16. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 12



Fuente: Google Earth

3.1.13. Barrio Aranjuez Bajo

El lugar donde se extrajo la muestra 13, está ubicado en el barrio Aranjuez Bajo, específicamente una colina que está al lado de la Avenida Integración, en cercanías del Condominio Aranjuez Bajo.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°30`57.89" S
- Longitud: 64°45`3.66" O

Figura 3.17. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 13



Fuente: Google Earth

La muestra se extrajo de la parte baja del talud.

La extracción de la muestra de un talud está justificada debido a que se encuentran construcciones por encima del mismo, como se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 3.18. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 13



Fuente: Elaboración propia

3.1.14. Barrio Morros Blancos

El lugar donde se extrajo la muestra 14, está ubicado en el barrio de Morros Blancos, en cercanías del relleno Sanitario de Pampa Galana. La muestra fue extraída a una profundidad aproximada de 1m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°31'55.98" S
- Longitud: 64°41'15.89" O

Figura 3.19. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 14



Fuente: Google Earth

3.1.15. Barrio Los Olivos

El lugar donde se extrajo la muestra 15, está ubicado en el barrio Los Olivos, y al lado de la fábrica de cerámicos INCERTAR, lo que indica que es un suelo con posible presencia de arcilla. La muestra fue extraída a una profundidad aproximada de 1m.

Las coordenadas son las siguientes:

- Latitud: 21°30'2.19" S
- Longitud: 64°45'15.57" O

Figura 3.20. Ubicación del sitio de extracción de la muestra 15



Fuente: Google Earth

3.2. Muestreo

Se realizó una inspección preliminar para definir el punto de extracción de la muestra, observando de esta manera la consistencia y color de los suelos en estudio.

La cantidad extraída fue de aproximadamente 10kg por cada muestra.

3.2.1. Tipo de muestras

En este proyecto de grado, se utilizaron dos tipos de muestras: inalteradas y alteradas. Las muestras inalteradas fueron seleccionadas específicamente para realizar el ensayo de hinchamiento libre en el edómetro, preservando su estructura y contenido de humedad natural. Esto se llevó a cabo con el propósito de simular las condiciones naturales de la muestra y evaluar su posible expansión. Por otro lado, las muestras alteradas se emplearon en los ensayos de caracterización.

3.2.2. Toma de las muestras

Se limpió y retiró la capa expuesta de lugar de muestreo y se procedió con la extracción de ambos tipos de muestra, comenzando primero por la muestra alterada seguida por la inalterada.

Se extrajo las muestras de dos maneras, mediante calicatas y mediante el uso de un tubo Shelby de paredes delgadas.

Material utilizado:

- Pala
- Pico
- Bolsas de plástico
- Lona de polietileno

Procedimiento de calicata:

- Con el pico se procedió a retirar la capa superficial de la zona de extracción seleccionada, de esta manera se evitó aquellos suelos que hayan sufrido alteraciones al estar expuestos a la intemperie.

- Se procedió a excavar hasta una profundidad que se consideró adecuada para la extracción una muestra inalterada, dependiendo el caso.
- Una vez extraída la muestra inalterada se procedió a colocarla inmediatamente en unas bolsas, para conservar su humedad natural.
- De igual manera se procedió a tomar muestras alteradas, mismas que se usaron para poder realizar los ensayos de caracterización de los suelos.
- Se guardó las muestras en sus respectivas bolsas para el traslado al laboratorio.

Figura 3.21. Muestreo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22. Excavación



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23. Extracción de muestra inalterada



Fuente: Elaboración propia

Las muestras cinco, seis y siete; se extrajeron mediante el uso del tubo shelby que es una herramienta utilizada para obtener muestras inalteradas de suelo en el campo, este tubo era de paredes delgadas debido a que se trata de un suelo fino.

Figura 3.24. Muestra extraída mediante tubo shelby



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento de extracción mediante tubo Shelby:

- Se realizó un lavado previo del barreno.
- Se acopló el tubo shelby a la tubería de perforación.
- Procedimos a introducirlo al barreno.
- Se procedió a hincar el muestreador a una velocidad constante y con un movimiento continuo.
- Al finalizar el hincado se saca el muestreador del fondo y se retira junto con las barras empleadas y se procede a lavar con abundante agua la sarta de perforación y el muestreador.

Figura 3.25. Tubo shelby con muestra inalterada de suelo fino



Fuente: Elaboración propia

3.3. Ensayos de caracterización de las muestras de suelo

3.3.1. Límite Líquido y límite plástico ASTM D 4318

El límite líquido es una propiedad física de los suelos que se utiliza para caracterizar su comportamiento frente a la humedad. Se define como el contenido de agua en el suelo en el cual el mismo adquiere una consistencia semilíquida y adquiere la capacidad de fluir bajo su propio peso. Se determina mediante un ensayo llamado Casagrande, que consiste en colocar una muestra de suelo en un recipiente y realizar un corte en la muestra con una

ranura. A medida que se va agregando agua, se va cerrando la ranura aplicando golpes en una superficie de impacto. El límite líquido se alcanza cuando la ranura se cierra por completo después de 25 golpes.

Figura 3.26. Ensayo para obtención de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

El límite plástico es una propiedad del suelo que se utiliza para evaluar su plasticidad, es decir, su capacidad de deformarse y mantener esa deformación bajo cargas aplicadas. Se define como el contenido de humedad en el suelo en el cual la muestra adquiere la consistencia de una pasta plástica y puede ser moldeada sin romperse.

Para determinar esta propiedad, se agrega agua gradualmente a una muestra de suelo hasta que adquiere una consistencia plástica y puede ser enrollada en forma de hilo de 3 mm de diámetro. El límite de plástico se registra como el contenido de humedad correspondiente.

Figura 3.27. Ensayo para obtención del límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Luego de realizados los ensayos de límite líquido y plástico en las 15 muestras de suelo, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3.1. Límite líquido, plástico e índice de plasticidad

Muestra	Límites de Atterberg ASTM D 4318		
	LL	LP	IP
M1	50,06	23,93	26,13
M2	41,13	25,22	15,91
M3	32,69	21,99	10,70
M4	51,69	24,96	26,74
M5	51,22	25,88	25,34
M6	48,71	22,28	26,43
M7	33,08	22,19	10,88
M8	47,15	23,24	23,90
M9	36,53	25,60	10,93
M10	42,17	24,79	17,39
M11	50,22	24,62	25,60

M12	46,45	26,28	20,17
M13	34,02	23,55	10,48
M14	42,23	23,93	18,30
M15	53,05	24,65	28,40

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Gravedad específica de los sólidos ASTM D 854

La gravedad específica del suelo es una medida que indica la densidad relativa de un suelo en comparación con la densidad del agua. Se define como la relación entre la masa volumétrica de un suelo seco y la masa volumétrica del agua a una temperatura específica.

Figura 3.28. Ensayo de gravedad específica de los sólidos



Fuente: Elaboración propia

Se realizó este ensayo según la norma ASTM D 854 y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 3.2. Gravedad específica de las muestras estudiadas

Resumen de gravedad específica de los sólidos	
M1	2,714
M2	2,681
M3	2,676
M4	2,717
M5	2,716
M6	2,692
M7	2,676
M8	2,684
M9	2,678
M10	2,680
M11	2,716
M12	2,682
M13	2,677
M14	2,681
M15	2,717

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D 7928

Este ensayo es una técnica utilizada en la geotecnia para determinar la distribución granulométrica de un suelo. Este ensayo se basa en la sedimentación de las partículas del suelo en una solución acuosa y la posterior medición de las alturas de sedimentación.

Figura 3.29. Equipos necesarios para ensayo de granulometría por hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.30. Ensayo de granulometría por hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31. Realización del ensayo de granulometría por hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Para realizar este análisis granulométrico se usó el hidrómetro 152H y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3.3. Resumen de la prueba de hidrómetro de las muestras estudiadas

Resumen hidrómetro			
Muestra	% Arena	% Limos	% Arcillas
M1	1,65	56,37	41,98

M2	2,39	66,26	31,35
M3	3,54	63,29	33,17
M4	1,89	49,72	48,39
M5	2,70	45,73	51,57
M6	1,48	59,62	38,90
M7	1,78	75,06	23,16
M8	2,57	68,73	28,70
M9	2,51	71,34	26,15
M10	3,36	68,78	27,86
M11	3,24	59,10	37,66
M12	2,68	68,09	29,23
M13	2,92	71,51	25,57
M14	3,12	68,05	28,83
M15	2,86	59,90	37,24

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Clasificación de los suelos ASTM D2487

Se clasificó las muestras de suelo mediante los sistemas AASHTO y SUCS, estos describen y clasifican los suelos con base en sus características físicas y mecánicas.

Figura 3.32. Ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33. Ensayo de granulometría por lavado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Clasificación de las muestras de suelo estudiadas

Muestra	Clasificación de suelos		Porcentaje que pasa tamiz				Contenido de humedad	Límites de Atterberg ASTM D 4318		
	SUCS - ASTM D 2487	AASHTO M-145	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	W%	LL	LP	IP
M1	CH	A-7-6 (16)	100,00	100,00	100,00	98,36	9,68	50,06	23,93	26,13
M2	CL	A-7-6 (11)	100,00	100,00	100,00	98,73	10,99	41,13	25,22	15,91
M3	CL	A-6 (8)	100,00	100,00	100,00	98,56	3,18	32,69	21,30	11,39
M4	CH	A-7-6 (17)	100,00	100,00	100,00	97,18	8,01	51,69	24,96	26,74
M5	CH	A-7-6 (16)	100,00	100,00	99,26	97,09	26,47	51,22	25,88	25,34
M6	CL	A-7-6 (16)	100,00	100,00	99,06	96,98	22,47	48,71	22,28	26,43
M7	CL	A-6 (8)	100,00	100,00	100,00	97,56	22,06	33,08	22,19	10,88
M8	CL	A-7-6 (15)	100,00	100,00	100,00	98,40	7,86	47,15	23,24	23,90
M9	CL	A-6 (8)	100,00	100,00	100,00	97,92	13,41	36,53	25,60	10,93
M10	CL	A-7-6 (11)	100,00	100,00	100,00	97,32	10,39	42,17	24,79	17,39
M11	CH	A-7-6 (16)	100,00	100,00	100,00	97,32	5,44	50,22	24,62	25,60
M12	CL	A-7-6 (13)	100,00	100,00	100,00	98,18	7,73	46,45	26,28	20,17
M13	CL	A-6 (8)	100,00	100,00	100,00	98,03	9,43	34,02	23,55	10,48
M14	CL	A-7-6 (12)	100,00	100,00	100,00	96,03	14,37	42,23	23,93	18,30
M15	CH	A-7-6 (18)	100,00	100,00	100,00	97,86	19,62	53,05	24,65	28,40

Fuente: Elaboración propia

3.4. Ensayo de hinchamiento libre mediante el uso del edómetro

Este ensayo se realizó bajo una presión de 7KPa, misma que era una condición para ingresar a la tabla 8 y así determinar el grado de expansión.

Para aplicar la presión de 7 KPa se aplicó una carga de 0,250 Kg para el edómetro que tenía una relación de brazo de 10:1. Y para el edómetro azul se aplicó una carga de 2,5 Kg debido a que este edómetro es de carga directa.

La muestra fue tallada a partir de un estrato inalterado.

Figura 3.34. Tallado de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Para la realización del ensayo de hinchamiento libre se hizo el uso de papel filtro de laboratorio.

Figura 3.35. Colocado de la muestra al equipo



Fuente: Elaboración propia

Se realizó el uso de ambos edómetros que se encuentran en el laboratorio, esto para optimizar el tiempo.

El edómetro que se puede observar en la siguiente imagen tiene una deformación de 0,002mm en su dial, se usó con una relación de brazo de palanca de 1:10, su anillo es de 6,3cm de diámetro interno y una altura de 2cm.

Figura 3.36. Edómetro



Fuente: Elaboración propia

El siguiente edómetro tiene un deformímetro con una escala de deformación de 0,01mm, es de carga directa, tiene un anillo de 6,4cm de diámetro interno y una altura de 2,9cm.

Figura 3.37. Edómetro



Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el ensayo a todas las muestras de estudio se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3.5. Hinchamiento libre

Muestra	Hinchamiento libre %
M1	15,23
M2	10,97
M3	4,88
M4	15,36
M5	15,41
M6	15,02
M7	2,80
M8	13,56
M9	3,97
M10	9,97
M11	15,50
M12	14,23
M13	5,28
M14	10,11
M15	20,64

Fuente: Elaboración propia

3.5. Clasificación de suelos expansivos

3.5.1. Límite líquido

Para clasificar los suelos expansivos mediante el límite líquido se hace el uso de la tabla 3.

Tabla 3.6. Predicción de la expansividad del suelo por límite líquido

Clasificación de suelos expansivos según límite líquido		
Muestra	Chen	IS 1498
M1	Alto	Alto
M2	Alto	Medio
M3	Medio	Bajo
M4	Alto	Alto
M5	Alto	Alto
M6	Alto	Medio
M7	Medio	Bajo
M8	Alto	Medio
M9	Medio	Medio
M10	Alto	Medio
M11	Alto	Alto
M12	Alto	Medio
M13	Medio	Bajo
M14	Alto	Medio
M15	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Índice de plasticidad

Se realizó la clasificación de suelos expansivos haciendo uso de la tabla 4 y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 3.7. Predicción de la expansividad del suelo por índice de plasticidad

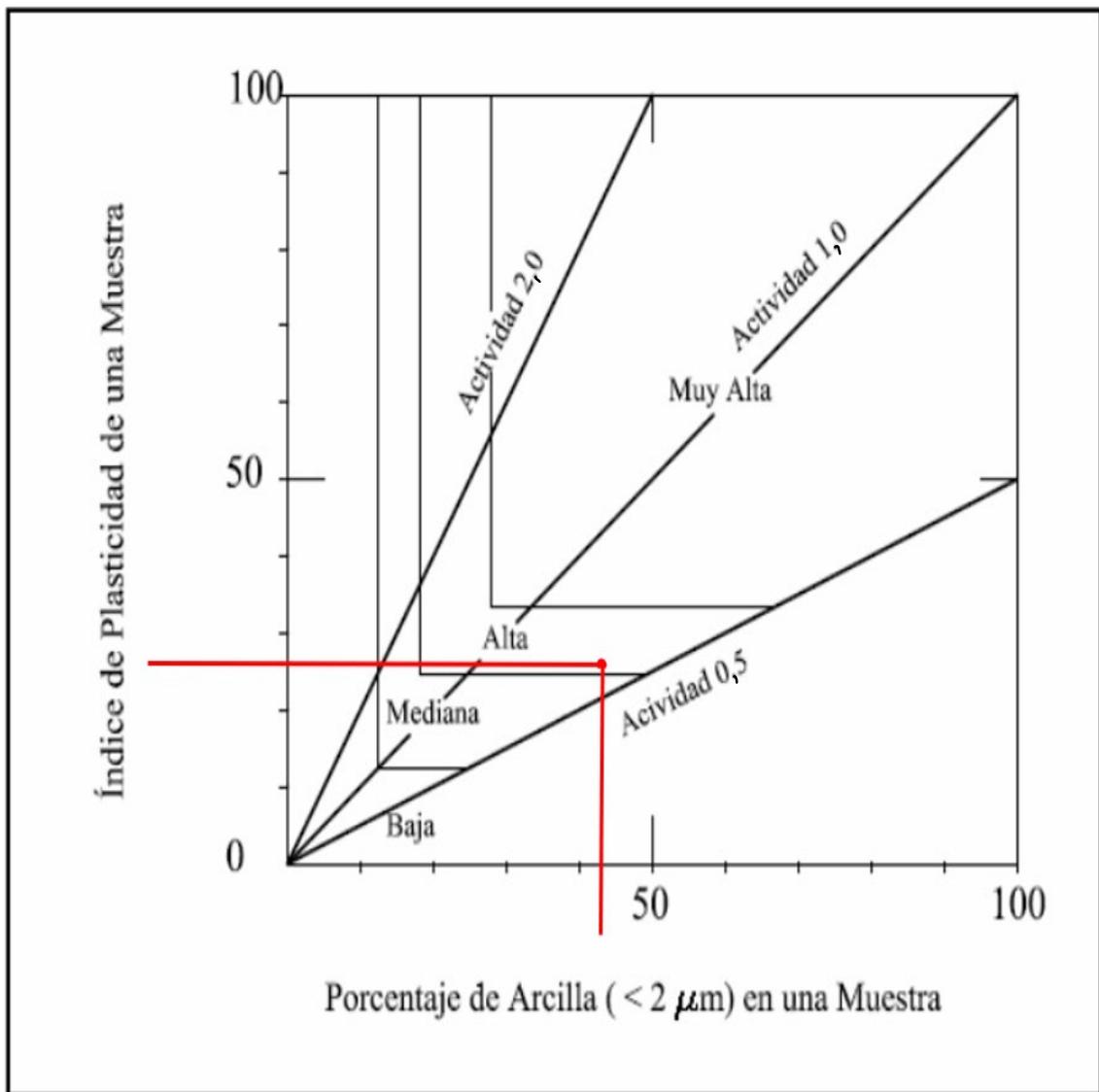
Clasificación de suelos expansivos según índice de plasticidad		
Muestra	Chen	IS 1498
M1	Alto	Alto
M2	Medio	Medio
M3	Medio	Bajo
M4	Alto	Alto
M5	Alto	Alto
M6	Alto	Alto
M7	Medio	Bajo
M8	Alto	Alto
M9	Medio	Bajo
M10	Medio	Medio
M11	Alto	Alto
M12	Alto	Medio
M13	Medio	Bajo
M14	Medio	Medio
M15	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Mediante carta de actividad de la norma E.050.

Primeramente, se procedió a determinar la actividad de la arcilla y de manera posterior se procedió a ingresar a la figura 5.12 para así poder determinar el posible grado de expansión de los suelos.

Figura 3.38. Grado de expansión de la M1 determinada mediante la actividad y la carta de plasticidad de plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Predicción de la expansividad del suelo por actividad y norma E050

Muestra	Actividad de la acilla		Grado de expansión según norma E050
	A	Potencial expansión	
M1	0,63	Arcilla inactiva	Alto
M2	0,51	Arcilla inactiva	Medio
M3	0,33	Arcilla inactiva	Bajo
M4	0,57	Arcilla inactiva	Alto
M5	0,51	Arcilla inactiva	Bajo
M6	0,70	Arcilla inactiva	Alto
M7	0,48	Arcilla inactiva	Bajo
M8	0,85	Arcilla normal	Medio
M9	0,43	Arcilla inactiva	Bajo
M10	0,64	Arcilla inactiva	Medio
M11	0,70	Arcilla inactiva	Alto
M12	0,70	Arcilla inactiva	Medio
M13	0,42	Arcilla inactiva	Medio
M14	0,66	Arcilla inactiva	Medio
M15	0,78	Arcilla normal	Alto

Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Edómetro

Para la clasificación de suelos expansivos mediante el uso del edómetro se hizo el uso de la tabla 8,

Tabla 3.9. Predicción de la expansividad del suelo por edómetro

Muestra	Tipo de arcilla	Expansión del suelo
M1	Hinchazón	Alto
M2	Hinchazón	Medio
M3	Mezcla entre hinchamiento y no hinchamiento	Bajo
M4	Hinchazón	Alto
M5	Hinchazón	Alto
M6	Hinchazón	Alto
M7	Mezcla entre hinchamiento y no hinchamiento	Bajo
M8	Hinchazón	Medio
M9	Mezcla entre hinchamiento y no hinchamiento	Bajo
M10	Hinchazón	Medio
M11	Hinchazón	Alto
M12	Hinchazón	Medio
M13	Hinchazón	Medio
M14	Hinchazón	Medio
M15	Hinchazón	Alto

Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Resumen de los resultados de la clasificación de suelos expansivos

En la siguiente tabla se muestra un resumen de la clasificación de suelos expansivos realizada por varios métodos.

Tabla 3.10. Clasificación de suelos expansivos

Tabla resumen						
Muestra	Clasificación de los suelos expansivos					
	Método del LL		Método del IP		Carta de actividad	Edómetro
	Chen (1975)	IS 1498	Chen (1975)	IS 1498		
M1	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
M2	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
M3	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
M4	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
M5	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto
M6	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto
M7	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
M8	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio	Medio
M9	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
M10	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
M11	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
M12	Alto	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio
M13	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Medio
M14	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
M15	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11. Clasificación y caracterización de suelos expansivos

Tabla resumen																		
Muestra	Clasificación de los suelos expansivos							Clasificación de suelos		Porcentaje que pasa tamiz				Contenido de humedad	Límites de atterberg			Gravedad específica
	Método del LL		Método del IP		Carta de actividad	Edómetro												
	Chen	IS 1498	Chen	IS 1498		Grado	Cuantitativo	SUCS	AASHTO	N°4	N°10	N°40	N°200	W%	LL	LP	IP	Gs
M1	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	15,23	CH	A-7-6 (16)	100	100	100	98,36	9,68	50,06	23,93	26,13	2,71
M2	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	10,97	CL	A-7-6 (11)	100	100	100	98,73	10,99	41,13	25,22	15,91	2,68
M3	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	4,88	CL	A-6 (8)	100	100	100	98,56	3,18	32,69	21,30	11,39	2,68
M4	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	15,36	CH	A-7-6 (17)	100	100	100	97,18	8,01	51,69	24,96	26,74	2,72
M5	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	15,41	CH	A-7-6 (16)	100	100	99,26	97,09	26,47	51,22	25,88	25,34	2,72
M6	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto	15,02	CL	A-7-6 (16)	100	100	99,06	96,98	22,47	48,71	22,28	26,43	2,69
M7	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	2,8	CL	A-6 (8)	100	100	100	97,56	22,06	33,08	22,19	10,88	2,68
M8	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio	Medio	13,56	CL	A-7-6 (15)	100	100	100	98,40	7,86	47,15	23,24	23,90	2,68
M9	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	3,97	CL	A-6 (8)	100	100	100	97,92	13,41	36,53	25,60	10,93	2,68
M10	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	9,97	CL	A-7-6 (11)	100	100	100	97,32	10,39	42,17	24,79	17,39	2,68
M11	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	15,5	CH	A-7-6 (16)	100	100	100	97,32	5,44	50,22	24,62	25,60	2,72
M12	Alto	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	14,23	CL	A-7-6 (13)	100	100	100	98,18	7,73	46,45	26,28	20,17	2,68
M13	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Medio	5,28	CL	A-6 (8)	100	100	100	98,03	9,43	34,02	23,55	10,48	2,68
M14	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	10,11	CL	A-7-6 (12)	100	100	100	96,03	14,37	42,23	23,93	18,30	2,68
M15	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	20,64	CH	A-7-6 (18)	100	100	100	97,86	19,62	53,05	24,65	28,40	2,72

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS

4.1. Clasificación de suelos expansivos

Luego de realizada la clasificación de la potencial expansión de los suelos, se obtuvo las cantidades de suelos estudiados correspondientes a cada grado de expansión.

Tabla 4.1. Predicción Clasificación de suelos expansivos mediante el límite líquido

Cantidad de suelos clasificados según grado de expansión				
Método	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Límite líquido (Chen)	0	4	11	0
Límite líquido (IS 1498)	3	7	5	0
Índice de plasticidad (Chen)	0	7	8	0
Índice de plasticidad (IS 1498)	4	4	7	0
Carta de actividad E050	4	6	5	0
Edómetro	3	6	6	0

Fuente: Elaboración propia

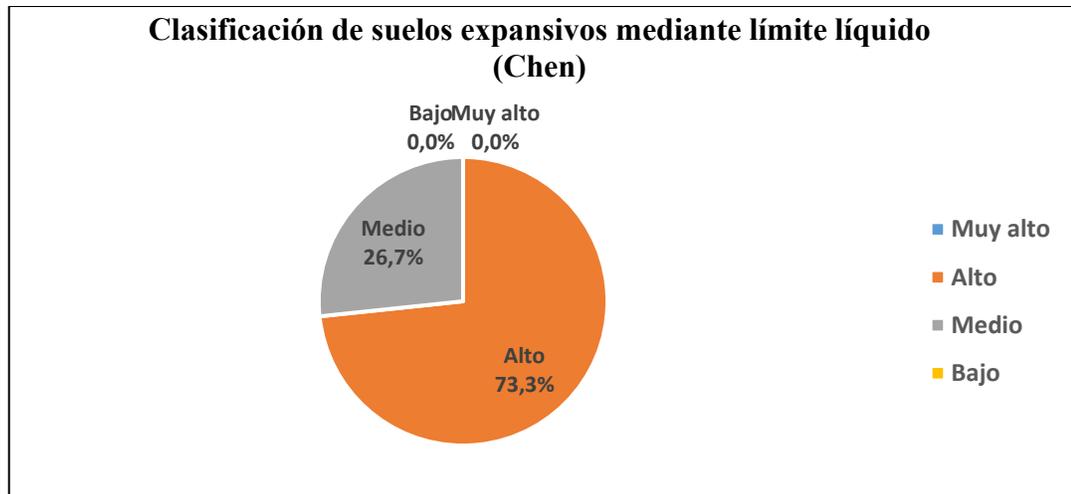
Se puede observar que no se tiene una expansión muy alta en los suelos estudiados de la muestra.

En la clasificación por límite líquido según Chen se tiene una gran cantidad de suelos de alto potencial de expansión, pero ningún suelo con bajo potencial de expansión al igual que el método por índice plástico del mismo autor.

4.2. Comparación entre procedimientos para la clasificación de suelos expansivos

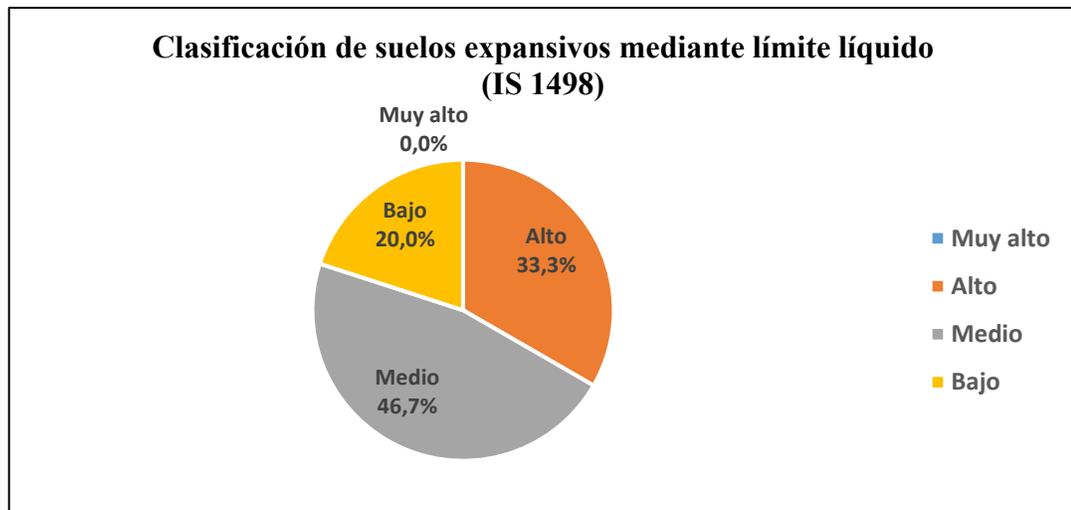
Se realizó las siguientes gráficas de torta para poder representar de manera porcentual las cantidades de suelos correspondientes a cada grado de expansión. Para que luego de manera posterior realizar la comparación con este tipo de datos.

Gráfico 4.1. Clasificación de los suelos expansivos mediante límite líquido según Chen



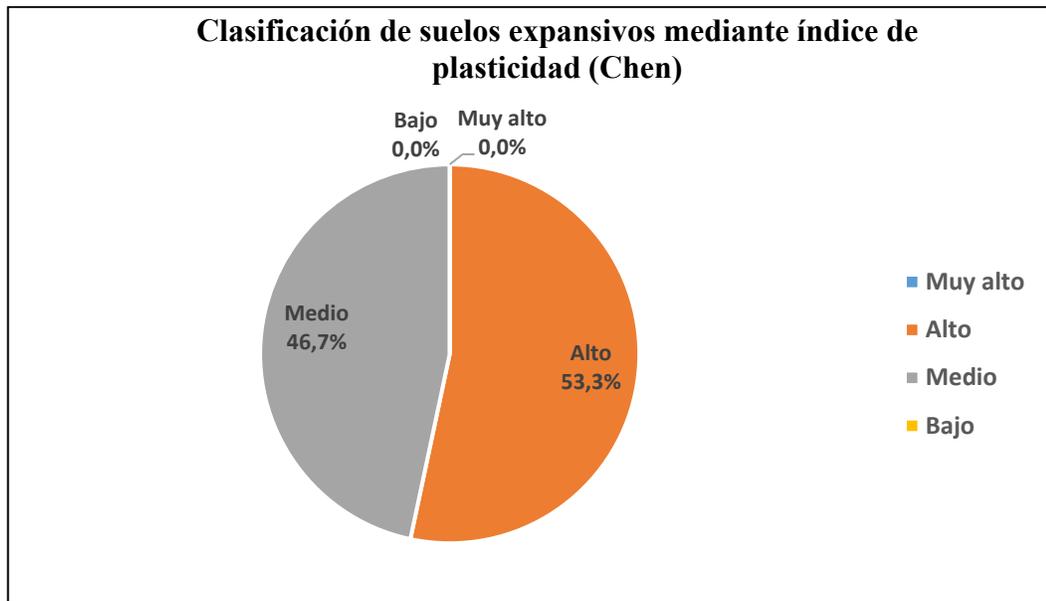
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2. Clasificación de los suelos expansivos mediante límite líquido según IS 1498



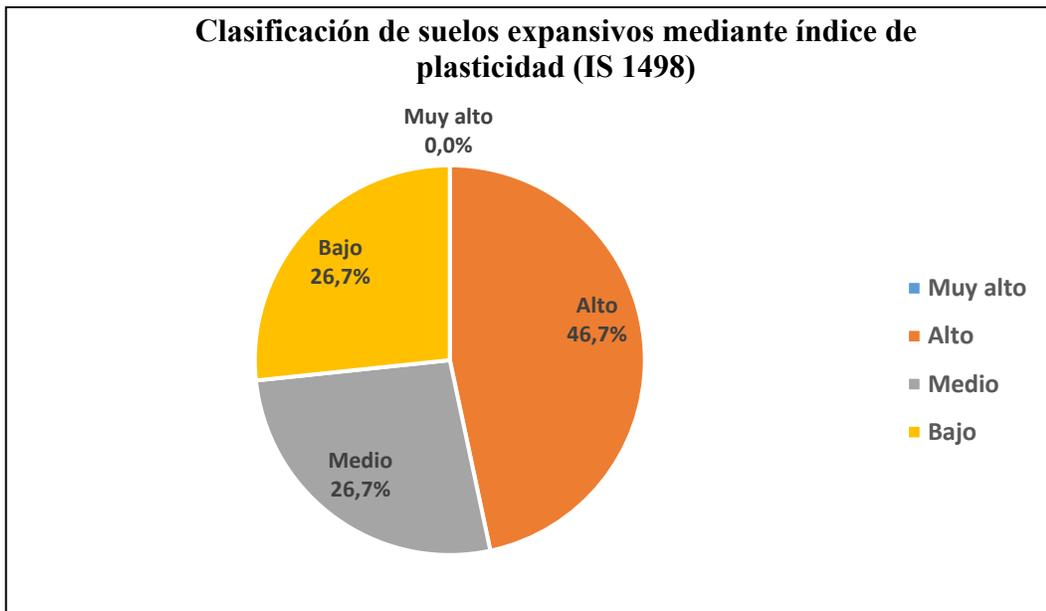
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3. Clasificación de los suelos expansivos mediante índice de plasticidad según Chen



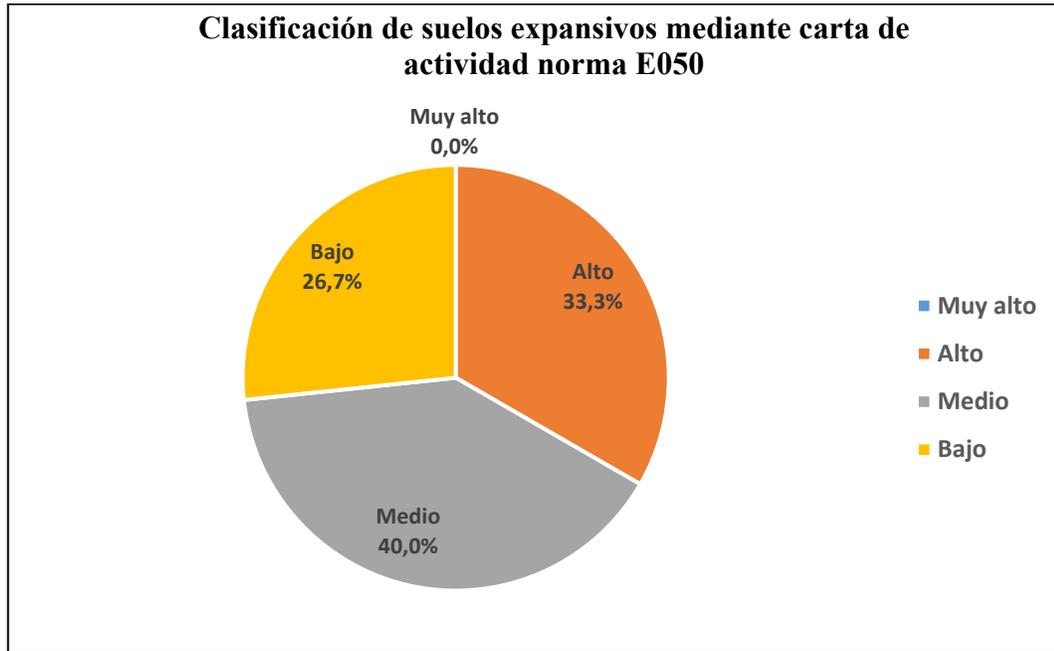
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4. Clasificación de los suelos expansivos mediante índice de plasticidad según IS 1498



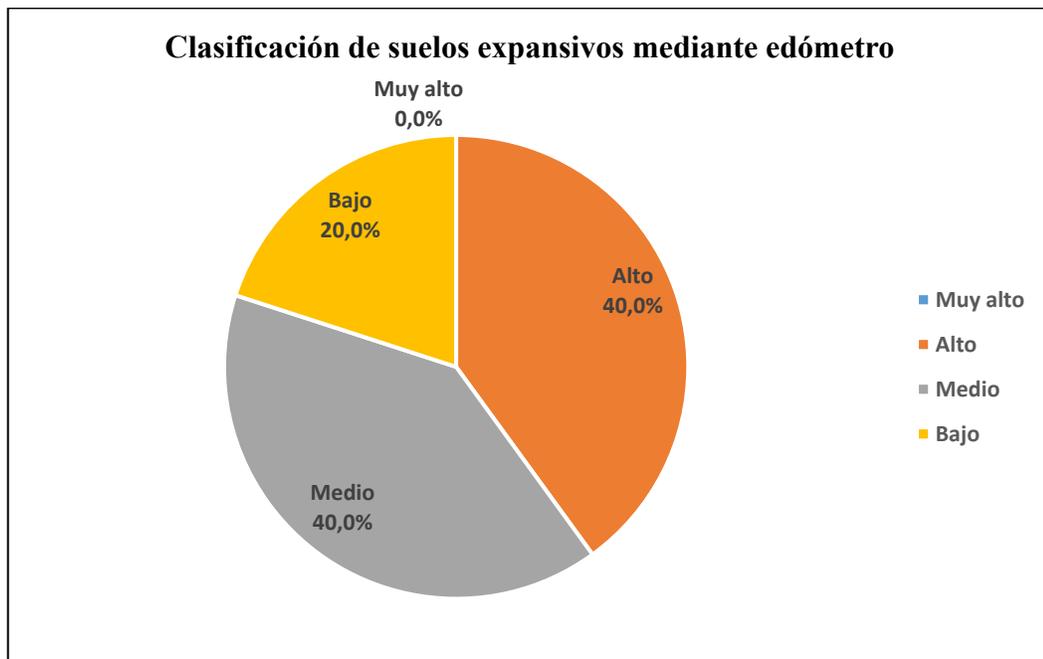
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Clasificación de los suelos expansivos mediante la norma E050



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6. Clasificación de los suelos expansivos mediante edómetro



Fuente: Elaboración propia

Se puede denotar que, en la clasificación mediante el límite líquido según Chen, las muestras de suelo en estudio se encuentran en un grado de expansión alto y medio, predominando el suelo de probable alta expansión, esto según Chen.

La clasificación de suelos expansivos mediante el límite líquido según la norma IS 1498 ya presentan suelos de baja expansión, pero presenta en un mayor porcentaje suelos de media expansión.

La clasificación de suelos expansivos mediante el límite líquido según IS 1498 presenta resultados similares a los obtenidos por el procedimiento del edómetro.

El procedimiento de clasificación mediante la norma E050 se asemeja al método de clasificación mediante índice plástico según IS 1498.

4.2.1. Tiempos estimados de realización de los ensayos

Se realizó una estimación de los tiempos necesarios para realizar la clasificación de suelos expansivos entre los procedimientos estudiados.

Según la norma ASTM D2216 el tiempo mínimo de secado del suelo en un horno convencional es de 24 horas.

Tabla 4.2. Tiempos estimados para la realización de los ensayos

Métodos	Límite líquido	Índice de Plasticidad	Actividad E050	Edómetro
Tiempo estimado	3 hrs. ensayo	5 hrs. ensayo	3 hrs. ensayo LL	48 hrs. a 72hrs dependiendo del tipo de suelo
			2 hrs. ensayo LP	
			24 hrs. horno	
	24 hrs. reposo defloculante			
	24 hrs. horno	24 hrs. horno	24 hrs. mínimo de ensayo	
24 hrs. horno en caso de haber usado tamiz N°10				
Tiempo total estimado	27 hrs.	29 hrs.	101 hrs.	48 o 72 hrs.

Fuente: Elaboración propia

Sí bien la anterior tabla es una estimación propia, puede dar un indicio de los tiempos aproximados que se necesitan para realizar los ensayos necesarios para determinación de la clasificación de suelos expansivos, para los procedimientos estudiados en el presente trabajo de investigación.

Conocer los tiempos de ejecución de cada procedimiento es un dato importante a considerar.

Se ve que en la tabla 4.2 que el tiempo más rápido corresponde al procedimiento del límite líquido, la prueba de edómetro tiene un tiempo de bajo a medio y el procedimiento de la actividad según la norma E050 requiere un tiempo muy alto para su ejecución.

4.2.2. Equipos y herramientas necesarias para cada procedimiento

En la siguiente tabla se indica los equipos y herramientas necesarias que requiere cada procedimiento.

Tabla 4.3. Equipos y herramientas mínimas para cada procedimiento

Método	Límite líquido	Índice de Plasticidad	Actividad E050	Edómetro
Equipos necesarios	Tamiz N°40	Tamiz N°40	Tamiz N°200 o N°10	Edómetro
	Equipo de Casa Grande	Equipo de Casa Grande	Hidrómetro	
	Taras	Vidrio y cápsula	Probeta	
	Horno	Taras	Plato para reposo de suelo con el defloculante	
		Horno	Equipos necesarios para determinar IP como se indica en la anterior columna	
	Balanza	Balanza	Balanza	

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento que requiere menos equipos y herramientas para su realización, es la prueba de edómetro siendo este un dato importante para luego determinar su eficiencia. Por otra parte el procedimiento que requiere más equipos es el de la carta de actividad mediante la norma E050.

4.2.3. Evaluación de eficiencia de resultados de cada procedimiento

Sí bien el tiempo y los recursos que se necesita para desarrollar cada procedimiento son datos importantes, la eficiencia de los resultados que brinda cada uno de ellos es fundamental y decisivo para poder determinar el procedimiento más eficiente para la clasificación de suelos expansivos.

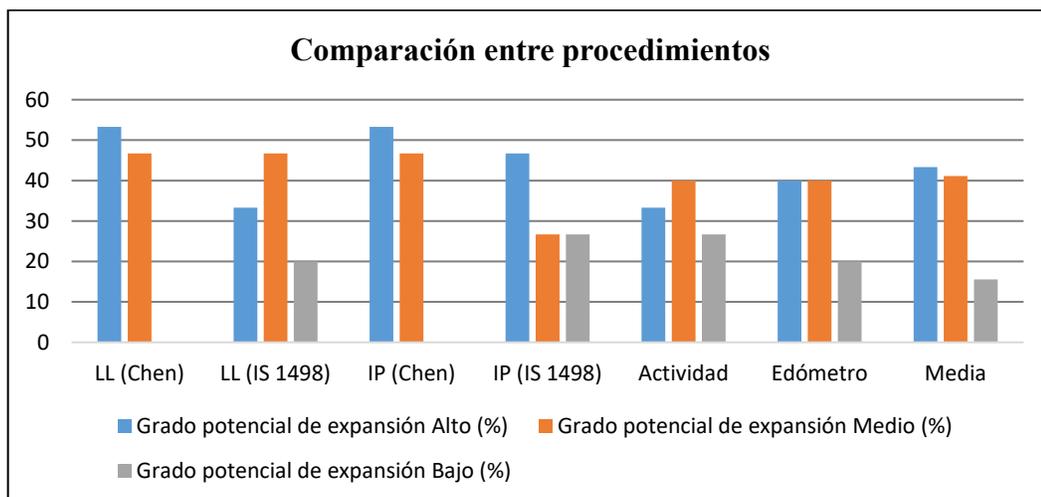
Para ello primeramente obtendremos la media aritmética de cada procedimiento, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4.4. Media de porcentajes según grado de expansión

	Grado potencial de expansión		
	Alto	Medio	Bajo
LL (Chen)	53,3	46,7	0
LL (IS 1498)	33,3	46,7	20
IP (Chen)	53,3	46,7	0
IP (IS 1498)	46,7	26,7	26,7
Actividad	33,3	40	26,7
Edómetro	40	40	20
Media aritmética	43,32	41,13	15,57

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.7. Comparación entre métodos



Fuente: Elaboración propia

4.2.3.1. Verificación de variación de datos respecto a la media

Para determinar la variación de los datos respecto a la media y a su vez precisar si es una muestra representativa me basaré en la interpretación del coeficiente de variación que brinda Vargas (2007), criterio de interpretación que se encuentra en la parte 2.11.7.1. del presente trabajo.

Primeramente, iniciaré determinando la diferencia porcentual respecto a la media para tener una noción preliminar de la variación que tienen los métodos con la media, obteniendo lo siguiente:

Tabla 4.5. Variación porcentual respecto a la media

	Variación Porcentual			Promedio de variación
	Alto (%)	Medio (%)	Bajo (%)	
LL (Chen)	23,0	13,5	100,0	45,53
LL (IS 1498)	23,1	13,5	28,5	21,71
IP (Chen)	23,0	13,5	100,0	45,53
IP (IS 1498)	7,8	35,1	71,5	38,14
Actividad	23,1	2,8	71,5	32,47
Edómetro	7,7	2,8	28,5	12,96

Fuente: Elaboración propia

De manera posterior determiné la desviación estándar para cada grado de expansión.

Tabla 4.6. Desviación estándar

	Expansión alta		Expansión media		Expansión baja	
	X-a	(X-a) ²	X-a	(X-a) ²	X-a	(X-a) ²
LL (Chen)	9,98	99,67	5,57	30,99	-15,57	242,32
LL (IS 1498)	-10,02	100,33	5,57	30,99	4,43	19,65
IP (Chen)	9,98	99,67	5,57	30,99	-15,57	242,32
IP (IS 1498)	3,38	11,45	-14,43	208,32	11,13	123,95
Actividad	-10,02	100,33	-1,13	1,28	11,13	123,95
Edómetro	-3,32	11,00	-1,13	1,28	4,43	19,65
Suma		422,45		303,85		771,85
Desviación estándar S	8,39		7,12		11,34	

Fuente: Elaboración propia

A continuación determiné el coeficiente de variación para cada grado de expansión. La verificación consiste en que $CV < 30\%$, esto para observar si se tratan de datos homogéneos.

Tabla 4.7. Coeficiente de variación

	Grado de expansión alta	Grado de expansión media	Grado de expansión baja
CV	0,194	0,173	0,729
CV%	19,371	17,301	72,861
Verificación	Cumple	Cumple	No cumple

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que para el grado de expansión baja no se cumple con la condición o criterio utilizado de variación respecto a la media, por lo que corresponde eliminar los métodos que presentan mucha variación, esto para poder centrar la media.

Tabla 4.8. Orden ascendente de la variación porcentual de cada método

Variación porcentual ordenada de menor a mayor		
Nº	Método	Variación (%)
1	Edómetro	12,96
2	LL (IS 1498)	21,71
3	Actividad	32,47
4	IP (IS 1498)	38,14
5	LL (Chen)	45,53
6	IP (Chen)	45,53

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que los métodos con datos más dispersos respecto a la media son los métodos propuestos por Chen.

No habría ningún problema al eliminar estos métodos, debido a que para la clasificación mediante límite líquido e índice de plasticidad aún se cuenta con los métodos propuestos por la norma IS 1498.

Una vez eliminados los métodos propuestos por Chen, se procede a realizar nuevamente la verificación entre los métodos restantes.

Tabla 4.9. Media de procedimientos para clasificar suelos expansivos

	Grado potencial de expansión		
	Alto (%)	Medio (%)	Bajo (%)
LL (IS 1498)	33,30	46,70	20,00
IP (IS 1498)	46,70	26,70	26,70
Actividad	33,30	40,00	26,70
Edómetro	40,00	40,00	20,00
Media	38,33	38,35	23,35

Fuente: Elaboración propia

Se determina la desviación estándar.

Tabla 4.10. Desviación estándar de métodos seleccionados

	Expansión alta		Expansión media		Expansión baja	
	$X-a$	$(X-a)^2$	$X-a$	$(X-a)^2$	$X-a$	$(X-a)^2$
LL (IS 1498)	-5,03	25,25	8,35	69,72	-3,35	11,22
IP (IS 1498)	8,38	70,14	-11,65	135,72	3,35	11,22
Actividad	-5,03	25,25	1,65	2,72	3,35	11,22
Edómetro	1,68	2,81	1,65	2,72	-3,35	11,22
Suma		123,45		210,89		44,89
Desviación estándar S	5,56		7,26		3,35	

Fuente: Elaboración propia

Procedo a determinar el coeficiente de variación para poder interpretar este valor y verificar que se traten de valores homogéneos.

Tabla 4.11. Coeficiente de variación de métodos seleccionados

	Grado de expansión alta	Grado de expansión media	Grado de expansión baja
CV	0,145	0,189	0,14
CV%	14,495	18,934	14,347
Verificación	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el coeficiente de variación es menor a treinta, por lo que los datos son homogéneos y según Vargas (2007) esto significa que la **media es representativa**. Por lo tanto la media es un parámetro de comparación válido.

Una vez comprobado que la media es un parámetro de comparación válido, procedo a determinar la variación porcentual respecto a esta media verificada.

Tabla 4.12. Variación porcentual respecto a la media comprobada

	Variación Porcentual			Promedio de variación
	Alto (%)	Medio (%)	Bajo (%)	
LL (IS 1498)	13,1	21,8	14,3	16,4
IP (IS 1498)	21,9	30,4	14,3	22,2
Actividad	13,1	4,3	14,3	10,6
Edómetro	4,4	4,3	14,3	7,7

Fuente: Elaboración propia

Y ordenando de manera ascendente queda de la siguiente manera:

Tabla 4.13. Orden ascendente de la variación porcentual respecto a la media comprobada

Variación porcentual ordenada de menor a mayor		
Nº	Método	Variación (%)
1	Edómetro	7,67
2	Actividad	10,59
3	LL (IS 1498)	16,41
4	IP (IS 1498)	22,19

Fuente: Elaboración propia

Se observa en tablas comparativas que el procedimiento más cercano a la media comprobada, es el **método del edómetro**, por lo tanto es el procedimiento más fiable para la clasificación de suelos expansivos.

4.3. Prueba de hipótesis

Se realizará una prueba de hipótesis para determinar si el método del edómetro puede ser el método más eficiente para la clasificación de suelos expansivos en la ciudad de Tarija (población objetivo), además si este puede ser un método patrón.

Para esta prueba de hipótesis se realizará una prueba bilateral o de dos colas, porque lo que se necesita es hacer una hipótesis con igualdad a los valores del edómetro.

El nivel de significancia para esta prueba es de 5%. Al ser una muestra pequeña ($n \leq 30$), se realizará la prueba mediante la distribución de t de student.

Esto se lo realizará para los porcentajes de suelos correspondientes a grado de expansión del edómetro.

Para el grado de expansión alto

Según en edómetro, el porcentaje de suelos que corresponden al grado alto de expansión es de 40%, por lo que se formulan las siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} \text{Hipótesis nula} \quad H_0 &= 40 \\ \text{Hipótesis alternativa} \quad H_1 &\neq 40 \end{aligned}$$

Tabla 4.14. Datos estadísticos respecto al grado alto de expansión

Datos estadísticos para la determinación del t de student	
$\mu_0 =$	40,00
$n =$	4,00
$\bar{x} =$	38,33
$S =$	5,56
$\alpha =$	0,05

Fuente: Elaboración propia

Al ser una prueba bilateral se tendrán el nivel de significancia dividido entre dos, en cada extremo de la distribución.

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \quad (4.1)$$

Procedo a definir los valores críticos, para ello se ingresa en la tabla de valores críticos de la distribución de t, en la que se ingresa con los valores de $\alpha/2$ y el grado de libertad (para una distribución bilateral).

De la tabla se extrae lo siguiente:

$$t_{\alpha} = \pm 3,182 \quad (4.2)$$

De manera posterior procedo a determinar la variable t de student.

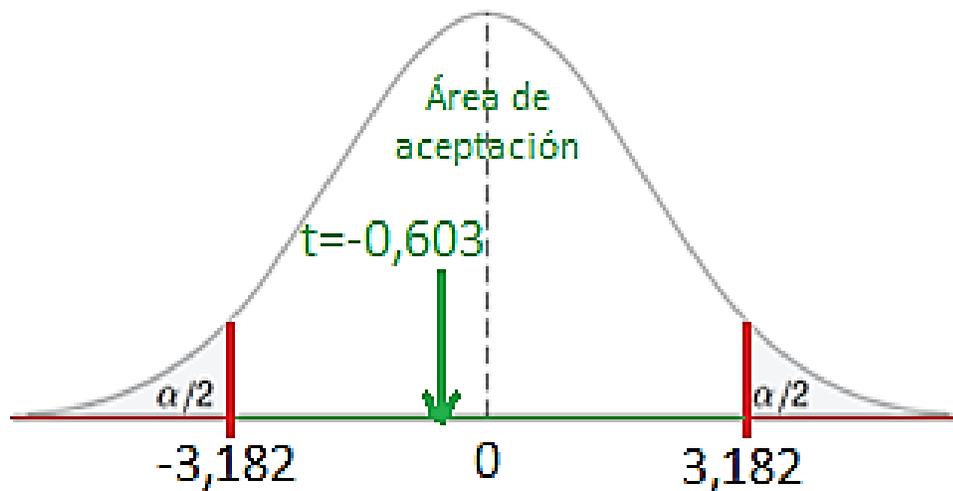
$$t = \frac{38,33 - 40}{\frac{5,56}{\sqrt{4}}} \quad (4.3)$$

Se obtiene que:

$$t = -0,603 \quad (4.4)$$

Se procede a ingresar dicho dato a la gráfica de la distribución.

Gráfico 4.8. Prueba de hipótesis para el grado alto de expansión



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el valor de t cae dentro del área de **aceptación** de la hipótesis nula, por lo que se concluye que: No se rechaza la hipótesis nula (H_0), que la expansión de grado alto es igual a 40, porcentaje que es equivalente al obtenido por el edómetro.

Para el grado de expansión Medio

Según en edómetro, el porcentaje de suelos que corresponden al grado alto de expansión es de 40%, por lo que se formulan las siguientes hipótesis:

$$\text{Hipótesis nula} \quad H_0 = 40$$

$$\text{Hipótesis alternativa} \quad H_1 \neq 40$$

Tabla 4.15. Datos estadísticos respecto al grado medio de expansión

Datos estadísticos para la determinación del t de student	
$\mu_0 =$	40
$n =$	4
$\bar{x} =$	38,35
$S =$	7,26
$\alpha =$	0,05

Fuente: Elaboración propia

Al ser de igual manera prueba bilateral se tendrán el nivel de significancia dividido entre dos, en cada extremo de la distribución.

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \quad (4.5)$$

De la tabla se extrae lo siguiente:

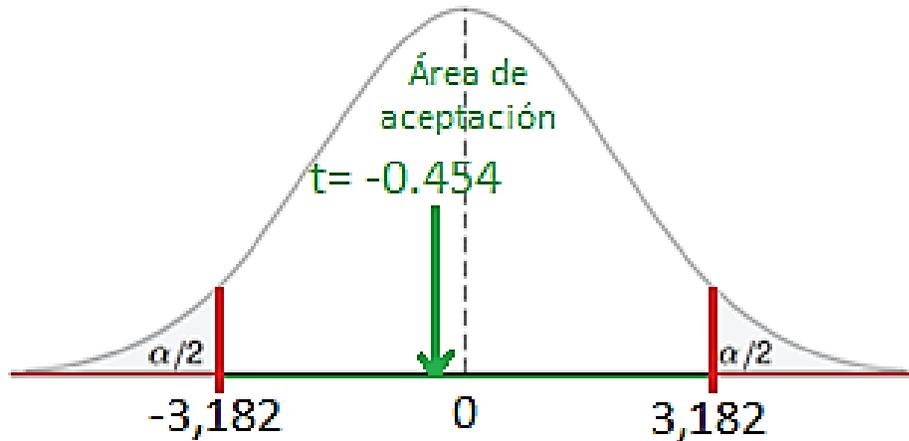
$$t_{\alpha} = \pm 3,182 \quad (4.6)$$

De manera posterior procedo a determinar la variable t de student.

$$t = -0,454 \quad (4.7)$$

Se procede a ingresar dicho dato a la gráfica de la distribución.

Gráfico 4.9. Prueba de hipótesis para el grado medio de expansión



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el valor de t cae dentro del área de **aceptación** de la hipótesis nula, por lo que se concluye que: No se rechaza la hipótesis nula (H_0), que la expansión de grado medio es igual a 40, porcentaje que es equivalente al obtenido por el edómetro.

Para el grado de expansión bajo

Según en edómetro, el porcentaje de suelos que corresponden al grado bajo de expansión es de 20%, por lo que se formulan las siguientes hipótesis:

$$\text{Hipótesis nula} \quad H_0 = 20$$

$$\text{Hipótesis alternativa} \quad H_1 \neq 20$$

Tabla 4.16. Datos estadísticos respecto al grado bajo de expansión

Datos estadísticos para la determinación del t de student	
$\mu_0 =$	20
$n =$	4
$\bar{x} =$	23,35
$S =$	3,35
$\alpha =$	0,05

Fuente: Elaboración propia

Se trata de una prueba bilateral, por lo tanto:

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \quad (4.8)$$

Los valores críticos son los siguientes:

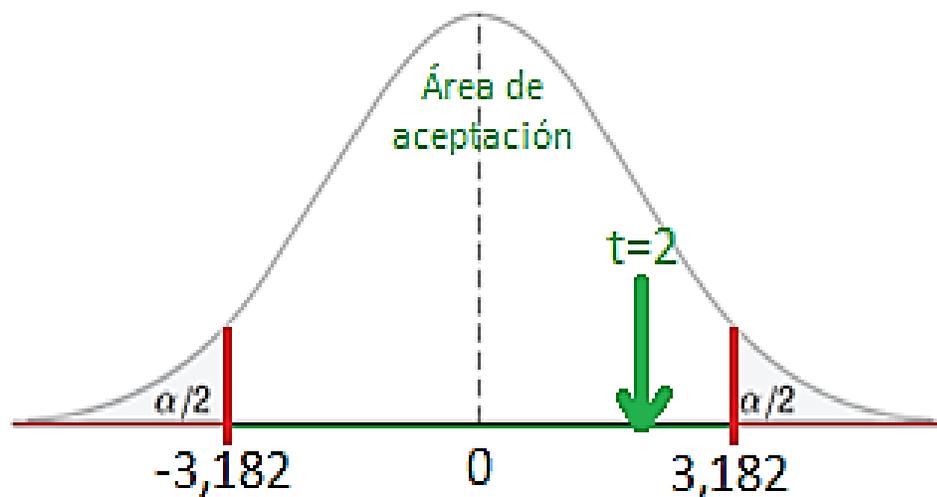
$$t_{\alpha} = \pm 3,182 \quad (4.9)$$

De manera posterior procedo a determinar la variable t de student.

$$t = 2 \quad (4.10)$$

Se procede a ingresar dicho dato a la gráfica de la distribución.

Gráfico 4.10. Prueba de hipótesis para el grado bajo de expansión



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el valor de t cae dentro del área de **aceptación** de la hipótesis nula, por lo que se concluye que: No se rechaza la hipótesis nula (H_0), que la expansión de grado bajo es igual a 20, porcentaje que es equivalente al obtenido por el edómetro.

4.4. Comparación de los procedimientos respecto a un patrón

Se determinó que el método más eficiente y fiable es el método del edómetro, mismo que ahora se tomará como patrón para realizar una comparación con los métodos restantes.

Tabla 4.17. Grado de expansión de los procedimientos y el patrón

	Grado potencial de expansión		
	Alto (%)	Medio (%)	Bajo (%)
LL (IS 1498)	33,3	46,7	20,0
IP (IS 1498)	46,7	26,7	26,7
Actividad	33,3	40,0	26,7
Patrón	40,0	40,0	20,0

Fuente: Elaboración propia

Procedo a determinar la variación porcentual de los métodos respecto al método patrón.

Tabla 4.18. Variación porcentual respecto a un método patrón

	Variación Porcentual			Promedio de variación
	Alto (%)	Medio (%)	Bajo (%)	
LL (IS 1498)	16,8	16,8	0,0	11,17
IP (IS 1498)	16,8	33,3	33,5	27,83
Actividad	16,8	0,0	33,5	16,75

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la siguiente tabla que el método más cercano al método patrón es el de límite líquido según la norma IS 1498.

Tabla 4.19. Orden ascendente de la variación porcentual respecto a un método patrón

Variación porcentual ordenada de menor a mayor		
N°	Método	Variación (%)
1	LL (IS 1498)	11,17
2	Actividad	16,75
3	IP (IS 1498)	27,83

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Mediante la comparación de procedimientos sí se puede determinar el procedimiento más eficiente.

El método más eficiente entre los procedimientos que se compararon en el presente trabajo de investigación para la clasificación de suelos expansivos en la ciudad de Tarija, es el edómetro, además de ser un método directo y confiable.

El procedimiento con resultados más cercanos a la prueba de edómetro (patrón), es el método del límite líquido propuesto por la norma IS 1498, mismo que también es eficiente.

Se realizó el muestreo en diferentes lugares de la ciudad de Tarija, donde se encontraron suelos cinco suelos de alta plasticidad CH y diez suelos de mediana a baja plasticidad CL.

Se realizó los ensayos pertinentes para obtener datos necesarios para realizar esta comparación.

Se determinó cuan expansivo es el suelo en varios lugares de la ciudad de Tarija, donde la muestra que más expandió fue en un 20,64% y la menor expansión que presentó una muestra fue de 2,8%.

Mediante un análisis estadístico se determinó que el método del límite líquido e índice de plasticidad propuesto por Chen, es poco eficiente para clasificar suelos expansivos en la ciudad de Tarija, debido a la dispersión de sus resultados respecto a la media y al método patrón.

Se validaron los resultados mediante una prueba de hipótesis.

El enfoque de la relación de hinchamiento libre, predice la expansión del suelo de manera más realista y satisfactoria. Los métodos comparados dan un indicativo la naturaleza de la mineralogía arcillosa de los suelos.

La prueba de hinchamiento libre realizada en el presente proyecto de investigación implica un procedimiento de prueba muy sencilla y fácil de usar, que requiere una sofisticación instrumental insignificante. Los resultados de la prueba en forma de índice de hinchamiento libre propuesto se pueden utilizar para obtener información bastante confiable sobre el grado de expansividad del suelo y sobre el tipo de suelo.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el ensayo de hinchamiento libre con muestras inalteradas, debido a que se tiene una situación más realista porque se conserva la estructura natural de la muestra.

Se recomienda ajustar adecuadamente el tornillo del extensómetro para que alguna perturbación del entorno no afecte a las lecturas del ensayo

Es necesario tener sumo cuidado al realizar los ensayos de granulometría mediante hidrómetro, especialmente al momento de introducirlo para efectuar la lectura. Es importante evitar agitar las partículas durante este proceso.

Se recomienda realizar ensayos para clasificar suelos expansivos en suelos que se presume que son arcillosos y en el cual se quiera emplazar una obra civil.

Se recomienda realizar una futura investigación abarcando otros métodos como por ejemplo el de MFSI.