



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

**SUELOS COLAPSABLES, CARACTERISTICAS,
MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN, MEJORAMIENTO Y
POSIBLES USOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR: LUIS RUBÉN ORDÓÑEZ JIMÉNEZ

DIRECTOR: ING. LUIS MARIO ALMACHE SÁNCHEZ, MGS.

CUENCA - ECUADOR

2021

*Yo me gradúe en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

SUELOS COLAPSABLES, CARACTERÍSTICAS, MÉTODOS DE
IDENTIFICACIÓN, MEJORAMIENTO Y POSIBLES USOS

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR: LUIS RUBÉN ORDÓÑEZ JIMENEZ

DIRECTOR: ING. LUIS MARIO ALMACHE SÁNCHEZ, MGS.

CUENCA - ECUADOR

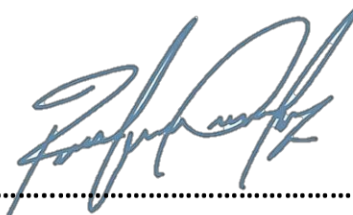
2021

*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Luis Rubén Ordóñez Jiménez portador de la cédula de ciudadanía **N.º 0105193478**. Declaro ser el autor de la obra: **“SUELOS COLAPSABLES, CARACTERISTICAS, METODOS DE IDENTIFICACION, MEJORAMIENTO Y POSIBLES USOS”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **06 de agosto de 2021**

F: 

Luis Rubén Ordóñez Jiménez
C.I. 0105193478

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Rubén Ordóñez Jiménez, bajo mi supervisión.

**LUIS
MARIO
ALMACHE
SANCHEZ**



Firmado digitalmente por LUIS MARIO ALMACHE SANCHEZ

ING. LUIS MARIO ALMACHE, MGS.
Fecha: 2021.07.14 12:39:32 -05'00'
SANCHEZ
DIRECTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo quiero dedicar principalmente a mis padres, *Luis Ordoñez*: Tu nombre y apellido lo llevo con orgullo, tu carácter y la firmeza en tus pasos son mi ejemplo, tu amor y apoyo mi regalo más grande, *Marlene Jiménez*: Gracias por tu paciencia y comprensión, por enseñarme y acompañarme en cada paso o tropiezo que he dado en mi vida, por brindarme tu protección cuando lo he necesitado, y a mis hermanos por su amistad, por el apoyo que nos hemos brindado en el transcurso de cada etapa o meta que se ha conseguido y estamos logrando, gracias por ser una familia tan unida que ha demostrado no rendirse a pesar de las pruebas que la vida pudo haber puesto en nuestro camino.

AGRADECIMIENTOS

A pesar que la vida ha sido un constante mar que ha revolcado con sus olas creencias e ilusiones, he mantenido la fe de avanzar y nunca darme por vencido, de cada día levantarse con los ánimos de pie para intentarlo una vez más, por enfrentarte a los miedos más profundos logrando reinventarte mejorando física y mentalmente, por no perder tus sueños y aprender a trabajar en ellos, por saber que esto no es simplemente un trabajo, que los años que han transcurrido para llegar a este punto han sido más que estudios, calificaciones y desveladas. Este agradecimiento va para mí, por no rendirme cuando todo parecía salir mal, cuando el dolor de las heridas parecía no expirar, gracias por siempre intentarlo, gracias por creer en ti.

RESUMEN

El presente documento tuvo como propósito tratar los suelos colapsables, partiendo de su origen y formación que establecen su composición proveyéndolo de propiedades específicas que dicta su comportamiento mecánico, exponiendo de forma breve los diferentes tipos de fenómenos más comunes para posteriormente enfocarse en la ciudad de Cuenca constatando mayor predominancia de suelos expansivos. Para lo cual, se definió la microestructura de los cristales de arcilla que se encuentran regidas por fuerzas electroquímicas que originan la absorción-adsorción y retención de agua produciendo el aumento de volumen en estos suelos, condicionando su potencial expansivo en la cantidad y tipo de arcilla que el terreno pueda contener (identificando a la montmorillonita como mineral primordial que contiene dicha cualidad) indicando los diferentes medios para su identificación mineralógica, las propiedades físicas habituales, formas de medición sobre el fenómeno generado para finalmente sugerir el empleo de soluciones geotécnicas apropiadas, todo esto realizado mediante la investigación bibliográfica de diferentes estudios dentro de los cuales contienen datos estadísticos analizados a través de ensayos de laboratorio y recopilación histórica dentro de la zona de estudio.

Palabras clave: suelos inestables, suelos expansibles, arcillas, grado de expansibilidad, montmorillonita.

ABSTRACT

This document aimed to treat collapsible soils, starting from its origin and formation that establish its composition providing it with specific properties that dictate its mechanical behavior, briefly exposing the different types of the most common phenomena to later focus on the city of Cuenca finding a greater predominance of expansive soils. For which, the microstructure of the clay crystals that are governed by electrochemical forces that cause the absorption-adsorption and retention of water producing the increase of volume in these soils was defined, conditioning its expansive potential in the amount and type of clay that the soil may contain (identifying montmorillonite as the primary mineral that contains this quality) indicating the different means for its mineralogical identification, the usual physical properties, ways of measuring the phenomenon generated to finally suggest the use of appropriate geotechnical solutions, all this done through literature research of different studies within which contain statistical data analyzed through laboratory tests and historical collection within the study area.

Keywords: unstable soils, expansible soils, clays, degree of expansibility, montmorillonite.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARATORIA	I
CERTIFICADO	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
INDICE DE CONTENIDOS	VII
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ANEXOS.....	XI
CAPÍTULO PRIMERO: ANTECEDENTES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 OBJETIVOS	5
OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
CAPÍTULO SEGUNDO: MARCO REFERENCIAL	7
2.1 MARCO REFERENCIAL.....	8
2.1.1 Conceptos y definiciones básicas.....	8
2.1.1.1 Antecedentes Históricos.....	8
2.1.1.2 Definición de Términos Básicos.....	10
2.1.1.3 Definición de suelos colapsables.....	11
2.1.1.4 Origen de Suelos Colapsables	12
2.2 MARCO TEÓRICO.....	13
2.2.1 Caracterización Geotécnica de los Suelos.....	13
2.2.1.1 Tipos de Depósitos.....	13

2.2.1.2	<i>Tipos de Suelos</i>	17
2.2.2	Dinámica y Estructuración de las partículas	20
2.2.3	Tipos de Suelos Inestables	23
2.2.3.1	<i>Suelos Expansivos</i>	24
2.2.3.2	<i>Suelos Metaestables</i>	25
2.2.3.3	<i>Suelos Licuable</i>	27
2.2.4	Resistencia al corte en suelos colapsables.....	29
2.3	ZONAS COLAPSABLES DE LA CIUDAD DE CUENCA.....	32
2.3.1	Reseña histórica de fenómenos	32
2.3.2	Selección de zonas problemáticas de suelos colapsables	33
2.3.2.1	<i>Caracterización geológica regional</i>	33
2.3.2.2	<i>Caracterización Geotécnica del suelo</i>	36
CAPÍTULO TERCERO: CLASIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS DEL ASENTAMIENTO DE		
SUELOS		
3.1	CONCEPTO Y DESARROLLO DE PATOLOGÍAS EN SUELOS EXPANSIVOS	39
3.1.1	Procesos de expansión del suelo	39
3.1.1.1	<i>Tipo y origen</i>	40
3.1.1.2	<i>Estructura de las arcillas</i>	45
3.1.1.3	<i>Propiedades que afectan el comportamiento volumétrico</i>	49
3.1.1.4	<i>Mecanismo de expansión</i>	52
3.1.2	Métodos y medidas de identificación de suelos expansivos.....	54
3.1.2.1	<i>Identificación mineralógica</i>	54
3.1.2.2	<i>Determinación de propiedades básicas de los suelos expansivos</i>	57
3.1.2.3	<i>Medidas directas de la expansión del suelo</i>	60
3.1.2.4	<i>Ensayos de Campo</i>	61
3.2	VALORACIÓN Y PERFILES DE EXPANSIVIDAD	64
3.2.1	Evaluación del grado de expansividad	64
3.2.1.1	<i>Predominación de un tipo de mineral</i>	65
3.2.1.2	<i>Calificación Cualitativa</i>	65
3.2.1.3	<i>Calificación Cuantitativa</i>	66
3.2.2	Cálculo de asentamientos.....	69
3.3	MANIFESTACIÓN DE PATOLOGÍAS EN EDIFICACIONES	72
3.3.1	Daños en la Estructura	73
3.3.2	Identificación del problema relacionados	76
CAPÍTULO CUARTO: DISCUSIÓN DE MEDIDAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS		
78		

4.1 MEDIDAS DE PREVENCIÓN.....	79
4.1.1 Mejoramiento de suelos expansibles.....	79
4.1.1.1 <i>Sustitución del suelo</i>	79
4.1.1.2 <i>Prehumedecimiento y control de humedad del suelo</i>	81
4.1.1.3 <i>Reducción de la densidad del suelo</i>	82
4.1.1.4 <i>Estabilización química - inyección</i>	83
4.2 MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....	88
4.2.1 Consideraciones en el diseño de la estructura.....	88
4.2.1.1 <i>Transferencia de carga por debajo del suelo expansible</i>	89
4.2.1.2 <i>Diseño de cimentaciones resistente al asentamiento</i>	92
 CAPÍTULO QUINTO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	 96
5.1 CONCLUSIONES	97
5.2 RECOMENDACIONES.....	99
 BIBLIOGRAFÍA	 102
ANEXOS	109

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Familia de suelos colapsables. Fuente: (Rogers, 1995).....	- 14 -
Ilustración 2. Estructuras potencialmente colapsables. Fuente: (Dudley, 1970 y Maswoswe, 1985)....	- 22 -
Ilustración 3. Estratigrafía de las formaciones de la cuenca de Cuenca. Generada por el Autor. ...	- 36 -
Ilustración 4. Ciclo del origen de las rocas. Fuente: (Arance, I. R., & Rosales, M. R. 2015).	- 40 -
Ilustración 5. Orden de cristalización. Fuente: (Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. 2014). -	- 41 -
Ilustración 6. Esquema de agrupamiento de los principales minerales de arcilla. Tetraedros (T) y Octaedros (O). Fuente: (Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. 2014).....	- 45 -
Ilustración 7. Geometría del Modelo Molecular. a. Tetraedro de sílice b. Octaedro de alúmina 1. Modelo de barras y esfera 2. Modelo Geométrico 3. Lamina de combinación de unidades. Fuente: (Díaz & Gómez. 2007).	- 46 -
Ilustración 8. Estructura Atómica de los minerales arcillosos Bilaminares y Trilaminares. Fuente: (Fassbender, H. W., & Bornemisza, E. 1987).....	- 46 -
Ilustración 9. Estructura de la Montmorillonita. Fuente: (Cadena Nogales, A. C. 2014).....	- 47 -
Ilustración 10. Estructura de la Caolinita. Fuente: (Braja M. Das. 2015).....	- 48 -
Ilustración 11. Estructura de la Illita. Fuente: (Braja M. Das. 2015).....	- 48 -
Ilustración 12. Distribución de cargas eléctricas. Fuente: (de Santiago Buey, C. 2012).	- 49 -
Ilustración 13. Formación de capas laminares en la arcilla. Fuente: (Díaz & Gómez. 2007).	- 49 -
Ilustración 14. Disposición de la molécula de agua. (de Santiago Buey, C. 2012).....	- 51 -
Ilustración 15. Distribución de iones y moléculas. Fuente: (de Santiago Buey, C. 2012).	- 52 -
Ilustración 16. Distribución y concentración de iones. Fuente: (Leoni, A. J. 2005).....	- 53 -
Ilustración 17. Absorción de agua por ósmosis. Fuente: (de Santiago Buey, C. 2012).....	- 53 -
Ilustración 18. Referencia de un Difractograma de Illita en ensayo DRX. Fuente: (Ramírez Bustamante, J. A. 2019).	- 55 -
Ilustración 19. Ensayo de solución acuosa del azul de metileno. Fuente: (Jiménez & Crespo 2013) -	- 56 -
Ilustración 20. Imagen microscópica suelos arcillosos a. Illita b. Montmorillonita. Fuente: (Dra. Angelone, S. 2018).	- 57 -
Ilustración 22. Fenómeno de expansión en suelos arcillosos y agrietamiento consecuente. Fuente: (Ortiz, Á. U. 1983).	- 73 -
Ilustración 23. Conformación de la sustitución del material en suelos expansivos. Fuente: (Bravo Quiñones I., 2014).....	- 80 -
Ilustración 24. Sistema de diferentes técnicas de Inyección. Fuente: (Puertos del Estado, 2005). -	- 85 -
Ilustración 25. Intercambio Catiónico de las arcillas con la cal. Fuente: (Castañeda, J. 2020).	- 85 -
Ilustración 26. Ábaco para diseño de estabilización de suelos con cal. Fuente: (Mc Dowell, 1966).-	- 87 -
Ilustración 27. Tipos de cimentaciones profundas. Generado por el Autor.	- 89 -
Ilustración 28. Sistemas de Losas de Cimentación Rígidas. Fuente: (Segura Segura, C. A. 2009). ..	- 93 -
Ilustración 29. Cimiento de zapatas con vigas apoyadas en bloques de pómez. Fuente: (Vélez Dávila, P. E. 2012).	- 94 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación por la universidad de Massachusetts Institute of Technology “M.I.T.”	- 18 -
Tabla 2. Grado de expansividad en función de distintas propiedades geotécnicas. Fuente: (Da Mata de Alva Costa, W. 2009).....	- 25 -
Tabla 3. Susceptibilidad de la licuefacción de acuerdo a la granulometría. Fuente: (Falcón & Ramírez. 2012).....	- 28 -
Tabla 4. Criterios de licuación en suelos con finos. Fuente: (Tzatchkov, V., 2007)	- 29 -
Tabla 5. Evolución Edáfica. Fuente:(Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. 2014).	- 42 -
Tabla 6. Relación entre superficie específica y cambio catiónico de distintas arcillas. Fuente: (Braja M. Das 2015).....	- 50 -
Tabla 7. Límites de Atterberg principales minerales de arcillas. Fuente: (Nelson y Miller, 1992)...	- 58 -
Tabla 8. Resumen de la actividad según el mineral y el potencial expansivo. Generado por el Autor. .	- 59 -
Tabla 9. Métodos de estimación y evaluación de los grados de expansión de un suelo. Generado por el Autor.	- 67 -
Tabla 10. Procedimiento de caracterización de los suelos expansivos. Generado por el Autor.	- 68 -
Tabla 11. Resumen de minerales de arcilla en la ciudad de Cuenca. Fuente: (Idrovo Angumba, B. S. 2019).....	- 69 -
Tabla 12. Valores máximos de asentamientos diferenciales. Fuente: Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC).	- 70 -
Tabla 13. Rangos típicos de valores utilizados en el asentamiento inicial. Fuente: (Hurtado, J. E. A. 1996).....	- 71 -
Tabla 14. Tipos de daños por fluctuación de volumen del suelo. Fuente: (Trejo, 1989).....	- 74 -
Tabla 15. Clasificación de los daños visibles a las paredes con enfoque en la facilidad de reparación. Fuente: (Burland, Broms & de Mello, 1978).	- 75 -
Tabla 16. Recomendación Federal para el material de reemplazo. Fuente:	- 80 -
Tabla 17. Recomendación de tipos de cimentaciones a construir. Fuente: (Llorca, 1980).	- 88 -
Tabla 18. Resumen de medidas de construcción para suelos expansivos. Generado por el Autor. .	- 95 -

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Relación Ac (Actividad) y el mineral predominante del suelo. Fuente: (Según Skempton, 1953).....	- 115 -
Anexo 2. Actividad de una arcilla. Fuente: (Seed, Woodward & Lundgren, 1964).	- 115 -
Anexo 3. Gradiente mineral. Fuente: (Marín Nieto, L. 1991).....	- 116 -
Anexo 4. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas. Fuente:	- 116 -
Anexo 5. Tabla de diseños más utilizados de cimentación en los suelos expansivos. Fuente: (Segura Segura, C. A. 2009).....	- 117 -
Anexo 6. Método de Holtz y Gibbs, en función del IP.....	- 118 -
Anexo 7. Método de Holtz y Gibbs, en función del SL.	- 118 -
Anexo 8. Clasificación de suelos expansivos basado en el % coloides, IP y SL.	- 118 -
Anexo 9. Grado de expansión, método Holtz, Dakshanamurthy y Raman.	- 118 -
Anexo 10. Resumen de criterios de expansividad. Fuente (R. Ortiz, 1975).....	- 118 -
Anexo 11. Relación de grado de expansividad y parámetros geotécnicos. Fuente: (González de Vallejo, 2002)	- 119 -
Anexo 12. Grado de expansividad. Fuente: (Chen, 1988)	- 119 -

CAPÍTULO PRIMERO: ANTECEDENTES

1.1 Introducción.

La consideración del terreno en el diseño de las infraestructuras de obras civiles, debe ser de gran importancia por la acción que el suelo puede ejercer en la cimentación. La estructura transmite las cargas y a su vez genera posibles deformaciones al terreno el cual proporciona la resistencia por lo que se considera como un anexo de toda obra civil. Las fallas vinculadas a la cimentación como motivo de daño estructural son más numerosas a las asociadas por cualquier otro fundamento con consecuencias graves para su reparación y en ocasiones pueden llevar a la demolición de la estructura.

El fallo de cimentaciones se debe en mayor parte a fenómenos de desequilibrio en suelos inadecuados también llamados suelos *inestables* lo que genera características especiales y problemáticas de planteamiento proyectivo si no se realiza un mejoramiento en este tipo de suelos. El desarrollo de esta tesis se guiando hacia la investigación del comportamiento geotécnico de los suelos colapsables como suelos expansivos, suelos metaestables y suelos licuables los cuales son estudiados mediante los depósitos en los que regularmente el fenómeno tiene ocurrencia al igual que su estructura y los materiales que lo conforman. Estos tipos de suelos generan un cambio de volumen de forma brusca o progresiva generando cambios en sus condiciones mecánicas por la concentración de tensiones o por el peso propio del suelo, ya que su estructura metaestable es muy susceptible a cambios internos por su gran relación de vacíos en su composición y cambios medioambientales que son los factores externos que provocan fluctuaciones de humedad (natural o artificial) generando la inestabilidad entre las partículas. Clemence, S. P., & Finbarr, A. O. (1981).

La falla de este tipo de suelos se da por la reorganización de partículas al deslizarse entre ellas cuando no soportan las fuerzas cortantes generadas en su punto de contacto, llenando los vacíos y colocando al suelo en una posición más estable. Se investigará con diversas bibliografías especializadas en suelos problemáticos para obtener información que permita

enfocar el criterio de identificación y caracterización de este tipo de suelos, determinar las causas de origen del fenómeno para poder plantear alternativas y métodos de mejoramiento, todo esto con el fin de predecir, prevenir y mitigar factores que afecten a la funcionalidad de una obra que representan verdaderos inconvenientes en el área de la Ingeniería Civil.

1.2 Planteamiento de la Investigación.

La recolección de información consultada en el entorno y la investigación geotécnica sobre la experiencia local histórica de la región ha sido una práctica obviada por los profesionales actuales para comprender el comportamiento del terreno en donde será emplazada la obra, generando estudios geotécnicos inadecuados para el tipo de suelo y obteniendo fenómenos inesperados durante la vida útil de la estructura.

Los suelos colapsables normalmente son evitados durante el reconocimiento geotécnico por el desconocimiento de su comportamiento ya que no pueden ser analizados a través de modelos matemáticos (numérico o analítico) bidimensionales correspondientes a patrones desuelos saturados. La naturaleza compleja del fenómeno de asentamiento genera una gran cantidad de variables a considerar por lo que se opta por recurrir a análisis de modelados físicos (ensayos experimentales) tridimensionales. El fallo por el colapso del suelo donde se encuentra apoyado una cimentación con un sistema constructivo no adecuado dará como resultado daños intolerables en la estructura similares a los generados por los asentamientos diferenciales obteniendo fisuras, grietas, quiebre de tabiquería e incluso que la resistencia de la armadura de vigas y columnas excedan la resistencia de diseño. Ortiz, Á. U. (1983). Por lo que poder investigar la existencia de este tipo de suelos colapsables en la ciudad de Cuenca proveerá al profesional a implementar medidas para conocer las características del

suelo y soluciones pertinentes para no dar lugar a aumentos de costes de la obra por problemas no previsto inicialmente.

La identificación de la colapsabilidad de un suelo tiene amplias variables en las cuales se destaca la inestabilidad estructural, proceso relacionado con deformaciones volumétricas positivas al producirse un colapso o negativas cuando existe un hinchamiento, estos fenómenos son hallados en suelos con sistemas tanto bifásicos (esqueleto sólido y poros rellenos de agua) como trifásicos (esqueleto sólido, poros rellenos de agua y poros relleno de aire) que son la base de la composición de los suelos para su estudio, el comportamiento de estos sistemas generara fundamentos que ayuden al profesional a entender el fenómeno de colapso como su disposición mineralógica, la dinámica de las partícula y la fuerzas de atracción de la carga eléctrica suministradas por el agua que rigen los enlaces estructurales guiando la susceptibilidad al cambio de volumen, cuando existe un aumento “las partículas de arcilla con cargas negativas se rodean de moléculas de agua que a su vez atraen a otras moléculas de agua, al quedar desbalanceada su carga eléctrica” (Delgado, 1986). A todo esto se suma la fuerza del peso y el rozamiento generando en el suelo una estructura interna metaestable, el porcentaje de humedad que contiene este tipo de suelos genera un aumento en la cohesión temporal, estabilidad en las partículas por los cementantes (carbonato de calcio y yeso) a los que se encuentran ligados en su punto de contacto y no someten a las partículas de naturaleza limosa a fenómenos de solubilidad, esto puede mostrar una influencia en las variables tensionales que dominan en este tipo de suelos.

1.3 Justificación:

La creciente demanda de terrenos alrededor del mundo por la necesidad de expansión de las ciudades se ha visto reflejada en la importancia de comprender las propiedades y

características de suelos en los que antes se evitaba construir o su idoneidad no era apropiada para el tipo de obra a ser consolidada, llegando a determinar su viabilidad en tiempo y costos.

La ocurrencia de cada tipo de suelo dependerá directamente de las circunstancias ambientales al cual se encuentre sometida, en regiones con climas templados favorecerá a localizar suelos saturados y en regiones con climas áridos o semiáridos que tienen periodos alargados de estaciones secas se podrá hallar suelos parcialmente saturado.

La información obtenida sobre suelos parcialmente saturados (suelos complejos) son limitadas al igual que el conocimiento sobre su comportamiento; esto se atribuye por la simplicidad al describir la resistencia al corte y las fallas que pueden llegar a experimentar los suelos saturados a través de la Ley de Tensiones Efectivas (Terzaghi). Este concepto ha sido modificado en análisis de diferentes investigaciones usando variables de la misma por medio de modelos de comportamientos elastoplásticos, mejorando y modificando los ensayos y equipo de laboratorio para tener una mejor comprensión sobre los fenómenos que conducen a las deformaciones volumétricas en el colapso.

Los problemas de gran magnitud que pueden llegar a experimentar los suelos colapsables generado por los cambios de volumen son irreversibles en muchas de las veces y son causadas sin percibir aumentos en las cargas, es decir, sin percibir cambios en su capacidad mecánica. La atribución normalmente generalizada para este fenómeno es el aumento de humedad cuando sobrepasa cierto límite próximo a la saturación, el agua interactúa como un lubricante para el enlace entre partículas produciendo el deslizamiento tangencial, por lo que llega a ser imprescindible tratar de indicar en el presente documento investigativo índices y marcadores que ayuden al profesional en la etapa de exploración del terreno a

identificar el potencial de un suelo a ser colapsable, previendo al diseño con acciones adecuadas frente a las fallas que puede llegar a experimentar.

1.4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Analizar los suelos colapsables, a fin de determinar sus características, métodos de identificación y formas de mejoramiento de este tipo de suelos para comprender el estudio de sus propiedades mecánicas y su posible uso.

OBJETIVO ESPECÍFICOS:

- I. Analizar la composición mineralógica de los suelos, el origen medio ambiental de su estructura y la forma de deposición que presenta el suelo en comparación de otros estudios, para así determinar las características de la problemática de inestabilidad.
- II. Describir el entorno donde generalmente suele encontrarse los suelos inestables para así establecer la tendencia del suelo de un posible colapso dentro de la zona de estudio.
- III. Identificar el tipo de suelo colapsable predominante dentro de la ciudad de Cuenca, para de esta forma conocer su comportamiento, métodos o formas de identificación y las variables a considerar que se deben tener en la consolidación de una estructura.
- IV. Establecer las medidas de mejoramiento de este tipo de suelo, enfocándose en los posibles usos para lograr condiciones favorables en la estructura con el fin de disminuir daños que ocasionen suelos colapsables.

CAPÍTULO SEGUNDO: MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO REFERENCIAL

2.1.1 Conceptos y definiciones básicas

2.1.1.1 *Antecedentes Históricos.*

Se debe definir de antemano lo que se comprende al hablar sobre los suelos colapsables para el desarrollo del tema, este contiene amplias investigaciones que se han generado en el transcurso y avance de la Mecánica de Suelos. Desde la década de los cincuenta varios investigadores comenzaron a poner énfasis con respecto a la colapsabilidad de los suelos, el propio Terzaghi reconoció tempranamente la disposición del suelo al tener cambios volumétricos después de estos ser inundados (Dudley, J. H., 1970). Las investigaciones de la época tuvieron ciertas restricciones debido a la heterogeneidad del suelo el cual limitaba la representatividad de los ensayos en espesores extensos del estrato y por su formación clásica ya que dificultaba una metodología de clasificación válida para distintas zonas.

“La variabilidad en la identificación de un suelo colapsable es amplia, aunque en mayor cantidad se puede observar el colapso en suelos de orígenes eólicos (loes y arena eólica), aluviales, coluviales, residuales o en rellenos compactados (Dudley, 1970). En cambio, Aitchison (1973) expresa en su investigación que para conocer la colapsabilidad de un suelo se deberá definir su estructura como la porosidad, el grado de saturación y el estado tensional que proporcionará mejores resultados que al conocer el origen del suelo. Alonso, et al., (1987) en su investigación simplificó la manera de considerar la estructura interna de un suelo fundamentándolo en tres tipos de elementos: partículas elementales, agregados de partículas, y poros. Se ha estudiado de igual manera las condiciones requeridas para que pueda haber colapso o expansión como: estructuras de suelos semisaturado potencialmente inestables, el aumento de humedad hasta un punto crítico del suelo y la tensión aplicada

deberá ser muy elevada para suelos colapsables o muy baja para arcillas expansiva. (Popescu, 1986).

“Fernández (1998), señala en su investigación las circunstancias ambientales a las que el suelo sometido a ensayos se localizaba, la región se encuentra en una zona árida donde las precipitaciones promedio anual son de 18mm generando un contenido de humedad menor al 2% lo que generaba un estado seco al suelo aumentando su resistencia, sin embargo, generando colapsos en la estructura del suelo al contener una humedad del 5% con un cambio de volumen menor al 1%. Condori (2012), concluye en su investigación que el suelo colapsable estudiado contenía una matriz mineralógica formado por partículas oligoclasa-andesita, halita, augita y yeso que al estar en contacto con el agua disolvían los enlaces de floculación por lo que se recomienda que para obtener el comportamiento concreto de un suelo en muestras de gran tamaño se debe realizar ensayos de corte directo y triaxial en estado seco y húmedo. Flores (2018), determina que el potencial de colapso de un suelo viene dado por las siguientes propiedades: la cantidad de material cementante, la densidad natural seca, el contenido de humedad, límite líquido, relación de vacíos y las sales solubles totales, recomendado en su investigación que si se desea verificar más a fondo la colapsabilidad de un suelo se deberá realizar ensayos de densidad seca y limite líquido para comparar en la gráfica propuesta por Holtz, W. G., y Hilf, J. W. (1961). Quijano y Tenjo (2018), analizaron tres métodos de estabilización: mejoramiento mecánico (material granular), sobre humectación óptima de compactación y cal como agente reactivo al 5 y 7% para suelos con índices de colapsabilidad de moderado a moderadamente alto entre 6.5 a 8.13, obteniendo como resultado que la pre-humectación del suelo genera resultados favorables de estabilización ya que rompen los cementantes preexistentes en las partículas reduciendo así el índice de colapsabilidad a un 91.9%.”

2.1.1.2 Definición de Términos Básicos

Saturación: Estado de humedad mayor al 80%, el suelo se encuentra por debajo del nivel freático, se considera que actúa dos fases: líquido y sólido. (Ochoa, V. E. M., 2012).

Semisaturación: Grado de humedad menor que al correspondiente a la saturación entre el 50% y 80%, conformado por tres fases: sólido, líquido y gaseoso. (Aretxabala-Díez, A., 2002).

Colapso: Disminución rápida de volumen de un suelo produciendo un derrumbe de los granos hacia el vacío intergranular. (Zur, A., & Wiseman, 1973)

Suelos colapsables: También llamado suelos geotécnicamente inestables, estos suelos son susceptibles de sufrir importantes cambios de volumen al saturarse o aumentar su contenido de humedad. (Reginatto, A. R., & Ferrero, J. C. 1975)

Metaestables: Cuando un suelo en una primera instancia aparece como estable, pero puede perder esa condición instantáneamente en presencia de un agente desencadenante, obteniendo una nula capacidad portante. (Díaz del Real y Salguero, E. M., 2015).

Cementantes: Materiales inorgánicos que contribuyen a la matriz que conglomeran las partículas de la estructura de un suelo. (Redolfi, E. 2007)

Floculación: Proceso de vinculación débil de las partículas de un suelo donde se unen unas con otras en grumos formando sedimentos. (Redolfi, E. 2007)

Cohesión: Es una medida de adherencia entre las partículas de un suelo generando una resistencia al corte, está relacionado con la afinidad electroquímica entre el suelo y el agua. (Flor Arroyo, F. D., 2016).

Capilaridad: Capacidad de los líquidos al ascender venciendo la fuerza de gravedad, este depende de las propiedades del fluido como la tensión superficial y la cohesión intermolecular. (Ochoa, V. E. M. 2012).

Succión: Se define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación. (Ridley, 1993)

Membrana Contráctil: “La piel contráctil se comporta como una membrana elástica sujeta a un esfuerzo, entretejida en la estructura del suelo”. (Fredlund et al., 2012)

Histéresis: “Fenómeno que ocurre en varios aspectos del comportamiento de los suelos parcialmente saturados, el más notorio se produce durante el secado y humedecimiento del suelo”. (Likos y Lu, 2004).

2.1.1.3 Definición de suelos colapsables.

En algunos tipos de suelos se ha observado la presencia de un fenómeno llamado colapso, pero se debe partir de la comprensión que la conformación de la partícula del suelo tiene muy pocos aspectos relacionados con su comportamiento, por lo que se debe enfocar en su disposición interna como su génesis, el contenido de minerales, de aire y agua que influyen en su resistencia, permeabilidad y transmisión de esfuerzos para entender los fundamentos del fenómeno. (Díez, A. A, 2005).

La inestabilidad de un suelo se experimenta al sufrir un aumento de volumen ocasionado por una relajación de los esfuerzos intergranulares o de la pérdida brusca de volumen y de resistencia que ocasiona un desmoronamiento, llenando su alta relación de vacíos existente en el terreno por el reordenamiento de sus partículas y colocando al suelo en una posición más equilibrada, el fenómeno en suelos granulares es atribuido al debilitamiento por saturación ya sea de manera natural o artificial que genera una disolución de los agentes

minerales que actúan como cementantes (yeso y carbonato de calcio) obteniendo una cohesión temporal lo que ayuda a una estructura floja a conservar su estabilidad aparente. Kalantari (2012) sustenta en su investigación sobre la saturación necesaria del suelo para sufrir un colapso sin el incremento de carga no es imprescindible que se llegue al punto de saturación si no que puede ocurrir al sobrepasar el 50% del mismo.

“El mecanismo de colapso puede variar en función del contenido mineralógico de las partículas y de sus enlaces, del tipo de estructura, del tipo de deposición del material, del contenido de humedad y otros factores de naturaleza electro-química”. (Carrillo Gil A, 1991).
“En la mayoría de los casos de colapso investigados hasta la fecha son suelos con estructura panaloide y granos redondeados unidos entre si por alguna clase de cementación”. (Carrillo Gil A.,1978)

2.1.1.4 Origen de Suelos Colapsables

Un elemento en común que coincide para la formación de este tipo de suelos es la procedencia de una Roca Madre de tipo margosa y yesífera que comparten una composición rocosa del periodo terciario con suelos residuales generados en el periodo cuaternario. (Díez, A. A. 2005).

Se ha definido normalmente de tipo limo-yesíferos o limo-arenoso (Rodríguez Ortiz, J. et al. 1982) a los suelos colapsables producidos por la meteorización de las rocas sedimentarias (limonita, yeso y arenisca), estos tienen valores característicos de un 80% de limos que son granos de granulometría fina que es un tamaño predominante en este tipo de suelos metaestables, aunque también existen cantidades pequeñas de un 8% de arenas finas y un 12% de arcillas, que son porcentajes estimados hallados normalmente en estos tipos de suelos (Cordero, 1995). Cabe resaltar que, aunque la litología expuesta del depósito puede dar un indicio de la colapsabilidad de un suelo es necesario realizar los ensayos

correspondientes para conocer las características físicas del suelo que serán propiedades particulares que mostrarán el potencial de colapsabilidad de un suelo.

En varias investigaciones se ha encontrado que una característica principal para los suelos que tienden a colapsar es la alta constancia de estos en zonas de bastante desecación, obteniendo densidades bastante menores a las normales alrededor de 700 kg/m³ (Laporte y Sáenz, 1985) y se ha observado que la susceptibilidad al colapso aumenta al descender el grado de saturación en torno al 50% – 80% (Díez, A. A. 2005), por lo que normalmente este tipos de suelos llegan a ser definidos como suelos semisaturados (Gaaver, K. E., 2012). Los suelos no saturados regularmente son hallados en zonas con climas áridos o semiáridos donde inicialmente son depositados de forma saturada y desecados progresivamente por el medio ambiental, pudiendo conformar hasta un 30% de la superficie de la Tierra según distintos autores.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Caracterización Geotécnica de los Suelos.

2.2.1.1 Tipos de Depósitos.

Se ha tratado de generar una clasificación entre los tipos de suelos que tienden a presentar el fenómeno de colapsabilidad, para su estudio, Rogers (1995) realizó una división generando conjuntos de familias formadas a partir de su origen y la forma de sedimentación:

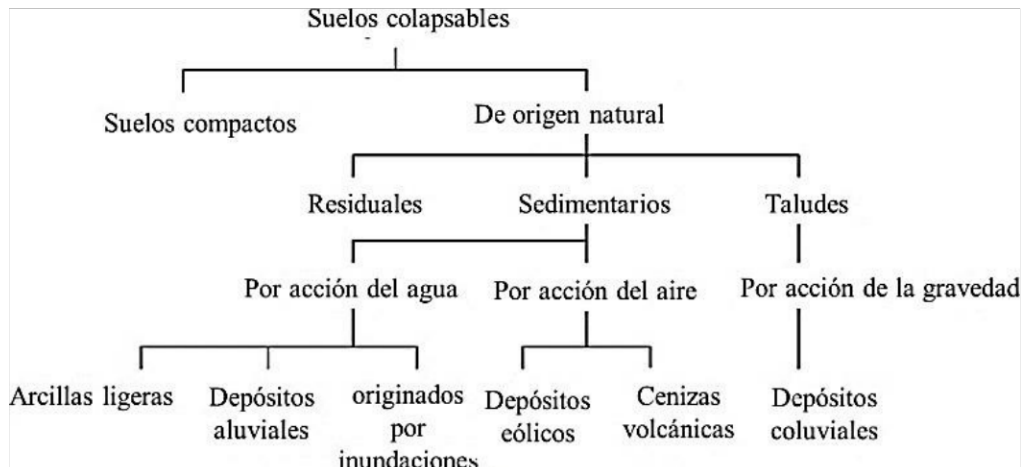


Ilustración 1. Familia de suelos colapsables. Fuente: (Rogers, 1995)

De esta división se puede particularizar fundamentalmente cuatro tipos de estratos de suelos con estructura potencialmente colapsable siendo estos con más extensión sobre la superficie: los suelos aluviales, los suelos eólicos, suelos residuales y rellenos artificiales mal compactados que serán descritos brevemente a continuación. (suelos parcialmente saturados).

- **Suelos aluviales:** Generados por precipitaciones, transportados normalmente por corrientes de retornos largos de lodo que contienen altos porcentajes de arcilla con predominación de material grueso (contiene tamaños de granos de finos a muy gruesos), granos con silueta subredondeada que representan una baja cohesión y por su estructura abierta una baja densidad, en estado seco contiene una notable resistencia mecánica. “Se ha observado que el asentamiento máximo ocurre cuando el porcentaje de arcillas alcanza a 12% de los sólidos, y se presenta un menor asentamiento cuando las arcillas representan una cantidad menor que 5% y el suelo se expande si dicho porcentaje es mayor que el 30%”. (Tzatchkov, V. 2007).
- **Suelos eólicos:** Este tipo de suelos son trasladados por medio del viento el cual dependiendo de su velocidad tendrá diferentes maneras de transporte: por rodamiento,

suspensión y saltación, en cambio, la forma de depósito dependerá de las dimensiones del grano del material, partículas de tamaño fino (arcillas y limos) que tomará el nombre de Loess, arenas de tamaño mediano y grueso son llamados Dunas o Médanos, y las partículas con procedencia de polvo volcánico son llamados Pumíticos, por lo general este tipo de suelos de procedencia eólica son los más extendidos y encontrados normalmente en zonas áridas, este tipo de suelo tiene mayor grado de colapsabilidad que los suelos aluviales. Torres Rodríguez, N. E. (2019), en su investigación identifico que en la zona de estudio (Paita-Piura) se encontraban suelos metaestables formados por depósitos eólicos donde el grado de saturación mínimo fue de 5.81% y máxima de 12.82% lo cual le confiere al suelo como insaturado, cumpliendo la condición de encontrarse en una zona semiárida con una relación de vacíos que varía desde los 0.76 hasta 1.17, una porosidad mayor al 0.40 y valores bajos de peso volumétrico seco entre 11.96 -14.70 KN/m³.

- **Suelos residuales:** La forma de depósito de este tipo de suelos son producidos por medio de agentes de meteorización química resultado de la agresión de elementos sujetos al intemperismo, estos suelos no sufren transporte del lugar de la roca de la cual fue derivada lo que genera una estructura suelta no compactada. Lizcano, A., Herrera, M. C., & Santamarina, J. C. (2006), concluyeron “Los suelos residuales evolucionan a partir de la meteorización in situ, y normalmente, se caracterizan por una granulometría más fina próxima a la superficie donde la alteración ha sido más intensa”. Estos suelos se encuentran formados por granos de arena lo que genera una estructura abierta con minerales arcillosos que son obtenidos por la autogénesis del suelo junto a la alteración de feldespatos y cuarzo al tener contacto con el agua, estos generan uniones granulares por enlaces iónicas llegando a obtener fuertes ligas al desecarse los depósitos. (Springall, 1974). La problemática obtenida en este tipo de

suelos viene dada por su trabajoso reconocimiento en campo por la vegetación encontrada en ellos y su aparente firmeza en estado seco ya que una vez que estos depósitos son saturados generan una disolución (fenómeno químico) originando una pérdida del material que da como resultado el colapso en este tipo de suelo.

- **Rellenos artificiales mal compactados:** La abundancia de este tipo de suelos se debe en mayor parte a la falta de terrenos idóneos para la construcción, derivado del desarrollo urbano y social con la creciente demanda industrial que se está viviendo, cabe recalcar que la mayor parte de fallos que se ha observado en cimentaciones ha sido evidenciado sobre terrenos que se ha sustituido el material, estos terrenos son acomodados de manera artificial mediante depósitos sedimentarios extraídos de canteras en el cual el material obtenido cumple con una serie de solicitudes específicas pre establecidas que se trasladan al lugar de la construcción donde el proceso de compactación se lo realiza de manera controlada con el fin de alcanzar propiedades mecánicas adecuadas que llegan a fallar cuando el control geotécnico correspondiente a registros como contenido de humedad y energía aplicada durante el proceso no son óptimos, por lo que se obtiene una gran inestabilidad de la masa generando un incremento peligroso en el grado de colapsabilidad.

Se debe recordar en cuanto a los tipos de depósitos que estos pueden ser perjudiciales o favorables, como por ejemplo en el caso de los depósitos coluviales antiguos están consolidados de tal manera que tienen un mejor comportamiento que los jóvenes, de igual manera en el caso de los suelos aluviales no todos son colapsables, caso contrario en Cuenca, las zonas donde se ha generado proyectos constructivos sobre estos suelos (Ilustración 3) las estructuras deberían contener un proceso de inestabilidad afectándolas lo cual no es el caso y en los rellenos que son depositados por acción del hombre tienden a fallar por errores

constructivos mas no por propiedades puntuales del suelo que dictan la tendencia de este a sufrir el fenómeno de colapsabilidad.

En las investigaciones citadas en el apartado de los *Antecedentes Históricos* de este documento, se señaló la impropiedad de precisar como colapsable a un suelo sin antes conocer y determinar su estructura, el análisis sobre los materiales que lo conforman y de las propiedades mecánicas del mismo ya que no dependerá solo de constatar un tipo de depósito para que se desencadene el proceso de inestabilidad del terreno.

2.2.1.2 Tipos de Suelos.

Poder definir categorías, agrupaciones o clasificaciones de un material como el suelo que tiene una diversidad tan amplia en sus particularidades genera una gran cantidad de las mismas (funcionalidad, características mecánicas-físicas, origen, tamaño de granos, etc.), de igual manera existen sistemas de identificación que varían en sus criterios los cuales cadauno difirieran dependiendo de la importancia al campo por el cual va a ser estudiado. Una forma descriptiva optada desde los inicios de las investigaciones dentro del campo de la mecánica de suelos a estado sujeto a la distribución de los tamaños de las partículas que lo conforman (Badillo, E. J., & Rodríguez, A. R., 1976), el poder clasificarla de acuerdo a su distribución granulométrica nos ayudara a describir los diferentes materiales que se encuentran presentes y generan comportamientos especiales para la inestabilidad en un suelo. La clasificación propuesta a continuación fue planteada por G. Gilboy y acogida por el Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.)

2.0 ↑	0.6 ↑	0.2 ↑	0.06 ↑	0.02 ↑	0.006 ↑	0.002 ↑	0.0006 ↑	0.0002mm ↑
Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fino	Gruesa	Media	Fina (Coloides)
ARENA			LIMO			ARCILLA		

Tabla 1. Clasificación por la universidad de Massachusetts Institute of Technology "M.I.T."

Suelos Arenosos: Este tipo de suelos poseen una textura gruesa siendo su tamaño de partícula la más grande en la clasificación, pueden absorber efectivamente el agua, pero no tienen la capacidad de retenerla, caracterizado principalmente por su plasticidad nula y su cohesión baja, con un contenido de finos menor al 20% (más de la mitad del suelo se retiene en el tamiz número 200 y a la vez mas de la mitad de la muestra pasa el tamiz número 4) y el contenido de materia orgánica en este tipo de suelos es escasa. Esta arena puede generar comportamientos especiales en los suelos sujetos principalmente a su contenido, llegando a ser susceptibles a colapsabilidad en casos extremos y cuando son uniformemente graduadas tienen una probabilidad alta de licuefacción al existir nivel freático (López Martínez, M. A. 2017). Las partículas que conforman estos suelos poseen formas dentadas irregulares o redondas y planas, son provenientes de la erosión de rocas y de minas característicos por su color gris, azul y rosa, cuando su origen es volcánico aledaños a los mismo mantienen un color negro y arenas procedentes de playas contienen sales y materia orgánica. (D. Ruano. 2012).

Suelo Limosos: Se encuentra formado por sedimentos clásticos (limo) con una textura parecida a la del polvo por su fácil descomposición, la filtración del agua a través de este es muy rápida con una retención media, esto origina la fertilidad del suelo por la fácil descomposición de la materia orgánica (nutrientes) que contiene, no muestra un aspecto plástico cuando este se encuentra saturado y sus granos de forma redondeada son de tamaño muy finos cuya variación en diámetro es de 0.06 a 0.002mm (0.2 a 0.002 mm en el Sistema

Internacional) provenientes por procesos de glaciación que son transportados por el viento o ríos que son donde especialmente se encuentran en los bordes del mismo. (Rodríguez, D. 2019). Estos tipos de suelos no contienen cohesión lo que genera problemáticas en los procesos constructivos y al ser sometidos a vibraciones con características adecuadas (intensidad, frecuencia, intensidad, velocidad de propagación, etc.) pueden generar un fenómeno de inestabilidad del suelo llamado licuefacción. (Zapata, O. 2012).

Suelos Arcillosos: Estos suelos de textura fina tienden asemejarse a los limos por el tamaño de sus partículas que se encuentran con un diámetro menor a 0.002 mm con la diferencia en su gran retención de agua que mantiene, la forma plana de sus granos que se unen en forma de placas genera en el suelo una impermeabilidad, cohesión y características de alta plasticidad, pero, manteniendo una baja porosidad. (Besoain, 1985). Proviene de la afectación físico y química de minerales (altas cantidades de montmorillonita y en menor o casi nula de vermiculita y clorita) formadas a partir de rocas madres (feldespatos, piroxenos y micas) por la acción del agua primordialmente, la composición de este material será tan amplio como su gama de colores y su origen dependerá de la roca alterada como el grado de afectación de la misma. (Zapata, R. 2018). El peso específico oscila entre de 2,60 a 2,75 g/cm³, lo que proporciona una alta oposición a la erosión y el contenido de agua disminuye bruscamente las altas fuerzas de cohesión del suelo que van desde 0,25 a 1,5 Kg/cm² ya que un suelo arcilloso puede pasar de un estado sólido a un estado líquido lo que genera la fluidez de sus partículas obteniendo como resultado suelos con nula capacidad portante. (Ruano, D. 2012). El grupo de minerales de las Esmectitas (montmorillonita, nontronita y saponita) en estados de saturación o semisaturación son las arcillas más significativas de experimentar un fenómeno de inestabilidad llamado expansión o contracción afectando su volumen de manera significativa al aumentar o disminuir su humedad respectivamente, generado a partir de los tipos de enlaces débiles existentes en su estructura de forma laminar, las illitas o

caolinitas aportan propiedades físicas de cambio de volumen al suelo, aunque no son considerados como minerales activos pueden generar esto siempre y cuando se encuentren en grandes cantidades, se ampliara la comprensión de este tema en el siguiente capítulo.

2.2.2 Dinámica y Estructuración de las partículas

Se ha tratado de precisar a lo largo de varias investigaciones de diferentes autores, los tipos de estructuras que estos suelos pueden tener en común para la ocurrencia del fenómeno del cambio de volumen a lo que están sometido, en mayor parte se ha precisado que estos suelos al tener una alta relación de vacíos tienen una estructura abierta de forma panaloide con granos redondeados generando un estado metaestable exterior llegando a soportar grandes cargas en condiciones de semisaturación gracias a los enlaces de unión entre sus partículas que forman una rigidez que es susceptible y al tener cambios ligeros que modifiquen su estado inicial llegan a experimentar un cambio brusco de disminución de volumen, en cambio, si la estructura es ampliamente consistente existirá una disminución lo bastante alta en su relación de vacíos que genera en el suelo un comportamiento expansivo presente al experimentar un alivio en los esfuerzos intergranulares.

El mecanismo de inestabilidad dependerá en gran medida a los tipos de enlaces intergranulares contenido en la estructura del suelo donde interviene su disposición, contenido mineral y saturación que influirán en la magnitud del deslizamiento tangencial explicado a continuación:

- (En suelos granulares semi-saturados) El enlace por *capilaridad* presente en limos y arenas provén una adhesión generada por las moléculas de agua formando una cohesión entre las partículas que proporcionan una tensión por la presión negativa de poros, estas fuerzas de presión efectiva se localizan entre los contactos de las

partículas (meniscos) que actúan en un plano tangencial, la sobre humectación del terreno con estas características obtendrá la disminución de la presión efectiva desencadenando un deslizamiento entre los granos del suelo.

- Las pequeñas dimensiones de una partícula de arcilla es lo que proporciona a este un comportamiento de un sistema de enlace *coloidal*, esto significa que predominantemente están sometidos a fuerzas de tipo superficial regidas por leyes electrostáticas originadas por la carga eléctrica que poseen y no solo por las fuerzas generadas por la masa (Díez, A. A. 2005), la carga negativa de una partícula de arcilla es equilibrada al atraer cationes que se disponen alrededor del mismo generando una doble capa, las partículas tendrán propensión a repelerse (dispersión) a medida que se aproximen dependiendo del espesor de esta capa generada o de atraerse en función de la distancia entre las partículas a lo que se le denomina una estructura floculada (Redolfi, E. 2007), lo que se traduce a la hidratación de las partículas que genera un aumento en el volumen en suelos expansivos. La inundación del terreno provocara un descenso en la aglomeración de iones formando una dispersión que debilitara la resistencia de la estructura del suelo (Delgado, 1986).
- (En suelos granulares secos) La impregnación de *cementantes* entre los contactos intergranulares brinda una estabilidad aparente adicionando una resistencia cohesiva que impide el deslizamiento entre las partículas, este tipo de enlace de aspecto físico-químico son obtenidos por sales cristalizadas de yesíferos y carbonatos de calcio de naturaleza soluble alojados entre los espacios vacíos del suelo, la disolución de estas partículas debido al aumento en la saturación genera una pérdida del material sólido que compone la estructura dando lugar la pérdida de volumen por el reordenamiento de partículas para ubicar el suelos en una nueva posición de estabilidad.

- (En suelos granulares saturados) La estructura macroporosa que normalmente se haya en los suelos susceptible a los fenómenos de colapsabilidad trabaja de tal manera que la fuerza friccional ejercida en los contactos entre sus partículas genera estabilidad y consistencia al suelo, las partículas granulares al no tener cohesión llegan a tener un accionar violento cuando experimentan variabilidad en su estructura inestabilizándola y haciendo que sus partículas tiendan a reordenarse hasta una posición más estable. Usualmente las cargas cíclicas como las de un sismo pueden llegar agravar el peso soportado por un suelo de manera precipitada, esto genera un aumento en la presión del agua en los poros y disminuye los esfuerzos efectivos en los estratos de arena sujeto a un flujo de agua ascendente hasta el estado de saturación, esto llega al punto en el que provoca la separación de las partículas generando un estado libre del movimiento de las mismas cambiando su comportamiento de estado sólido a un estado semejante al de un fluido viscoso semilíquido conocido como Licuefacción. (Tzatchkov, V. 2007).

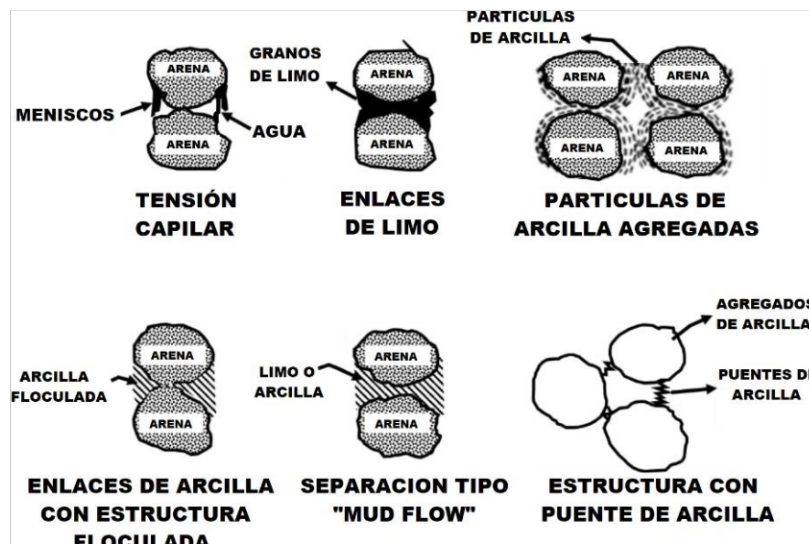


Ilustración 2. Estructuras potencialmente colapsables. Fuente: (Dudley, 1970 y Maswoswe, 1985)

Los procesos de colapsabilidad anteriormente descritos se ha puesto en consideración en esta investigación ya que son los más documentados, se evidencia como este fenómeno está muy enlazado al humedecimiento, efecto que genera la tendencia en este tipo de suelos a aumentar su grado de colapsabilidad afectando directamente a la solidez artificial que mantiene la estructura macroporosa y mal acomodada del suelo que dependerá como se dijo anteriormente de una cohesión aparente generado una resistencia friccional al corte, una resistencia a la tracción por los esfuerzos normales efectivos de la presión de poros negativa por la succión en el suelo y de la resistencia a la compresión por los enlace o puentes formados por acumulación de arcillas o sales minerales cristalizados en los puntos de contacto entre las partículas.

Este aumento en la humedad en estos tipos de suelos origina una nueva disposición en su estado de equilibrio al cual no se puede anticipar por la gran cantidad de variables que puede existir, pero se deberá tomar precauciones para controlarlo sin que genere cambios o sensibilización en las condiciones de equilibrio en el que se encuentra el suelo y obteniendo así un desmoronamiento del mismo, estos aumentos de saturación pueden provenir de diferente fuente como:

- Tuberías de agua rotas.
- Drenajes con fugas.
- Drenajes del agua de depósitos y albercas.
- Incremento lento del nivel freático.
- Precipitaciones excesivas.

2.2.3 Tipos de Suelos Inestables.

Para comprender de forma adecuada los comportamientos especiales de estos suelos se realizará una descripción básica de estos, examinando con detalle los aspectos que rigen las respuestas de estos tipos de suelos.

2.2.3.1 Suelos Expansivos.

Estos suelos en estado semi saturado están claramente vinculados con las características de las partículas de arcilla (fenómenos mecánicos y físicos-químicos) al igual que la estructura entre sus granos, la presión de poros y las fluctuaciones de humedad a las que se encuentran sometidos en consecuencia de las condiciones ambientales que se relacionan con los cambios volumétricos que estos padecen lo cual no dependerá solamente de la variación de los esfuerzos externos a los que se encuentran sujeto. (Ortiz Ulloa, F. A., & Pauta Suárez, B. R. 2016).

A través de ensayos que establecen las características geotécnicas los cuales varían dependiendo de su aplicabilidad en campo o de su grado de exactitud dentro del laboratorio se ha estudiado este tipo de suelos con el fin de medir su grado de expansión analizando el porcentaje de arcilla en el terreno; la forma de los granos y su estructura que forma entre las partículas buscando la relación de estos factores generadores del fenómeno de hinchamiento en terrenos arcillosos con características típicas de plasticidad, bajas presiones externas y altas densidades en estado seco; su comportamiento al tener facultades de intercambio de cationes y por medio de distintos estados físicos en base a los índices de consistencia dentro de los Límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico y límite de contracción o retracción (Zapata, R. 2018), este último establece un procedimiento de manera indirecta para poder medir de forma cuantitativa el potencial expansivo del terreno a través de una

relación entre su plasticidad y su aumento de volumen por la absorción de agua que el suelo puede generar (Lambe y Whitman, 1959),

Expansividad	Límite de retracción	Índice de plasticidad	Limite Líquido	Contenido en finos	Hinchamiento en superficie [cm]	Presión de hinchamiento [KPa]
Baja	> 15	< 15	< 30	< 30	0 – 1	< 50
Media	11 – 15	15 – 30	30 – 45	30 – 60	1 – 2	50 – 120
Alta	< 11	> 30	> 45	> 60	2 – 3	> 120

Tabla 2. Grado de expansividad en función de distintas propiedades geotécnicas. Fuente: (Da Mata de Alva Costa, W. 2009).

Los controles sobre esta problemática y los efectos negativos de la presión de expansión en los proyectos constructivos deben radicar desde el apropiado diseño para estas estructuras la cuales deberían en primera instancia contrarrestar estos cambios de variedad de volumen para que la obra no sea sometida a esfuerzos por encima de los admisibles que podrían desencadenar en un colapso, o en su caso por consecuencia proteger el contacto con el agua a la masa del suelo donde se cimentara ya que podría verse expuesta a un cambio en su porcentaje de humedad dando paso a la activación de este fenómeno (Guamán, G. P. S., 2019).

2.2.3.2 **Suelos Metaestables.**

Los suelos metaestables hacen relación a su momentánea estabilidad siempre y cuando sus condiciones iniciales no sean alteradas por situaciones externas, lo que les hacen suelos altamente inestables, la estructura granular de estos suelos usualmente son de índole macroporosa generado por una relación de vacíos relativamente alta en donde los extremos de sus granos se encuentra unido por una cohesión aparente por agua capilar y fortalecido

por cementantes cristalizados de sales solubles (Mata Monge, R. 2005), estos suelos considerados como insaturados (mientras menor sea su saturación mayor vulnerabilidad al colapso) pueden llegar a soportar grandes solicitaciones mecánicas sin mostrar variedad en su volumen pero, el colapso de estos está relacionado con factores químicos externos y las variaciones ambientales como el proceso de saturación que en una granulometría mal graduada encontrada en este tipo de suelos con una fracción gruesa donde sus contactos intergranulares unidos por material fino en que prevalece la existencia de limo y arcilla genera un debilitamiento de estos enlaces que disminuye progresivamente la resistencia al corte de estos suelos percibiendo asentamientos desmesurados de forma repentina e irreversibles sin poder tomar medidas para poder interrumpir este proceso (Mata Monge, R. 2005; Gaaver, 2012).

Dentro de las estructuras civiles este tipo de fenómeno de colapsabilidad es hallado con mayor frecuencia en suelos en condiciones de compactación óptimas con bajas densidades y en obras hidráulicas por su constante interacción con el agua siendo este el inconveniente habitual como desencadenante del problema por lo que el fin de toda obra debe ser la identificación de manera oportuna de estos tipos de suelos para poder presentar soluciones técnicas y económicamente viables para hacer frente a las causas que generan el aumento de humedad y la consideración en el diseño del desmoronamiento (Tzatchkov, V. 2007). por distintos tipos de colapso definidos a continuación:

“Grupo I: Suelos en los que tiene lugar un rápido cambio de la relación entre presiones efectivas y las deformaciones sin que se alcance la resistencia última del material. De acuerdo con esto la causa del colapso es únicamente el cambio de las presiones efectivas. A este grupo pertenecen los limos o arcillas cementadas y las rocas de gran porosidad. Cuando se ensaya a humedad constante, se detecta una notable modificación de su módulo de compresibilidad al alcanzar un cierto valor las presiones efectivas.

Grupo II: Suelos en los que, sin la presencia o cambio de las condiciones que producen el colapso, no hay cambio abrupto en la relación presión-deformación. Tal es el caso de los loess y algunas arcillas que contienen sulfatos. Si se ensayan a humedad constante, la relación tensión-deformaciones es una curva suave y continua y sin agudos quiebros. La saturación produce, sin embargo, un importante cambio volumétrico, debido probablemente a un incremento de la presión de los poros que origina el agotamiento de la resistencia al corte del suelo.” (Uriel & Serrano, 1973, 1974)

2.2.3.3 *Suelos Licuables.*

La complejidad del fenómeno ha generado que por ahora se tenga diferentes deducciones del mismo, como la frecuente presencia en suelos no cohesivos, granulares flojos o en arena y limos saturados el cual se halla muy ligado con las cargas monotónicas, transitorias o repetidas (agitaciones, volcán de arena, falla por flujo, etc.), este habitualmente se produce por sismos que generan aceleraciones en el terreno de manera rápida dejando a la estructura sin drenaje (evacuación del agua acumulada en sus poros), con una intensidad lo suficientemente alta y con un tiempo extenso de la aplicación de la carga pueden alcanzar magnitudes límites que origina el paso del material de un estado sólido y firme a un estado viscoso semi líquido por la alta presión de los poros que experimenta el suelo, esto causa la precipitación de los esfuerzos efectivos y subsecuente la disminución de la capacidad de carga generando fallas por resistencia al esfuerzo cortante percibiendo reducción en la rigidez del suelo que provoca grandes asentamientos o deslizamientos ocasionado por los movimientos tanto verticales como horizontales que percibe el terreno tras iniciado este fenómeno de inestabilidad. (Tzatchkov, V., 2007; Basset Salom, L. 2015).

La identificación preliminar de este tipo de suelos se genera a través de métodos y criterios que tratan de evaluar de forma cuantitativa y cualitativa la capacidad de presentar dicho fenómeno mediante características similares de lugares que hallan experimentado la licuefacción. Uno de estos se genera mediante el *criterio histórico* donde se ha verifica la ocurrencia a través de la historia de licuefacción de una zona siempre y cuando las condiciones del sitio (condiciones del subsuelo y del agua subterránea) se hallan conservado invariables el proceso de inestabilidad puede volver a presentarse, los *criterios geológicos* pueden de igual manera mostrar la susceptibilidad de un suelo como la edad del depósito siendo los suelos jóvenes más propensos que los depósitos antiguos, o el tipo de depósito como los fluviales y eólicos al encontrarse saturados al igual que depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, el *estado de un suelo* ya que los esfuerzos efectivos a los que están sujetos como de la densidad del sitio dictan el comportamiento bajo situaciones de carga cíclica, es decir, en suelos sueltos tienen más riesgo que suelos densos al igual que los que están sometidos a altas tensiones de confinamiento efectiva y del mismo modo la *composición del suelo* también hace relación a la susceptibilidad según las características físicas como por ejemplo la distribución del tamaño de los granos donde una granulometría uniforme en arenas limpias compuestas mayormente de partículas de forma redonda tiende a licuarse. (Lindao Baque, J. V., & Polonio Briones, L. M. 2014).

	DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS			ROCA
	ALTO (3)	Medio (2)	Bajo (1)	Nulo (0)
GRANULOMETRÍA O TAMAÑO DE PARTÍCULA	Arenas limpias, finos limosos, arenas con finos o arenas con gravas y finos	Gravas arenosas	Composición variable entre finos limo-arcillosos y arenas con gravas	

Tabla 3. Susceptibilidad de la licuefacción de acuerdo a la granulometría. Fuente: (Falcón & Ramírez. 2012).

Crterios	Valor
Porcentaje de finos menores que 0.005 mm	< 15%
Límite líquido (LL)	< 35%
Contenido de agua	> 0.9LL
Índice de liquidez	< 0.75

Tabla 4. Criterios de licuación en suelos con finos. Fuente: (Tzatchkov, V., 2007)

2.2.4 Resistencia al corte en suelos colapsables.

Asociado a la resistencia del material antes de fracturarse, este se valora en función de las fuerzas cortantes en Newtons por metro cuadrado (N/m^2) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2). Este valor depende de la naturaleza del suelo, el tipo de muestra y la velocidad bajo el cual se hace la medición (Das. 2015), siendo esta una de las propiedades mecánicas del suelo con una considerable ocupación dentro de la Ingeniería Civil por la importancia dentro de los diseños en los que se utiliza, se mantendrá un enfoque hacia la mecánica de suelos no saturados ya que permite una mejor predicción del comportamiento de suelos potencialmente colapsables y expansivos (Barrera et al., 2002).

Los daños causados por la expansión o retracción de arcillas expansivas son muy variados y pueden ocasionar desde grietas, fisuración y rotura de elementos estructurales, rotura de cimientos y conducciones o deformación en pavimento. La gravedad de los mismos dependerá del potencial expansivo del suelo y las características estructurales de la obra, pudiendo ocasionarse daños irreversibles (Zapata, R. 2018)

La capacidad que tiene las partículas del suelo de oponerse al deslizamiento entre ellas se conoce como la resistencia al esfuerzo cortante siendo su valor limite la tensión máxima percibida antes de generarse el fallo, inestabilizando sus enlaces de adherencia en los puntos de unión, en la explicación del origen de suelos colapsables se puso en contexto la normalidad de definir a los suelos que sufren de este tipo de fenómeno como *suelos*

semisaturados por su comportamiento, la resistencia al corte de forma frecuente está asociada con la carga que ejerce una estructura que transfiere diversas tensiones al suelo, pero, como se explicó en la descripción de los mecanismos de colapso se evidenció que dentro del fenómeno de desmoronamiento existen diferentes fuerzas que confieren al suelo su resistencia más allá de las generadas por el peso y el rozamiento que son conceptos básicos utilizados en la Ley de Tensiones Efectivas (Terzaghi) al cual se le ha incorporado los efectos de las fuerzas de succión por capilaridad (Bishop et al. 1960) y las fuerzas de tipo superficial electroestáticas (Lambe, 1959), esto con el fin de describir el comportamiento de una manera más acertada para este tipo de suelos no saturados frente a la resistencia al corte.

Se evidenció que a medida que aumenta la succión del suelo con ello incrementa la resistencia al corte elevando el esfuerzo efectivo, este aumento no es infinito ya que la succión desvanece cuando el suelo llega a un estado de aridez por desecación (Wu, et al, 1984), constatando la responsabilidad de la succión matricial como principal influyente de los cambios de volumen que puede experimentar y no tanto por la succión total (Alonso et al. 1987), siendo el proceso de saturación total la condición más desfavorable dando como resultado el aumento de presión de poros para la disminución de esta resistencia dependiendo de igual manera del índice de vacíos inicial, grado y tipo de cementación, una vez generado el desmoronamiento del suelo la estructura pasa a una nueva condición de estabilidad capaz de soportar las tensiones sin sufrir posteriores colapsos.

Es importante definir el principio de esfuerzos efectivos en los suelos no saturados previamente a la resistencia al corte con la intención de definir una expresión el cual englobe el comportamiento de un esfuerzo único capaz de simplificar el fenómeno que se genera, existe una gran variedad para representarlo en donde resalta la sugerida por Bishop (1956) partiendo de la ecuación de presiones efectivas de Terzaghi desde un criterio general:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi (u_a - u_w) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

(u_a) : la presión del aire.

χ : es el parámetro relacionado con el grado de saturación (S_r) con valores entre 0 y 1.

$(\sigma - u_a)$: esfuerzo neto.

$(u_a - u_w)$: succión del suelo.

La función de la ecuación de Bishop ha sido discutida al no poder predecir el proceso de desmoronamiento ante la saturación una vez que el suelo llega a estar árido y cargado con valores por arriba de la presión de preconsolidación (D. G. Manzanal, 2008).

Fredlund, Morgenstern y Widger (1978) en su estudio realizaron una gran aportación en su investigación obteniendo un modelo integral para el comportamiento de los suelos no saturados frente al esfuerzo al corte (r) relacionándolo con sus estados de esfuerzo ($\sigma - u_a$ y $u_a - u_w$).

$$r = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

$(\sigma - u_a)$: Esfuerzo normal en el estado de falla.

φ' : Ángulo de fricción interna asociado al esfuerzo normal.

$(u_a - u_w)$: Succión matricial en el plano de falla.

φ^b : Ángulo de fricción interna con respecto a la succión.

De igual manera ha sido puesto en discusión la validez de esta expresión por diferentes investigaciones:

- Escario y Sáez (1986) mediante ensayos realizados en arcillas con diferentes valores de succión indicaron la inconstancia del parámetro φ^b para un tipo de suelo dado.

- Gan, Fredlund y Rahardjo (1988), observaron mediante ensayos triaxiales con valores de succión bajas la no-linealidad del esfuerzo de corte donde φ^b tendía a disminuir en cuanto la succión incrementaba.
- Escario y Juca (1989) mediante ensayos de corte directo de igual manera evidencio la no linealidad del esfuerzo al corte el cual obtuvo un valor máximo en función a una succión dada la cual fue disminuyendo posteriormente.

Lo que nos indica que la expresión mantiene efectividad en ciertos tipos de suelos y en categorías de succiones altas y proporciona alteraciones cuando se dan valores de succiones bajas relativos a estados de saturación o seco, esto demuestra que no se encuentra resuelto del todo la determinación de la resistencia al corte en suelos semisaturados.

2.3 ZONAS COLAPSABLES DE LA CIUDAD DE CUENCA

2.3.1 Reseña histórica de fenómenos.

La vulnerabilidad que muestra la ciudad de Cuenca generada por problemas de amenaza de índole natural por las formaciones encontradas en la zona, genera fenómenos de inestabilidad de los terrenos a lo que se suma la actividad humana que aumenta el peligro de colapsabilidad de estos suelos ya que el desacato por parte de la ciudadanía de las ordenanzas municipales ocupando suelos donde no se tiene la seguridad para construir sumado la falta de un profesional que este encargado de estos proyectos provoca un desorden urbano que se mantiene en desarrollo (GAD Municipal, Cuenca. 2016). La limitada organización ante estos fenómenos desencadenantes de posibles desastres ha originado investigaciones por parte de proyectos de cooperación internacional, Universidades y del mismo Municipio de la ciudad de Cuenca para estudiar las zonas con problemas de inestabilidad los cuales adjuntan revisiones de índole histórica en cuanto a

macro deslizamientos ocurridos dentro y alrededores a la ciudad presentados de manera cronológica ascendente:

- La Josefina (1993)
- El de Paccha (1993)
- Santa María del Vergel (1996)
- Turi Gapal (1998)
- El Guzho (1999)
- El del cerro Bazhúm (2000)

Lo que se traduce en cuantiosos daños en infraestructura vial y sanitaria que han afectado dentro del cantón de Cuenca a 12 parroquias con un total mayor de 26 barrios, teniendo que generar reparaciones a 457 viviendas y el colapso 252 de ellas. (GAD Municipal, Cuenca. 2016).

2.3.2 Selección de zonas problemáticas de suelos colapsables.

2.3.2.1 *Caracterización geológica regional.*

Formaciones del Terciario

**Formación Loyola (ML).* Se encuentra damnificado por las deformaciones a causa de fallas, observando importantes manifestaciones de esta formación en el tramo medio entre el Descanso y Cuenca sector Challuabamba, constituido por lutitas, limolitas que al modificarse generan arcillas por la meteorización y areniscas limosas aglomerados por cementantes calcáreo, calizas y yeso en superficies alteradas, tiene una alta presión de poros por su baja permeabilidad en zonas mal drenadas con un potencial expansivo media-alta al igual que la susceptibilidad de inestabilidad por su resistencia baja al corte en condiciones de saturación teniendo alto riesgo en colapsabilidad. (Vélez Dávila, P. E. 2012).

Formación Azogues (MAz). Se encuentra afectada por deformaciones post sedimentarias de fallas, en la parte posterior de la entrada a Jadan autopista Cuenca-Azogues se puede ver grandes cortes de areniscas de esta formación, también compuesta por capas de lutitas y limolitas intercaladas por escasos conglomerados, tiene una permeabilidad media-alta con una resistencia al corte que se ve disminuido en situaciones de humedecimiento del suelo con un potencial expansivo alto por lo que la susceptibilidad de inestabilidad va de moderada a baja. (Vélez Dávila, P. E. 2012).

Formación Biblián. (MB). Al igual que la Formación Azogues esta se encuentra afectada por deformaciones y fallas post sedimentarias compuestas por variaciones de argilitas (roca sedimentaria arcillosa) alternadas, limolitas rojizas unida entre estratos por areniscas tobáceas de grano fino a grueso y constituido por cantos mal sorteados, su baja o nula permeabilidad genera condiciones dificultosas de drenaje disminuyendo su resistencia al corte, su alta plasticidad da potencial expansivo de medio a alto. (Vélez Dávila, P. E. 2012)

Formación Mangán. (MM). Una de las formaciones más jóvenes de la cuenca sedimentaria de la ciudad, estas se pueden ver desde el Sur de Pacchamama y hacia el Norte, pasando por Déleg, hasta el noroeste de Biblián, compuesta por limolitas, lutitas y areniscas con niveles freáticos muy poco profundos, su alta susceptibilidad de inestabilidad del suelo se genera por bajas resistencia del esfuerzo al corte que presenta en condiciones saturación. (Vélez Dávila, P. E. 2012)

Formación Llaqueo. (Mrt). Forman una extensa meseta al oeste de la cuenca de Cuenca que establece el Cerro El Tablón ubicado en la parroquia de Llaqueo observando surgimientos de esta formación al este del poblado principalmente, constituido por flujos piroclásticos de roca y cenizas compuesta de tobas y tobas andesitas resultado de actividades volcánicas durante el Eoceno - Oligoceno inferior. (Garzón, M. A. 2018)

Formaciones del Cuaternario

Depósitos aluviales - Fluvio Glaciares (Qal). Depósitos relacionados con materiales que fueron transportados por ríos y depositados en llanuras que han sido previamente inundadas, formados por gravas y arenas limosas con alta permeabilidad, su composición difiere en porcentajes y formas dependientes de la morfología del curso del río normalmente subangulares aptos para proyectos constructivos y alta estabilidad en taludes de pendientes bajas (cortes hasta 25m casi vertical y 29° pendientes naturales) en depósitos antiguos que suelen estar compactados y encontrando inestabilidad por erosión por escorrentía en depósitos recientes. (GAD Municipal, Cuenca. 2016)

Depósitos coluviales (QC). El material que conforma este tipo de depósito no ha tolerado mayor transporte y se ubica terrenos montañosos como laderas y en pies de talud (notables en Gapal, Turi y Paccha) con una alta permeabilidad en suelos friccionantes e impermeables en suelos cohesivos, se encuentra formado por materiales principalmente diversos dependiendo del sitio de donde se localice o por el origen dependiendo de la causa de inestabilidad, compuestos por limo-arcillosos predominantemente, fracciones de rocas reducidas desde gravas finas hasta 10 cm y clastos sedimentarios de forma angulosa. Al igual que los depósitos aluviales dependiendo de su antigüedad y compactación serán propicios para la construcción. (GAD Municipal, Cuenca. 2016)

Terraza aluvial (QT). Estas terrazas recubren áreas prolongadas de planicies en diversas disposiciones y niveles a los bordes de la extensión del río Tomebamba, compuesto por los depósitos de origen aluvial entre capas de conglomerado de areno-arcillosa como matriz. (Ortiz Ulloa, F. A., & Pauta Suárez, B. R. 2016).

Depósitos Lacustres (QP). La deducción del origen de estos depósitos corresponde a la formación de lagunas de tamaño reducido a los cuales se les ha denominado como lagunares identificados en la zona de estudio a través de imágenes fotográficas (fotointerpretación) para su reconocimiento, generados por inestabilidades del terreno alterando su estado y

colocándolo en un nivel bajo donde el almacenamiento de agua se facilita al igual que este ambiente que se forma (GAD Municipal, Cuenca. 2016).

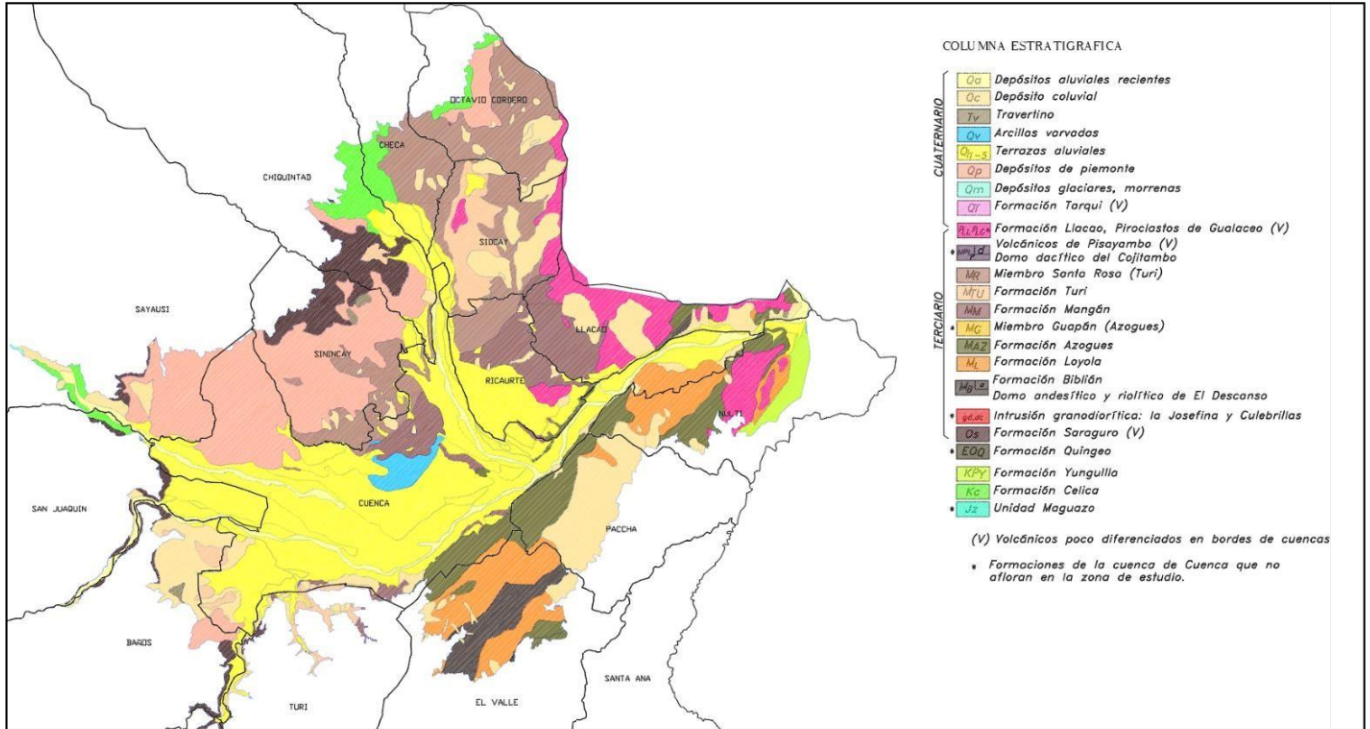


Ilustración 3. Estratigrafía de las formaciones de la cuenca de Cuenca. Generada por el Autor.

2.3.2.2 Caracterización Geotécnica del suelo.

Existen zonas dentro y alrededor de la ciudad de Cuenca donde se ha tomado especial énfasis por la susceptibilidad que tienen los suelos con problemas de estabilidad, tomadas en base a estudios e investigaciones diversas como el libro de recopilación de estudios geológicos del Ingeniero Marco Tulio Erazo, simultáneamente sustentados por mapas geológicos generados por Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), geo portales de zonas colapsables de la alcaldía de la ciudad de Cuenca, por el Instituto Geográfico Militar (IGM), etc., con el fin de seleccionarlos para caracterizarlos mediante diferentes método y por medio de ensayos comprobar la gravedad y las posibles soluciones que efectivicen la

seguridad y firmeza del terreno. Dentro de estas zonas se puede recopilar las siguientes (Idrovo Angumba, B. S. 2019; Bravo Heredia, P. B., Daza Orellana P. A. 2019):

- *Gapal (Cuenca-Sur)*. Clasificada como una arcilla de baja plasticidad.
- *El Valle*. Clasificada como una arena arcillosa.
- *Challuabamba (Llacao)*. Clasificada como una arcilla de alta plasticidad.
- *Sidcay*. Clasificada como una arena arcillosa.
- *Miraflores (Cuenca-Norte)*. Clasificada como una arcilla de alta plasticidad.
- *Baños*. Clasificada como una arcilla de alta plasticidad con arena

Aunque los datos obtenidos de los ensayos para la clasificación del suelo dependan de la zona de estudio y varíen por la localización de la toma de muestra, lo que se desea enfatizar es el factor común que muestra en la ciudad de Cuenca donde la mayoría de ellos se encuentran conformados por arcillas dando como resultado posibles problemas de expansión del suelo.

Se debe destacar también la prudencia al manejar información dentro de la cartografía obtenida de zonas de inestabilidad ya que, por ejemplo, las zonas señaladas por lo general están registradas en función a documentación histórica de movimientos o estructuras que se han visto afectada siendo esta una información continua que demanda un gran esfuerzo para ser actualizado constantemente caso que no siempre es ejecutado por parte del personal encargado, es decir, que las zonas que no se encuentran señaladas no significan que se las consideren como estables por lo que se deberá evaluar los parámetros físicos para identificar realmente la susceptibilidad de inestabilidad del suelo.

**CAPÍTULO TERCERO: CLASIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS
DEL ASENTAMIENTO DE SUELOS**

3.1 CONCEPTO Y DESARROLLO DE PATOLOGÍAS EN SUELOS EXPANSIBLES

Como se evidencio en el capítulo anterior, se tiene una relación existente del origen de los suelos de la ciudad de Cuenca vinculada con la presencia de partículas arcillosas que representan un riesgo de inestabilidad por su disposición a la expansión.

Aunque la Municipalidad de la ciudad mantenga zonas determinadas por problemas de inestabilidad no se tiene estudios que delimiten una clasificación dentro de la misma sobre los suelos expansivos existentes, esto representa un peligro latente por el desarrollo urbano en donde se ocupan cada vez más suelos sin un antecedente en su conducta realizando construcciones sin ninguna previsión al hinchamiento y las repercusiones que esto puede generar, por lo que se torna indispensable disponer de metodologías de identificación y caracterización para la implementación de soluciones frente a la problemática de este tipo de materiales. (Idrovo Angumba, B. S. 2019).

3.1.1 Procesos de expansión del suelo

El proceso del cambio volumétrico está sujeto a minerales arcillosos y a las variaciones de agua que puede presentar la masa del suelo que los contiene, vinculado estrechamente al ambiente se observa incrementos de volumen en estaciones lluviosas y disminución en épocas de sequía, esto se ve afectado especialmente por la intervención del hombre por trabajos previos a una construcción como el movimiento de tierras donde se retira la capa vegetal (afecta la permeabilidad del suelo) para reemplazarla con material granular (anula control natural de humedad) dejando al terreno en situaciones críticas que eleva la infiltración en las estaciones lluviosas y la evaporación en épocas de sequía. Estas alteraciones del estado natural del terreno generan cambios en sus esfuerzos los cuales mantienen estable la estructura interna del terreno, excavaciones pueden dar como resultado

la distensión de los esfuerzos intergranulares provocando en cualquier tipo de suelo una expansión y en arcillas la probabilidad e hinchamiento aumenta por su contenido alto de humedad y la disminución en su cohesión. (Ulloa Cortes, J.C. 2007; Torres Gracia, J. D. J. 2005).

3.1.1.1 Tipo y origen

Es muy importante que los ingenieros puedan conocer e identificar la conformación y los procesos de modificación de las rocas solidas hacia los diferentes suelos existentes, siendo estos bases de las obras en los que se va a trabajar, los cuales son regidos por propiedades físicas y geomecánicas acorde a las partículas que lo constituyen (Sánchez, C. J. 2020).

De acuerdo a su origen, las rocas se clasifican en tres grandes grupos (Braja M. Das 2015):

- *Ígneas*. Formadas a partir del enfriamiento y solidificación del magma.
- *Sedimentarias*. Generada por compactación de sedimentos depositado en estratos.
- *Metamórficas*. Resultado por acción de altas temperaturas y presiones de rocas ígneas o sedimentarias preexistentes.

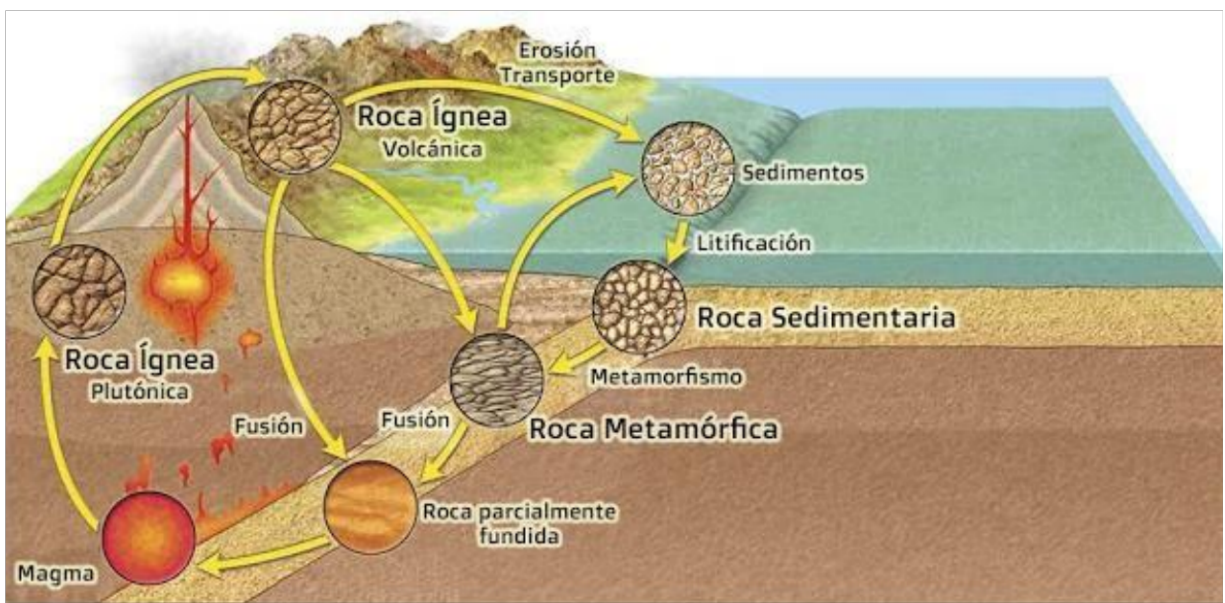


Ilustración 4. Ciclo del origen de las rocas. Fuente: (Arance, I. R., & Rosales, M. R. 2015).

Para poder comprender de mejor manera los materiales que atraviesan por procesos metamórficos que dan como resultado a suelos expansivos, se ha catalogó en dos agrupaciones formadas a partir de esas transformaciones (Donaldson, G. W. 1969):

El primer grupo. Este engloba a las rocas ígneas básicas, como los basaltos y los gabros los cuales pasan por una solidificación por enfriamiento (cristalización) siendo este un proceso que conforma *minerales primarios*, se describe a continuación a través de N. L. Bowen (Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. 2014):

- *Cristalización discontinua.* El magma de clase basalto primario son separados en desiguales niveles de fundición de los minerales.
- *Cristalización continua.* El cambio gradual descendente de las altas temperaturas da como repuesta una estructura continua con una estabilización fisicoquímica de porcentaje de composición rica en Calcio (Ca) hacia un extremo compuesto por Sodio (Na).



Ilustración 5. Orden de cristalización. Fuente: (Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. 2014).

Se puede ver al final de la ilustración que existen minerales aislados de las series, esto se debe a que estos *minerales estables* no responden a las altas temperaturas y presiones si no que se cristalizan en estados atmosféricos sobre la corteza terrestre. El Piroxeno al igual que

el Feldespato son descompuestos en minerales secundarios dando como resultado a las montmorillonitas presentes en los suelos expansivos.

El segundo grupo. Este abarca aquellas rocas moldeadas en la superficie como las sedimentarias las cuales son transformadas a través alteraciones, al igual que la perturbación de diferentes tipos de minerales que conforman *minerales secundarios* o también llamados deutéricos formando arcillas, existen dos principales formas de desintegración (Pedro G. 1968):

- *La alteración química*, la estructura del mineral experimenta modificaciones en su composición química.
- *La alteración física*, son modificaciones continuas de segregación de rocas sedimentarias clásticas que generan disminución sucesiva en su tamaño. Una de las alteraciones más destacada es generada por los cambios climáticos en el cual Pedro G. (1968) caracterizo principalmente cuatro tipos a escala mundial:
 - “La queluviación (o podsolización), alteración bioquímica de los climas fríos”.
 - “La bisialitización de los climas templados”.
 - “Monosialitización de los climas tropicales de humedad media”.
 - “La alitización de los climas ecuatoriales muy húmedos”.

Clima	Vegetación	Tipo de alteración	Tipo de arcilla
Clima húmedo/ frío	Resinosas y Ericáceas	Alteración biológica (neoformación nula)	Montmorillonita Alofana
Clima templado	Pradera Bosque frondoso	Alteración biológica Alteración climática (neoformación débil)	Illita
Clima continental Clima mediterráneo	Estepa Bosque seco	Alteración biológica Neoformación media Bisialitización	Illita+ montmor. Montmor. + illita
Clima tropical	Bosque tropical	Alteración biológica Neoformación fuerte monosialitización	Caolinita (+ illita)
Clima ecuatorial húmedo	Bosque denso umbrófilo	Alteración biológica Neo formación débil alitización	Gibbsita (+caolinita)

Tabla 5. Evolución Edáfica. Fuente:(Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. 2014).

El comportamiento de los suelos arcillosos está vinculado con las características de los minerales prevalentes que contienen, el grupo de las Esmectitas (montmorillonita, nontronita y saponitas) son las más representativas en proporcionar la característica de expansión vinculados con la absorción de agua, otra agrupación de minerales, pero con menos capacidad de absorción serán las caolinitas e illitas y aun menos las serpentinas o las pirofilitas. (Vélez Dávila, P. E. 2012). Normalmente se ha enfocado en tres tipos de minerales en consecuencia a su predominante existencia en relación a otros tipos, por los que se les ha tomado como base en las investigaciones de este fenómeno:

- **Montmorillonita.**

Los suelos que tienen prevalencia de este tipo de mineral se les puede identificar por su color marrón, azulado, amarillo, gris blanquecino o rosa siendo este menos habitual, requieren indispensablemente un ambiente alcalino el cual es formado en zonas tropicales con periodos marcados de humedad (siquiera una al año) con deficiencias en su drenaje, generado a través de un proceso sedimentario y alteraciones hidrotermales que modifica a los feldespatos, tobas y vidrio volcánico, este tipo de suelos son abundantes en zonas de terrenos deprimidos o valles (Cadena Nogales, A.C. 2014).

- **Caolinitas.**

La caolinita presentan un color blanco amarillento, rojiza, gris verdosa o parduzca, se puede distinguir por la mancha tizosa que puede dejar al manipularla, al tacto se siente terroso y su pulverización se realiza con facilidad, los suelos con alta presencia de este mineral son producidos con una manifestación disminuida en sus cantiones, bajo pH y caracterizado por su buen drenaje, su proceso de origen se encuentra vinculado con yacimientos primarios formados “in situ” sin presencia de transporte del material (Vergara Rebaza, B. L. 2017):

- *Caolines residuales*. Formados a través de disgregación de agentes atmosféricos de rocas meteorizadas químicamente de otras sedimentarias ígneas de zonas tropicales y subtropicales
- *Caolines hidrotermales*. Generados a través de la meteorización del agua (hidrolisis de silicatos y feldespatos) de rocas metamórficas e ígneas acidas

Los yacimientos secundarios están formados por la meteorización de otras rocas caoliníticas como los:

- *Caolines sedimentarios*. Siendo este el grupo de procedencia de la caolinita más abundante formado a través de la erosión con presencia de otros materiales transportados por distintos medios de precipitación en las cuencas sedimentarias.

- **Illitas.**

Este mineral es un compuesto primordial de abundantes pizarras de ahí sus tonalidades gris blanquecino o plateado blanquecino, formada a través de la descomposición por agentes físicos de la moscovita, cuarzo, feldespatos en caolinitas y gneis, generado en medio de zonas ambientales con altas temperaturas y precipitaciones elevadas, las illitas comúnmente dependen de pH levemente alcalino y se las puede hallar habitualmente en rocas metamórficas y arcillas sedimentarias. El reconocimiento apropiado para este se basa en un estudio de difracción de rayos X justificado por su disminuido tamaño (Díaz, A. & Ramírez, J. 2009)

Aunque las caolinitas e illitas en su gran mayoría no representan gran peligro por la falta de absorción del agua de acuerdo a la conformación de su estructura, puede ocasionar cambios de volumen siempre y cuando las partículas sean menores a 0.1 μm (micra). (Torres García, J. D. J. 2005).

3.1.1.2 Estructura de las arcillas

La comprobación de la disposición de las arcillas se ha dado mediante Rayos “X” viendo una predisposición de su composición mediante varios tipos de minerales con estructuras cristalinas reticulares conformado por iones, átomos y moléculas que mantienen una disposición geométrica tridimensional. De acorde a su estructura se puede realizar una división de las mismas, esto con el fin de poder conceptualizar el fenómeno a las que estas partículas experimentan en la absorción de agua.

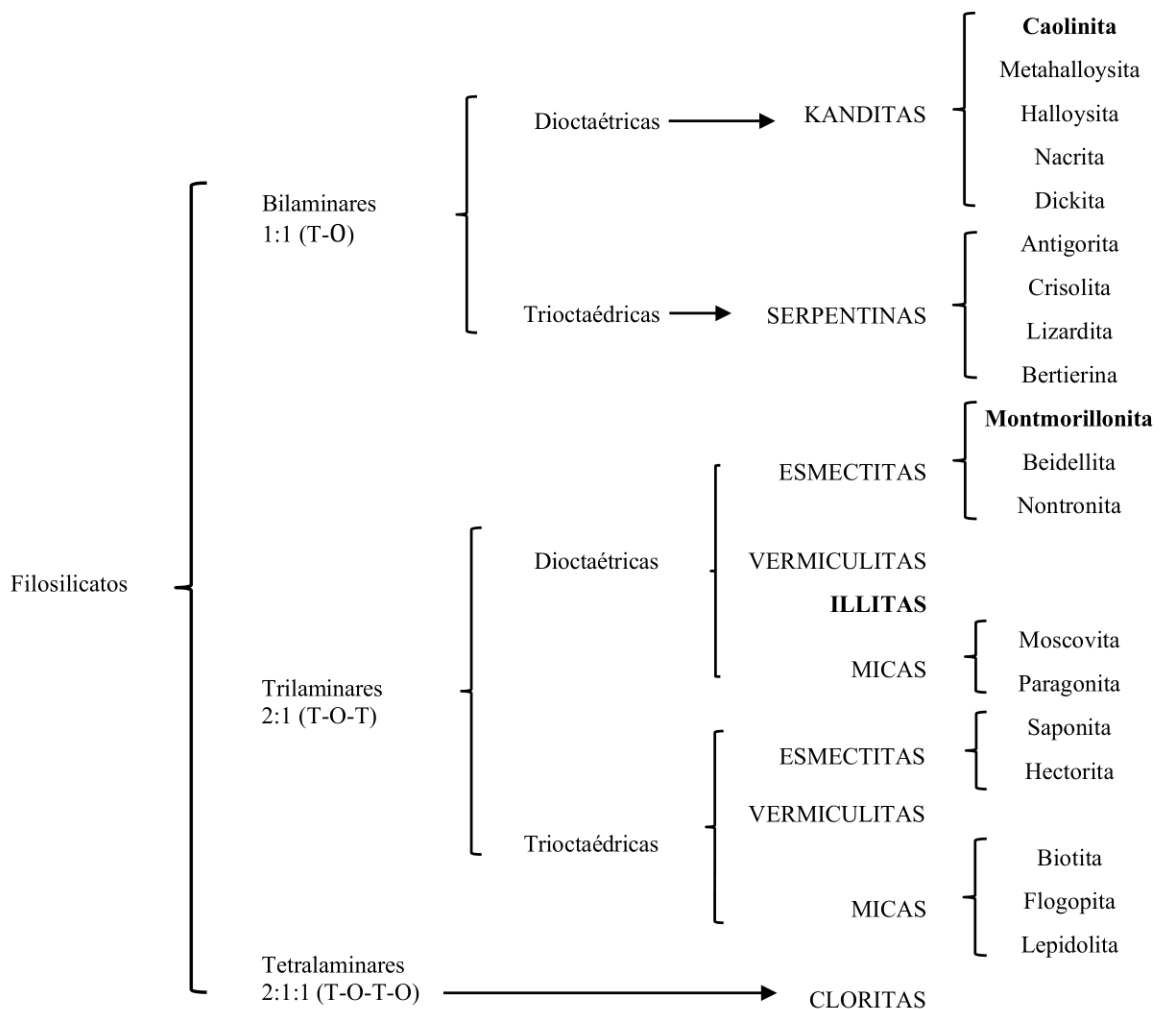


Ilustración 6. Esquema de agrupamiento de los principales minerales de arcilla. Tetraedros (T) y Octaedros (O). Fuente: (Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. 2014).

La composición de los minerales se encuentra fundamentado por unidades estructurales moleculares. “El tetraedro de sílice se compone por cuatro átomos de oxígeno que envuelven

a un átomo de silicio, donde una combinación de estos tetraedros forma una *lámina de sílice* y el octaedro de alúmina se forma por seis átomos de oxígeno o iones de hidroxilos que envuelven un átomo de aluminio, la agrupación de estos octaédricos forma una *lámina de gibbsita*. Cuando las láminas octaédricas se unen a otras tetraédricas se denominada Bilaminares 1:1 (T-O) y una unión similar sucede por medio de tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T-O-T” (Díaz, R. A. G., & Gómez, M. M. 2007).

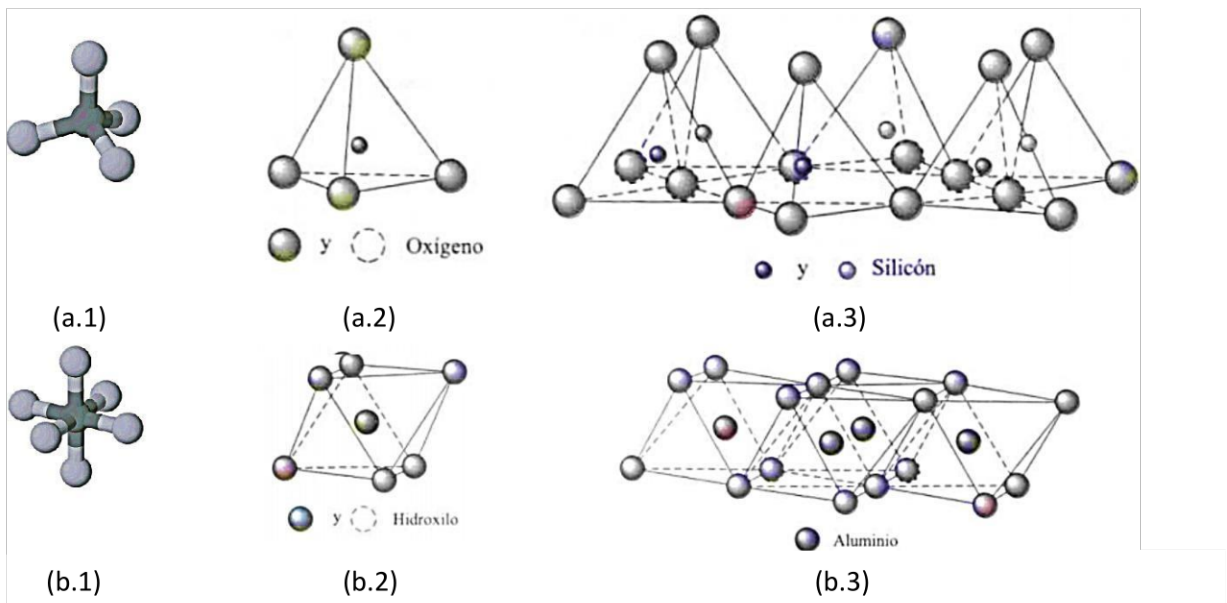


Ilustración 7. Geometría del Modelo Molecular. a. Tetraedro de sílice b. Octaedro de alúmina 1. Modelo de barras y esfera 2. Modelo Geométrico 3. Lamina de combinación de unidades. Fuente: (Díaz & Gómez. 2007).

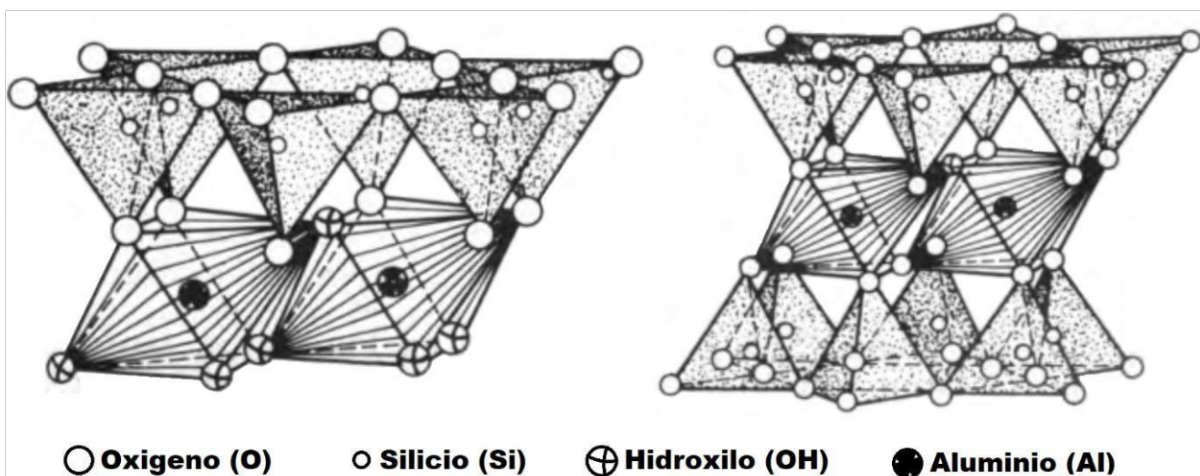


Ilustración 8. Estructura Atómica de los minerales arcillosos Bilaminares y Trilaminares. Fuente: (Fassbender, H. W., & Bornemisza, E. 1987).

Las unidades de estructura básica pueden ser modificadas por su *capacidad de intercambio catiónico*, por ejemplo, los átomos de silicio de una unidad tetraédrica pueden ser reemplazado a menudo por hierro o también por aluminio, de igual manera el átomo de aluminio del octaedro en ocasiones puede ser suplantado por magnesio, pero en este caso esta sustitución generaría una agrupación llamada *lámina de brucita*.

Montmorillonita. La estructura de la montmorillonita se encuentra generada por tres laminas, dos de ellas de sílice y una de gibbsita central, esta capa trilaminar se va repitiendo unidas entre ellas por enlaces de iones compartidos con la capacidad de cambio de cantiones y absorción de moléculas de agua, generando la característica primordial de este mineral que provoca la expansión de suelos arcillosos (Silva, 2012).

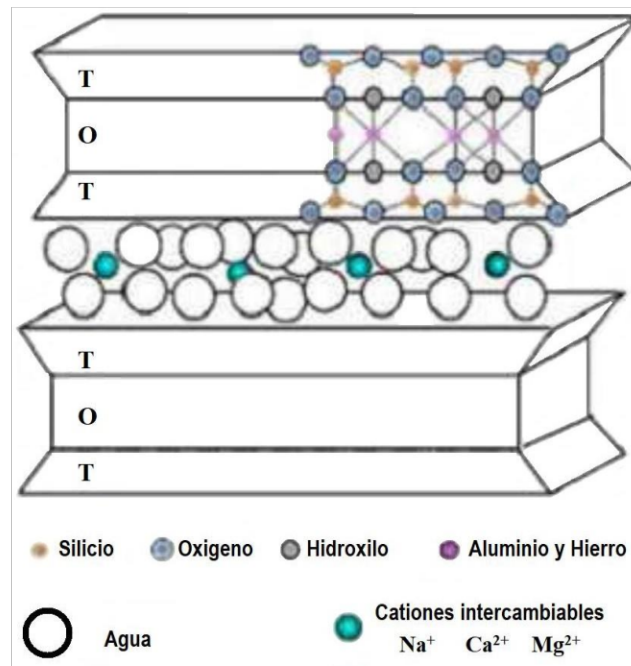


Ilustración 9. Estructura de la Montmorillonita. Fuente: (Cadena Nogales, A. C. 2014).

Caolinitas. Esta ocurre como formación de placas donde las láminas elementales de sílice y de gibbsita se unen formando una estructura que se repite, manteniéndose adheridas mediante enlaces hidrogenados, en estudio difractorios de Rayos “X” se ha evidenciado

ensanchamiento de este mineral producto del alejamiento entre sus espacios vacíos en las láminas de gibbsita ya que solo dos de cada tres octaedros son constituidos por iones de aluminio (Díaz, R. A. G., & Gómez, M. M. 2007).

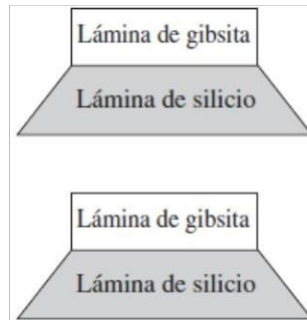


Ilustración 10. Estructura de la Caolinita. Fuente: (Braja M. Das. 2015).

Illitas. Su estructura es muy parecida a la de la Montmorillonita componiéndose de una lámina de gibbsita central enlazada a dos láminas de sílice extremas, en la formación de esta estructura en cada cuatro tetraedros uno es tomado por aluminio y el resto por silicio, la diferencia con la montmorillonita es el enlace entre estas capas dado por iones de potasio proporcionando mayor repelencia a los átomos de agua por lo que su expansividad disminuye (Díaz, R. A. G., & Gómez, M. M. 2007).

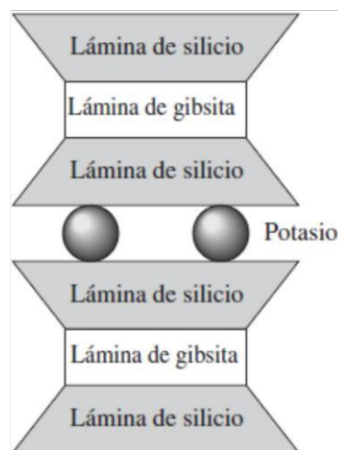


Ilustración 11. Estructura de la Illita. Fuente: (Braja M. Das. 2015).

3.1.1.3 Propiedades que afectan el comportamiento volumétrico

Comportamiento fisicoquímico. Se tocó el tema sobre la formación de las arcillas en base a descomposiciones de otros minerales poco estables los cuales se cristalizan, estos forman una estructura de gran superficie y pequeño espesor lo que ubica a las cargas positivas (catión) en los contornos de la lámina de la arcilla y las cargas negativas (anión) en las caras de las mismas, mientras su tamaño aumente y su forma cambie (esférica o prismática) la superficie expuesta y las cargas eléctricas disminuirán. (de Santiago Buey, C. 2012).

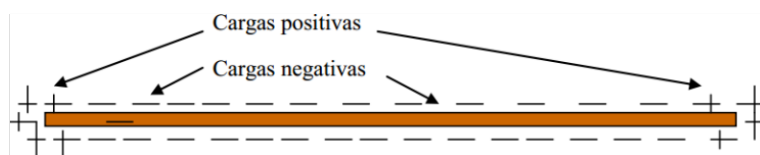


Ilustración 12. Distribución de cargas eléctricas. Fuente: (de Santiago Buey, C. 2012).

Superficie Específica (SE). Las laminas formadas por las uniones entre capas octaédricas y tetraédricas generan una amplia superficie, esta se encuentra definida como el área que compone la superficie expuesta de todas las partículas por unidad de masa, es decir, que conforma un gramo de material seco (m^2/g), por lo que se deduce de manera análoga que la superficie específica aumenta de modo considerable cuando el tamaño de la partícula va disminuyendo. Esta superficie específica está relacionada directamente con las cargas eléctricas de la partícula de la arcilla ya que aumenta en relación a la misma al igual que la capacidad de intercambio catiónico (Díaz, R. A. G., & Gómez, M. M. 2007).

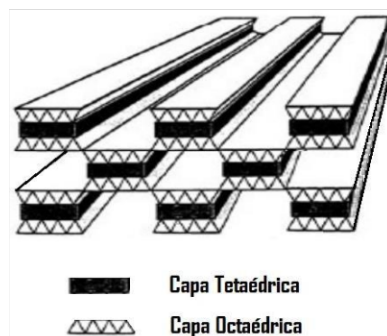


Ilustración 13. Formación de capas laminares en la arcilla. Fuente: (Díaz & Gómez. 2007).

Fenómeno de Adsorción y Absorción. La capa de agua que rodea a la partícula se denomina agua adsorbida, siendo este un proceso químico en el cual la superficie de la partícula retiene a átomos, moléculas e iones, se encuentra estrechamente vinculada con las deformaciones irreversibles que experimenta el suelo a lo cual se le denominada *plasticidad*, en cambio el agua que contiene las arcillas por procesos físicos como la retención por capilaridad es el agua absorbida utilizada en la medición del grado de humedad del suelo.

Capacidad de intercambio de iones. Los iones son átomos o grupo de ellos con cargas netas (+ o -) que pueden ser transformados en *cación* (+) al perder electrones o en *anión* (-) cuando los gana, estos son sustituidos de forma sencilla, pero tiene mayor estudios y relevancia el cambio catiónico (*Capacidad de Intercambio Catiónico* CIC) llevado a cabo por partículas cuya afinidad sea predominante. El intercambio se genera en las caras de las láminas, dentro de las estructuras o entre los espacios interlaminares por otras encontradas en las soluciones acuosas que interactúen con la arcilla, entonces se define como “la suma de todos los cationes de cambio que un mineral que puede adsorber a un determinado pH, y es equivalente a la medida del total de las cargas negativas del mineral, expresada en términos de miligramos equivalentes por 100 gramos de suelo (mg/100g)” (Barbeta, G. 2000; Díaz & Gómez. 2007).

Arcillas	CIC (mg/100g)	SE (m ² /g)
Montmorillonita	80 – 200	80-900
Caolinita	2 – 5	15
Illita	10 – 50	50

Tabla 6. Relación entre superficie específica y cambio catiónico de distintas arcillas. Fuente: (Braja M. Das 2015).

Capa doble difusa. A medida que se aleja de la superficie mineral de la arcilla se encuentra establecido una frontera diferencial donde interactuaran dos zonas, generando el balance de

cationes y aniones que mantiene un equilibrio, en la *Ilustración 16* se puede ver una zona de la *capa absorbida* donde el agua se comporta de naturaleza química (responde a procesos de adsorción) y una zona de *agua libre* donde esta responde a fenómenos físicos tipo gravitacional (proceso de absorción). (Mitchell & Soga, 2005).

Atracción de otros elementos. La solución que interactúa con los minerales arcillosos contiene átomos y moléculas que pueden ser atraídas producto de los contactos entre cargas eléctricas opuestas, es así que una molécula de agua que actúa como dipolo (cargas eléctricas opuestas a sus extremos) es atraída adhiriéndose fuertemente a la arcilla producto de la carga negativa en su superficie y por los cationes presentes en la capa doble difusa. (Díaz & Gómez. 2007).

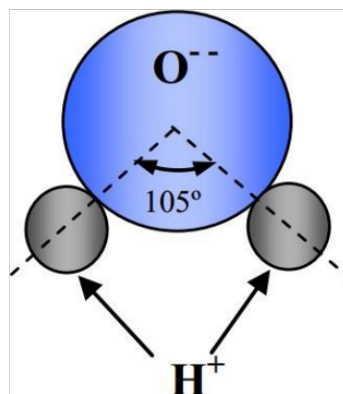


Ilustración 14. Disposición de la molécula de agua. (de Santiago Buey, C. 2012).

“La vinculación de otros elementos a estas caras negativas de las arcillas se da en base a la capacidad de intercambio catiónico a las que pueden atraerse como por ejemplo, un átomo de sodio que pierde un electrón se transforma en catión de sodio (Na^+) generando una adherencia débil al cristal del suelo, otras uniones más firmes vienen dado por iones bivalentes de Calcio (Ca^{++}) y Magnesio (Mg^{++}), y de mayor firmeza los cationes trivalente de Hierro (Fe^{+++}) y Aluminio (Al^{+++}) que se unen fuertemente a la arcilla” (de Santiago Buey, C. 2012).

3.1.1.4 Mecanismo de expansión

Estos se encuentran enlazado directamente con las propiedades microestructurales de las cargas eléctricas generadas en las arcillas las cuales Delgado (1986) ha resumido en tres fenómenos que están vinculados entre sí y su diferenciación es compleja mientras sucede el proceso de expansión de estos suelos (Bucio, M. B., & Anguas, P. G. 2002):

- “*Hidratación de las partículas de arcilla.*” Las cargas eléctricas de las partículas de arcilla pueden atraer moléculas de agua que, por su carácter bipolar, se disponen con su extremo positivo orientado hacia ellas. El extremo negativo dispuesto hacia el exterior puede atraer a su vez otras moléculas de agua formándose en su caso varias capas sucesivas. Estas fuerzas de adsorción de agua van disminuyendo al alejarse de la superficie de la partícula. Pueden existir también cationes que compensan las cargas netas negativas formándose sistemas partícula–agua–cationes–agua–partícula en los que los cationes contribuyen a la atracción entre las partículas. Esta capa adsorbida de moléculas de agua “hidrata” a la partícula de arcilla provocando un aumento de su volumen y consecuentemente su expansión”.

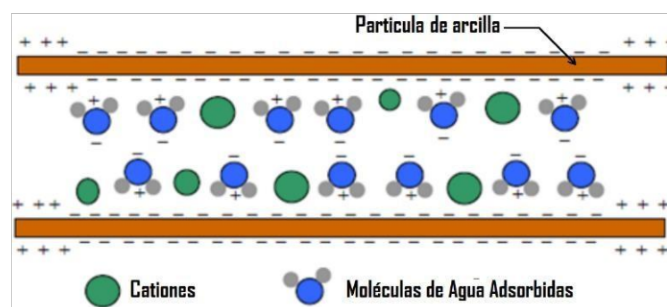


Ilustración 15. Distribución de iones y moléculas. Fuente: (de Santiago Buey, C. 2012).

- “*Hidratación de cationes.*” El mecanismo de hidratación se puede producir también en los cationes de la capa doble difusa atraídos por las partículas arcillosas. En este caso las moléculas de agua pueden disponerse, en una o más capas, alrededor de los

cationes, orientándose hacia ellos con su extremo negativo y atrayendo en su caso con su extremo positivo otras moléculas de agua. Como en el punto anterior estos cationes “hidratados” producen un aumento de volumen del suelo”.

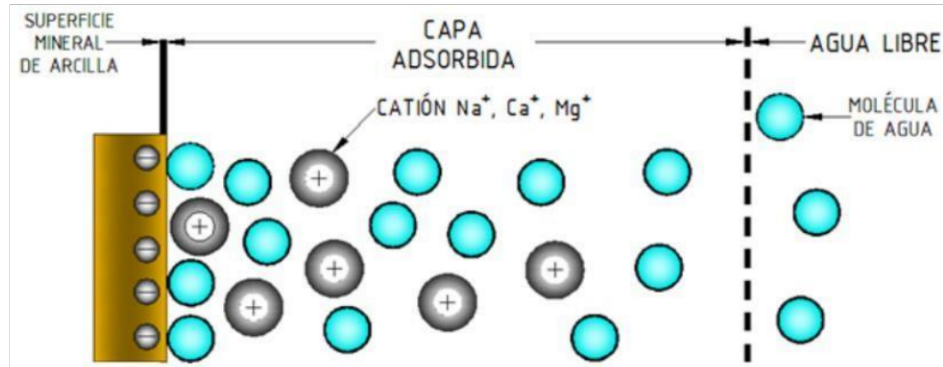


Ilustración 16. Distribución y concentración de iones. Fuente: (Leoni, A. J. 2005).

- “Repulsión osmótica. “La concentración en la capa doble difusa, decreciente al alejarse de la partícula arcillosa, puede provocar una absorción de moléculas de agua por ósmosis si se pone en contacto con agua pura o con agua con menor concentración de cationes. El fenómeno de ósmosis produce una migración de las moléculas de agua hacia el interior de la capa doble para igualar las concentraciones de cationes, con el consiguiente hinchamiento asociado”.

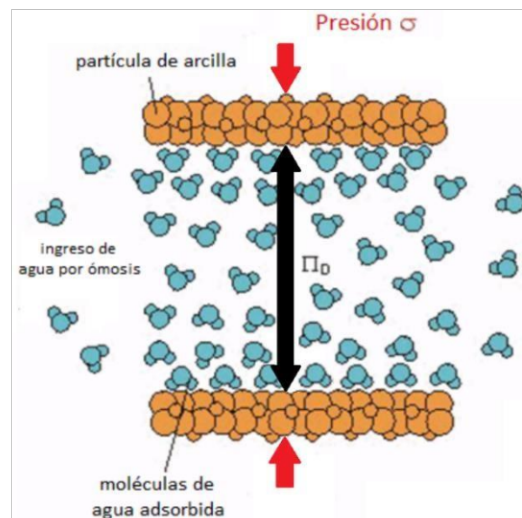


Ilustración 17. Absorción de agua por ósmosis. Fuente: (de Santiago Buey, C. 2012).

3.1.2 Métodos y medidas de identificación de suelos expansivos

Se ha tratado de identificar a los suelos expansivos ya que esta información es necesaria para los diseños de cimentación en una construcción que deben mantener firmes soportes sin que se den problemas relacionado con el volumen del suelo, esto se ha realizado a través de propiedades que los correlacionen al igual que ensayos en laboratorios que muestren valores indicativos del fenómeno. (Cabrera, J. 2015; Idrovo Angumba, B. S. 2019).

3.1.2.1 *Identificación mineralógica.*

Estos tipos de propiedades son halladas a través del empleo de mecanismos donde su utilización y análisis vienen abarcado por diferentes ramas las cuales deben estar ejecutadas por los profesionales de dichas materias generando una complejidad al Ingeniero, es por ello que la utilización de los diferentes ensayos que se describirán a continuación de manera superficial son usado en investigaciones científicas y no para verificar la idoneidad de materiales para proyectos constructivos atribuido al costo y manejo que conlleva este tipo de equipamiento especializado (Leoni, A. J. 2005; Vélez Dávila P.E. 2012).

Difracción por rayos X. La finalidad de este es la determinación de un material de manera indirecta mediante información obtenida de su estructura, caracterizada por la facilidad de la técnica de utilización y la elaboración de muestras, este ensayo se realiza mediante un rayo incidente que golpea la superficie cristalina en un ángulo θ generando un fenómeno que produce la desviación de estos rayos (difracción) al golpear sobre esta sin existir una pérdida de energía con base en estudios de procesos de dispersión coherente, estas señales son percibidas por detectores electrónicos de radiación obteniendo registros gráficos de dichas señales (Cadena Nogales, A. C. 2014). “Los minerales que determina este método que va a ser útil para su caracterización son: caolinita, illita, sericita, esmectita, clorita,

cuarzo, alunita, feldespatos, calcita, dolomita, goethita, hematita, siderita, pirita, yeso, hornblenda” (Vergara Rebaza, B. L. 2017).

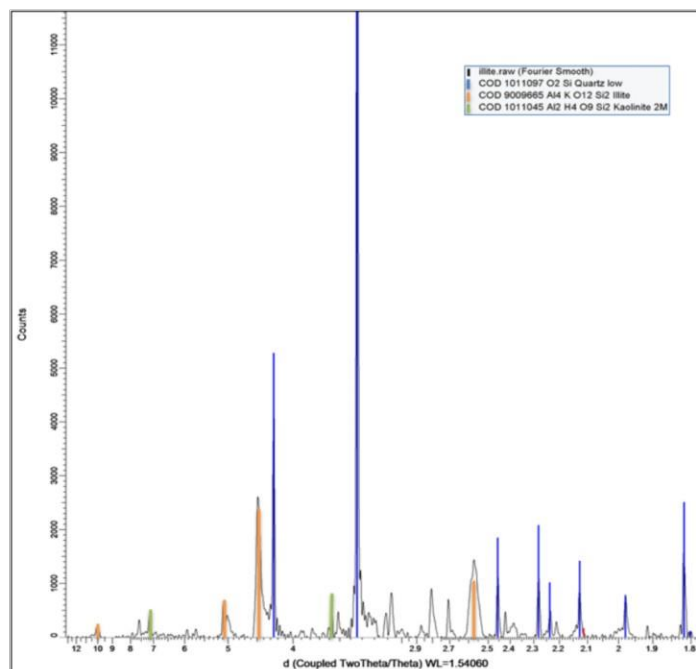


Ilustración 18. Referencia de un Difractograma de Illita en ensayo DRX. Fuente: (Ramírez Bustamante, J. A. 2019).

Análisis térmico diferencial. Utilizado como estudio cualitativo y cuantitativo para la determinación de cambios fisicoquímicos en los procesos térmicos soportados por la muestra mediante reacciones endotérmicas inducidas a alta temperatura para la deshidratación y desoxidrilación (pérdida del agua adsorbida) de la misma para la obtención de un termograma, se debe tener en cuenta condiciones de calibración adecuada en los equipos utilizados al momento del ensayo. (Zalba, P. E. 1978).

Análisis químicos. “Se realiza en base a la Norma *UNE-EN 933-9* Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo del azul de metileno. Demostrada mediante las reacciones químicas activadas por el exceso de carga eléctrica negativa en las partículas de la arcilla y la capacidad de intercambio iónico

irreversible que tienen lugar entre el catión de la arcilla y los cationes de la solución acuosa del azul de metileno que se desprenden durante su descomposición en agua azul de metileno, fundamentándose en la cantidad de adición en pequeñas dosis de esta solución hasta que el catión ha sido reemplazado en la doble capa difusa y ha cubierto toda la superficie mineral de la arcilla” (Jiménez Chappotin, R., & Crespo Castillo, R. 2013).

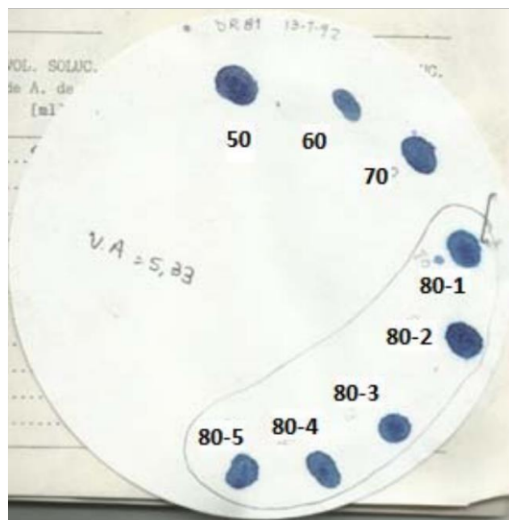


Ilustración 19. Ensayo de solución acuosa del azul de metileno. Fuente: (Jiménez & Crespo 2013).

Análisis por microscopio electrónico. “Determina con gran precisión la forma y tamaño de las partículas minerales que componen la fracción de arcilla y hasta qué grado se reduce el tamaño de estas partículas cuando son sometidas a tratamientos mecánicos. La utilización de esta técnica se ha enfocado en estudiar la morfología de los cristales de arcillas, el tamaño de las partículas y en especial para corroborar algunos estudios por difracción de Rayos X” (Zalba, P. E. 1978).

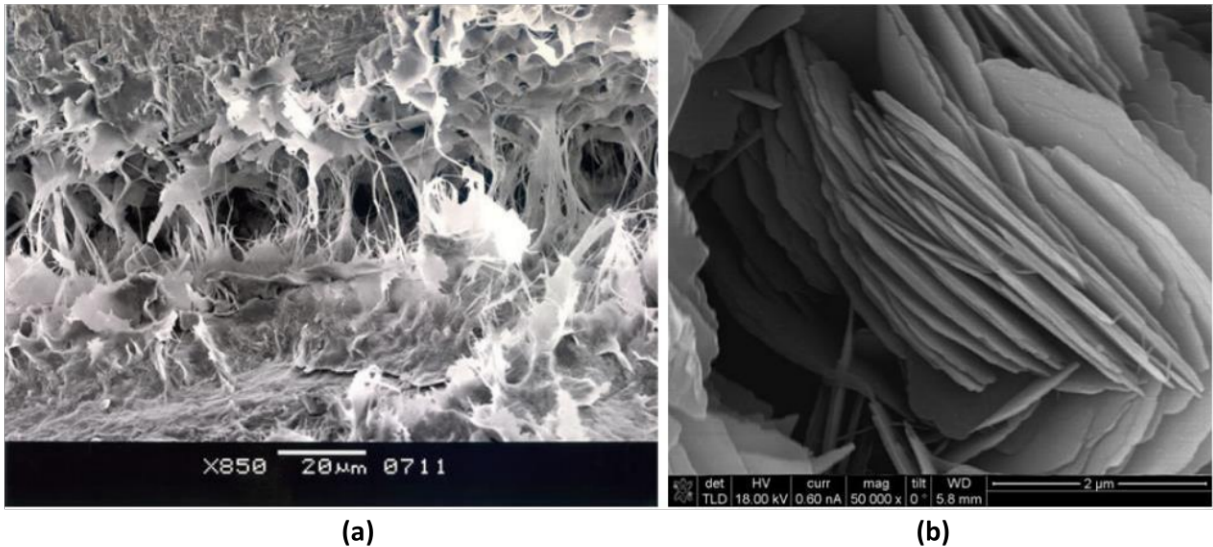


Ilustración 20. Imagen microscópica suelos arcillosos a. Illita b. Montmorillonita. Fuente: (Dra. Angelone, S. 2018).

3.1.2.2 *Determinación de propiedades básicas de los suelos expansivos.*

Los ensayos detallados a continuación dan un grado del potencial de expansión que puede contener el suelo estudiado, es decir, muestran datos cualitativos y no cuantitativos, con la cualidad que se encuentra basado en propiedades básicas que se generan a través de métodos sencillos por medio de equipos disponibles en cualquier laboratorio.

Límite líquido y límite plástico. Estos límites son parte del método desarrollado por Albert Mauritz Atteberg en 1900 para cuantificar la consistencia de los granos finos que componen un suelo, derivado de la *plasticidad* generada por el agua adsorbida de las partículas siendo este una propiedad de la arcilla a través del cual se evidencia la capacidad de moldear al material elevando su humedad sin desmoronarse ni sufrir agrietamiento.

- *Limite Liquido (Li).* Este ensayo se realiza en base a la normativa ecuatoriana mediante la NTE INEN 0691 Determinación del límite líquido, siendo esta una traducción de la Norma ASTM D 4318 y la AASHTO T 90 (Método de Casagrande)

- *Limite Plástico (Lp)*. Este ensayo se realiza en base a la normativa ecuatoriana mediante la NTE INEN 0692 Determinación del límite plástico, siendo esta una traducción de la Norma ASTM D 4318 y la AASHTO T 89 (Método de Casagrande)

Límite de contracción (SL). “Es la frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido, definido como el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando. El potencial de expansión es indirectamente proporcional a la contracción lineal. Existen varios autores que han sugerido valores de límite líquido y contracción lineal mediante tablas como una guía para la determinación del potencial de expansión” (Torres García, J. D. J. 2005). Se utiliza la norma ASTM D427 Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method.

<i>Grupo Mineral</i>	Límites de Atterberg		
	Li %	Lp %	SL %
<i>Montmorillonita</i>	30-100	25-40	25-29
<i>Caolinita</i>	60-120	35-60	15-17
<i>Illita</i>	100-900	50-100	8.5-15

Tabla 7. Límites de Atterberg principales minerales de arcillas. Fuente: (Nelson y Miller, 1992).

Contenido de coloides (partículas menores a 2 µm). En la Ingeniería el término coloide es utilizado para identificar aquellas partículas que se encuentran regidas por fenómenos de naturaleza electroquímica y no por fuerzas gravitacionales, se ha visto en los diferentes ensayos la relación del potencial de expansión se eleva a medida que la cantidad de arcilla es mayormente localizada en un suelo, es decir, generalmente aquellas partículas menores a 0.002mm determinada por los siguientes ensayos:

- *Granulometría.* Este ensayo se realiza en base a la normativa ecuatoriana NTE INEN 0696 Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, finos y gruesos, siendo esta una traducción de la norma ASTM C136 y la AASHTO T 27.
- *Hidrómetro.* Se utiliza en este ensayo la norma ASTM D422 Standard Test Method for Particle - Size Analysis of Soils la cual coincide con la norma AASHTO T 88.

Skempton, A. W. (1953, Ec. 3) determino un parámetro basado en la relación con los límites de Atterberg y el contenido de coloides tomando el nombre de *Actividad* (Ac) siendo esta la que caracteriza el potencial de expansión, Seed (1964, Ec. 4) genera una variación la cual es descrita en la Tabla 8.

$$Ac = \frac{\text{Indice de plasticidad}}{\% \text{ de material fino} < 2\mu\text{m}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Ac = \frac{IP}{(\% < 2\mu\text{m}) - 10} \quad \text{Ecuación 4}$$

Actividad en arcillas		Clasificación Valores Típicos	
Potencial de expansión	Ac	Mineral	Ac
Activa Mayor	> 1.25	Montmorillonita (Ca - Na)	1.5 - 7.2
Activa	0.75 – 1.25	Caolinita	0.33 - 0.46
Inactiva	< 0.75	Illita	0.9

Tabla 8. Resumen de la actividad según el mineral y el potencial expansivo. Generado por el Autor.

Expansión libre del suelo. “Este ensayo consiste en colocar en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo “seco” y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la expansión libre” (Patrone, J., & Prefumo, J. E. 2005). La muestra para el ensayo es tallada para ubicarla en el consolidómetro mediante la utilización de la norma ASTM 4829 Standard Test Method for Expansion Index of Soils.

3.1.2.3 *Medidas directas de la expansión del suelo.*

Estos métodos se basan en la reproducción de agentes y circunstancias destacadas para la simulación de los ensayos a realizar fundamentado en pruebas edométricas o en técnicas de medida y control de la succión, generando semejanza en los fenómenos que experimentaría el suelo en el campo (in situ) para obtener parámetros el *Potencial de Hinchamiento*.

- Presión de hinchamiento
- Hinchamiento libre
- Forma de simular las condiciones de campo en el edómetro.
- Tamaño y forma de la muestra.
- Valor de la humedad inicial del ensayo.
- Magnitud de la precarga y secuencias de cargas.
- Momento de saturación.
- Mecanismos para medir el hinchamiento.
- Número de muestras que intervienen en el ensayo.

Estos ensayos se realizarán sometiendo a condiciones de carga variable mientras las muestras son saturadas, obteniendo una gráfica de estas variaciones de aumento de volumen (Dra. Angelone, S. 2018):

Presión de hinchamiento. “Mide el potencial de hinchamiento que experimenta una muestra parcialmente saturada por hidratación, bajo una sobrecarga de 1 KPa, a la cual sólo se le permite la expansión vertical ya que se le ha proporcionado un confinamiento previo (el confinamiento impide deformaciones horizontales)”. Es utilizado en este ensayo la norma ASTM D4546 Expansión Libre-Retomado de ensayo de Presión de hinchamiento.

Hinchamiento Libre. “Se añaden cargas para no permitir el hinchamiento de la muestra. La presión máxima aplicada, se conoce como presión de hinchamiento. Una vez alcanzada,

se van quitando cargas y se miden los hinchamientos que se producen”. Se utiliza la norma ASTM D4546 Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro.

3.1.2.4 *Ensayos de Campo*

Se tiene diferentes ensayos que se lo realiza *in-situ* los cuales son recomendados para poder evaluar la expansibilidad de un suelo, se generando una caracterización de ellos a continuación:

Medidas de la succión del suelo. Dada la importancia en la Ingeniería sobre la succión matricial y total del suelo, se ha estudiado y utilizado métodos que garanticen la confiabilidad de los resultados sobre la medición en suelos semisaturados de su presión de poros negativa para pronosticar el potencial de su expansión y contracción al existir variación de humedad en el terreno (Ochoa, V. E. M. 2012):

- *Psicrómetros.* “Es un método indirecto utilizado para medir la succión total mediante la humedad relativa de la fase de aire, se basa en el equilibrio de la fase líquida de la muestra de suelo con el vapor de agua que hay encima de la muestra, existe dos equipos: el psicrómetro termopar teniendo un rango de entre 300 - 7000 kPa y el psicrómetro con la técnica de espejo enfriado limita la medición en un rango de 1 - 5 MPa”.
- *Tensiómetros* “Es un método directo para determinar la succión matricial mediante la medición directa de la presión negativa del agua a través placas o discos cerámicos con microporos de tamaños y distribución relativamente uniforme, cuando son saturados con agua, se desarrolla una tensión superficial dentro de los poros del material que actúan como una membrana que separa las dos fases (aire y agua)

permitiendo que exista una diferencia de presión medible, el rango de medición de succión máxima es de 90 kPa”.

- *Métodos de papel de filtro.* “Es otro método indirecto que determina la succión a partir del contenido de agua que tiene el papel filtro, cuando se alcanza la humedad de equilibrio con el suelo al que se le requiere medir la succión. Este procedimiento se encuentra estandarizado y descrito en detalle en la norma ASTM D 5298-10 y es el único método que permite determinar la succión total y la succión matricial”

Resistencia a la penetración. Entre los ensayos in situ son los más utilizados para el reconocimiento e identificación del comportamiento del suelo (forma indirecta) y en este caso de deformabilidad que es el parámetro de interés, no se tiene una amplia comprensión de estos ensayos y se pueda encontrar una gran variedad de estos cada uno con propiedades específicas, el fundamento teórico está basado en relacionar la transmisión de energía de una maza hacia una barra o varilla para generar una longitud de penetración específica en el terreno (Ibáñez, S. J. 2009) .Se describirá la más utilizada por su facilidad y costo en el medio:

- *Ensayo de penetración estándar SPT (Standard Penetration Test).* Se encuentra dentro de los ensayos de penetración dinámica la cual para su correcta aplicación e interpretación se utiliza la normativa ecuatoriana NTE INEN 689 Ensayos de penetración estándar, siendo esta una traducción de la Norma AASHTO T206-74 y la Norma ASTM D1586-84.

Medidas de humedad y densidad in situ. (Flores Cano, J. M. 2014).

- *Cono y Arena.* “Este ensayo se utiliza para la determinación de la densidad del suelo *in situ*. Este ensayo es aplicable para suelos que no contengan una cantidad apreciable de rocas o grava con un tamaño de partícula mayor a 1 ½ in. Es importante

tomar en cuenta que el material donde se va a realizar el ensayo tenga una cohesión suficiente para que los lados del hueco se mantengan estables al momento de realizar el ensayo. No es recomendado realizarlo en suelos orgánicos, saturados o con una plasticidad alta ya que se puede comprimir o deformar durante la excavación y tampoco en suelos granulares no compactados debido a que al momento de realizar el hoyo no van a ser capaces de mantener estables las paredes del agujero”. Se lo realiza por medio de la Norma ASTM D1556, Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil by Sand-Cone Method. West Conshohoken

- *Densímetro Nuclear.* “El método más utilizado para el uso del densímetro nuclear es el de Transmisión Directa en donde la sonda que es la fuente de rayos gamma se extiende desde la base del equipo a través de un hueco previamente realizado a una profundidad deseada (no más de 300mm). Para calcular los valores de la densidad en masa por unidad de volumen, el equipo compara la velocidad a la que viajaron los rayos gamma con datos previamente establecidos durante la calibración, el equipo también está calibrado para leer la cantidad de agua en masa por unidad de volumen y al dividir este valor para la densidad del agua y multiplicándola por 100 se obtiene un equivalente al contenido de agua volumétrico. Es importante recalcar que al ser un equipo que contiene fuentes radioactivas de neutrones y rayos gamma emite una radiación que es perjudicial para la salud”. Se lo realiza por medio de la Norma ASTM D6938, Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil-Aggregate by Nuclear Methods. West Conshohocken
- *Densímetro Eléctrico.* “Al igual que el método anterior este permite determinar las propiedades *in situ* del contenido de agua y la compactación relativa de suelos no congelados, suelos totalmente consolidados y no consolidados, así como también en mezclas de agregados. Los valores son obtenidos después de correlacionarlos con

una serie de datos empíricos usando un aparato que mide los cambios electromagnéticos del suelo para determinar sus propiedades electromagnéticas a una frecuencia específica con la que se compara con un modelo empírico con el cual se calibró el equipo para la determinación del contenido de agua y la densidad”. Se lo realiza por medio de la Norma ASTM D7830 / D7830M, Standard Test Method for In. Place Density (Unit Weight) and Water Content of Soil Using an Electromagnetic Soil Density Gauge.

Existen otros ensayos que se pueden realizar y dependerá de las consideraciones con las que el Ingeniero trabaje dependiente del proyecto a ser estudiado:

- Monitoreo de levantamientos y asentamientos superficiales y subsuperficiales
- Monitoreo del nivel freático
- Ensayos con presurímetro y dilatómetro
- Métodos geofísicos

3.2 VALORACIÓN Y PERFILES DE EXPANSIVIDAD

3.2.1 Evaluación del grado de expansividad.

El reconocimiento se realizará a través de métodos comparativos que relacionaran variables que tratan de manera global el problema de expansión del suelo, es decir, generaran de manera indirecta valores que nos muestran la tendencia de un suelo arcilloso a generar daños. Se simplificará la clasificación de estos a través de un resumen de las diferentes correlaciones por medio de una tabla:

CORRELACIONES DE CARACTERÍSTICAS DE EXPANSIBILIDAD				
3.2.1.1 PREDOMINACIÓN DE UN TIPO DE MINERAL				
Método	Definición	Ecuación	Figura	
Skempton (1953)	Relaciona los límites de Atterberg con la capacidad de absorción de agua del suelo definiendo la magnitud como Actividad (<i>Ac</i>). Muestra una variación lineal entre el <i>Lp</i> y % de arcilla, mientras mayor sea este índice la probabilidad del suelo de expandirse se elevará.	Ecuación 3	Anexo 1. Relación <i>Ac</i> (Actividad) y el mineral predominante del suelo.	
Seed, Woodward, and Lundgren (1964)	Tiene una relación similar al de Skempton con una diferencia en su variación lineal ya que no siempre pasa por el origen, si su porcentaje de arcilla >40% cumple la expresión de Skempton y si es <40% se tomará la expresión propuesta por Seed	Ecuación 4	Anexo 2. Actividad de una arcilla	
Marín Nieto (1991)	Este método se basa a través del gradiente mineral donde se muestra diferentes grupos de minerales de arcillas, se grafica en las abscisas el valor de <i>x</i> y en las ordenadas el índice de plasticidad. La carta de plasticidad de Casagrande (<i>LL</i>) está representada en escala logarítmica por la línea "A"	<p>IP: Índice de Plasticidad</p> $x = \frac{Li}{IP}$ $IP = Li - Lp$ $LL = 0.73 (IP - 20)$	Anexo 3. Gradiente mineral	
3.2.1.2 CALIFICACIÓN CUALITATIVA (Grado de expansividad)				
Método	Definición	Tabla	Figura	
Holtz y Gibbs	1954	Califica la expansividad en función del <i>IP</i>	Anexo 6. Método de Holtz y Gibbs, en función del <i>IP</i>	-
	1954	Califica la expansividad en función del <i>SL</i>	Anexo 7. Método de Holtz y Gibbs, en función del <i>SL</i>	-
	1956	Califica la expansividad en función de distintas variables	Anexo 8. Clasificación de suelos expansivos basado en el % coloides, <i>IP</i> y <i>SL</i>	-

Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973)	Realizan una clasificación similar a la anterior incorporando un nuevo parámetro del Li	Anexo 9. Método Holtz, Dakshanamurthy y Raman. Grado de expansión.	-
Seed et al. (1962)	La clasificación del grado de expansividad se hace por medio de una gráfica en función de Ac y % coloides	-	Anexo 4. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas
Ortiz (1975)	Correlaciones usadas para generar una clasificación que depende del grado de expansividad y ciertas propiedades del suelo	Anexo 10. Criterios de expansividad.	-
González de Vallejo (2002)		Anexo 11. Relación de parámetros geotécnicos y grado de expansividad	-
Chen (1988)		Anexo 12. Grado de expansividad.	-
3.2.1.3 CALIFICACIÓN CUANTITATIVA (Porcentaje y presión de expansión)			
Método	Definición	Ecuación	
Komormk y David. (1969)	Generado mediante la comparación 200 resultados estadísticos medidos en ensayos del consolidómetro para poder predecir la presión de hinchamiento	$\log(P_s) = 2.132 + 0.0208Li + 0.000665\rho_d - 0.0269m$ <p style="text-align: center;"><i>Ecuación 5</i></p> P_s : Presión de expansión (kg/cm^2) Li : Limite Liquido (%) ρ_d : Peso específico seco (kg/m^3) ω : Humedad (%)	
Nayak y Christensen (1970)	El cálculo de % de expansión se encuentra dado en función IP , % de coloides y humedad natural	$S_P = (0.0229) * (IP)^{1.45} * \frac{C}{m_{nat}} + 6.38$ <p style="text-align: center;"><i>Ecuación 6</i></p> $P_P = (0.035817) * (IP)^{1.12} * \frac{C^2}{m_{nat}^2} + 3.7912$ <p style="text-align: center;"><i>Ecuación 7</i></p> S_P : Expansión Libre (%) P_P : Presión de expansión posible (lb/pulg^2) C : Cantidad de coloides (%) ω_{nat} : Humedad natural (%)	
Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)	El cálculo de % de expansión se encuentra dado en función Li y ω de muestras inalteradas	$\log(S_P) = \frac{1}{12}(0.44 * Li - m_{nat} + 5.5)$ <p style="text-align: center;"><i>Ecuación 8</i></p>	
O'Neill y Ghazzaly (1977)	“Método aconsejado por el Manual EM 1100-1-1904 – Cap. 5 de la U.S. Army Corps of Engineers (1990)”	$S_P = 2.27 + 0.131 * Li * 0.27m_{nat}$ <p style="text-align: center;"><i>Ecuación 9</i></p>	

Gogoll (1970)	Toma en cuenta la presión a la que se encuentran sometido el suelo del terreno, utilizada para % expansión final utilizando el S_p de las expresiones anteriores	$S = S_p * [1 - 0.72\sqrt{\sigma_f}]$ <p style="text-align: center;"><i>Ecuación 10</i></p> <p>S: Expansión final (%) σ_f: Presión del suelo (kgf/cm²)</p>
---------------	--	--

Tabla 9. Métodos de estimación y evaluación de los grados de expansión de un suelo. Generado por el Autor.

Se intento realizar una recopilación de los parámetros que comparte cada una de las tablas para el grado de expansión, obteniendo una sola tabla donde el lector pueda guiarse de manera rápida y sencilla para clasificar el suelo estudiado de forma indirecta recurriendo a los resultados obtenidos de los ensayos realizados, esto se vio afectado por la gran diferencia que existe entre los rangos de un mismo parámetro perteneciente a las distintas tablas dependiendo del autor y el año de realización, por lo que se recomienda formar un desglose de cada uno de los métodos para poder compararlos y realizar un análisis de los resultados, generando así una evaluación extendida que pueda mostrar errores para finalmente generar una categorización de selección de datos más coherentes en base a la información arrojada de los ensayos y se ajuste a la zona donde se realiza el estudio, por lo cual se realizó una tabla resumen que muestra el procedimiento de correlación adecuada para la caracterización de suelos expansivos empezando desde la clasificación del suelo por su granulometría al igual que el mineral predominante de arcilla que contiene y los diferentes ensayos que se deben realizar para obtener las características físicas expansivas del suelo utilizados para seguidamente generar comparaciones con el grado de expansión, la presión expansiva y el porcentaje de expansión por los diferentes métodos expuestos en la Tabla 9.

Procedimiento.	Estudio.	Método.	Criterio.	Nota.	Recomendación.
Caracterización del suelo	Análisis Granulométrico	Cribado	ASTM D 422	-	-
		Hidrómetro	AASHTO T 88		
	Clasificación del Suelo	Sistema de clasificación AASHTO		Se busca una concordancia entre las clasificaciones en base a un predominio de los resultados.	Resumen de la clasificación Se aconseja la utilización del método SUCS por su subclasificación de plasticidad.
		Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)			
Mineral predominante	Skempton (1953) Seed, Woodward y Lundgren (1964) Marín Nieto (1991)	Tabla del Anexo 1 Tabla del Anexo 2 Tabla del Anexo 3	Existen gran discordancia entre los resultados de cada método.	Se debe optar por los datos que coincidan con los resultados de los límites de Atterberg.	
Realización de Ensayos	Expansividad	Límites de Atterberg	Lp: ASTM D4318 y T90 Li: ASTM D4318 y T89 SL: ASTM D427	IP<4% Indica predominio de limos.	-
		Expansión Libre	ASTM D 4829	Los resultados deben ser analizados para su eficiencia mediante la saturación y humedad tanto inicial como fina.	Se debe precautelar la humedad natural de las muestras al ser trasladadas.
		Expansión Controlada		Revisar la capacidad de absorción de agua de la muestra.	Utilización de varias muestras para el promedio de resultados.
		Expansión Libre en probeta		-	
		Aparato de Lambe	INV E 120-07	Obtener muestras con humedad próxima al Lp	
Empleo de Correlaciones	Grado de Expansividad	Holtz y Gibbs (1954-1956) Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973) Seed et al. (1962) Ortiz (1975) González de Vallejo (2002) Chen (1988)	Tabla Anexo 6 – 7 – 8 Tabla Anexo 9 Figura Anexo 4 Tabla Anexo 10 Tabla Anexo 11 Tabla Anexo 12	Se debe realizar un resumen de los datos obtenidos para presentar como resultado los valores q más se repiten.	El método de González de Vallejo (2002) ha mostrado una mejor adecuación en el entorno de la ciudad de Cuenca. (Anexo 11)
Cuantificación	Presión y Porcentaje de expansión	Komornik y David (1969) Nayak y Christensen (1979) Vijayvergiya y Ghazzaly (1973) O’Neill y Ghazzaly (1977) Gogoll (1970)	Ecuación 5 Ecuación 6 - 7 Ecuación 8 Ecuación 9 Ecuación 10	Ecuaciones generadas en base a varios estudios con diferentes muestras, por lo que se espera resultados aproximados a los obtenidos mediante ensayos.	Se debe tener en cuenta que puede existir incompatibilidad del método con el suelo estudiado hasta el punto de obtener resultados menores a cero (-) o una sobreestimación del mismo.

Tabla 10. Procedimiento de caracterización de los suelos expansivos. Generado por el Autor.

Idrovo B. S. (2019) en su estudio, categorizo los suelos expansivos en la ciudad de Cuenca por medio de varias muestras a través de correlaciones empíricas para determinar los minerales predominantes que lo componen, tomando como resultado, acorde a la metodología de Marín Nieto (1991) en función del sistema de clasificación SUCS (representando alta plasticidad en las montmorillonitas).

MUESTRA	MINERAL
	Método Marín Nieto
Gapal	Caolinita
Valle	Caolinita
Challuabamba	Montmorillonita
Sidcay	Caolinita
Miraflores	Montmorillonita

Tabla 11. Resumen de minerales de arcilla en la ciudad de Cuenca. Fuente: (Idrovo Angumba, B. S. 2019).

3.2.2 Cálculo de asentamientos.

Este fenómeno que puede presentarse en una construcción generalmente es experimentado en suelos arcillosos producido por las fluctuaciones de volumen debido a los cambios de humedad a los que están expuestos, en este caso, la cualidad de disminución drástica de agua que reduce el volumen del suelo es favorecida por el edificio teniendo como resultado que pisos soportados en estos suelos se asienten y en ocasiones las cimentaciones. Una estructura que se ha fijado sobre una arcilla normalmente consolidada eleva sus posibilidades de asentamientos excesivos por la carga de la estructura y la evacuación del agua de sus poros, el fenómeno se generara en un periodo relativo a su permeabilidad. Los daños ocasionados por las arcillas y otros problemas relacionados están vinculados a condiciones no previstas del comportamiento tanto del suelo como de la estructura, por lo que se muestra indispensable generar diseños acordes a una representación real de las situaciones que pueden presentarse durante el lapso de funcionamiento del edificio (Lizardi,

G. 1997). Existen mecanismos dentro del suelo vinculado con las arcillas que desencadenan asentamientos los cuales deben ser tomados en consideración y se describen a continuación (Whitlow, R. 1994):

Consolidación. Es un proceso por el cual los suelos saturados como arcillosos y limos normalmente consolidados experimenta una disminución del volumen en consecuencia de la expulsión del agua de sus poros a medida que la presión en estos aumenta por la carga.

Movimientos por cambios de humedad. Uno de los desencadenantes del cambio de humedad que disminuye la cantidad de agua ocasionando la contracción en suelos arcillosos es la disminución del nivel freático generado por el bombeo de agua en excavaciones de las zonas que lindera con el terreno ocasionando un asentamiento por dicho proceso.

Efectos de los cambios de temperatura. A veces no se da mayor interés a las condiciones que puede generar una estructura dependiente de sus instalaciones ya que calderas, estufas, hornos, calentadores, etc., en funcionamiento pueden generar desecaciones del suelo bajo la cimentación generando contracción y su posterior asentamiento.

La Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC) muestra mediante una tabla valores máximo de asentamiento que una edificación puede experimentar en función de la distancia entre sus apoyos (L):

Tipo de construcción	Δ_{max}
(a) Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	L/1000
(b) Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería	L/500
(c) Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores.	L/300
(d) Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores.	L/160

Tabla 12. Valores máximos de asentamientos diferenciales. Fuente: Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

Los métodos utilizados para la estimación de asentamientos están basados en la teoría de elasticidad con algunas modificaciones por lo que se las definen como empíricas, todo esto con el fin de simplificar las constantes restrictivas de las propiedades del material que se obtendrá mediante ensayos adecuados en el laboratorio. En los suelos arcillosos normalmente se considera tres fases del asentamiento (Hurtado, J. E. A. 1996):

Asentamiento Inicial (ρ_i): “El asentamiento inicial, es debido a deformación a volumen constante determinar el asentamiento de una carga puntual en la superficie de un semi espacio homogéneo, isotrópico y elástico.”

$$\rho_i = p * B * \frac{(1-\mu^2)}{E} * I \quad \text{Ecuación 11}$$

p: esfuerzo promedio transmitido

B: dimensión característica del área cargada

E: módulo de Young

I: factor de influencia

μ : 0.5, relación de Poisson

TIPO DE SUELO	$\mu (-)$
ARCILLA: SATURADA	0.4 – 0.5
NO SATURADA	0.1 – 0.3
ARENOSA LIMO	0.2 – 0.3
ARENA: DENSA	0.3 – 0.35
DE GRANO GRUESO	0.2 – 0.4
DE GRANO FINO	0.15
ROCA	0.25
LOESS	0.1 – 0.4
HIELO	0.1 – 0.3
CONCRETO	0.36
	0.15

TIPO DE SUELO	E_s (ton/m ²)
ARCILLA MUY BLANDA	30 - 300
BLANDA	200 - 400
MEDIA	450 - 900
DURA	700 - 2000
ARCILLA ARENOSA	3000 - 4250
SUELOS GLACIARES	1000 - 16000
LOESS	1500 - 6000
ARENA LIMOSA	500 - 2000
ARENA: SUELTA	1000 - 2500
DENSA	5000 - 10000
GRAVA ARENOSA: DENSA	8000 - 20000
SUELTA	5000 - 14 000
ARCILLA ESQUISTOSA	14000 - 140000
LIMOS	200 - 2000

Tabla 13. Rangos típicos de valores utilizados en el asentamiento inicial. Fuente: (Hurtado, J. E. A. 1996)

Asentamiento por consolidación (pc): “El asentamiento por consolidación ocurre al escapar la presión de poros del suelo y transferir la carga al esqueleto del suelo, se toman en cuenta varios casos a los cuales respondería este tipo de asentamiento como la consolidación unidimensional donde se utiliza la teoría de Terzagui, el asentamiento por consolidación final de un estrato de arcilla compuesto de n capas, cuando existe recompresión y compresión virgen y la expansión en caso de descarga. Particularmente en ciertas arcillas blandas la mayor incertidumbre en la evaluación del asentamiento final de consolidación proviene de la evaluación apropiada de la historia de esfuerzos del depósito de suelo”.

Consolidación secundaria (ps): “En la consolidación secundaria es la compresión que ocurre con un esfuerzo efectivo constante, después que se disipa la presión de poros asumiendo que no comienza sino hasta después que termina la consolidación primaria generando una relación lineal entre el asentamiento y el logaritmo del tiempo”.

3.3 MANIFESTACIÓN DE PATOLOGÍAS EN EDIFICACIONES

Como se expuso previamente, la característica principal de la arcilla es la expansión o retracción al tener contacto con el agua, originando presiones inadmisibles que la estructura es incapaz de soportar generando daños muy variados desde un aspecto arquitectónico como fisuras o grietas en la mampostería las cuales son subestimadas descartándolas con recubrimientos de empastados o acabados, pero en casos más severos pueden generar rupturas en losas como en la cimentación provocando posiblemente que la edificación se derrumbe parcial o totalmente, la gravedad de estos se establecerá por medio del potencial expansivo y las propiedades estructurales de la construcción, por lo que la investigación de control por medio de metodologías de prevención, origen y solución de esta problemática deberá ser contemporánea. (Patrone & Prefumo, 2005; Jones, 2012).

“La mayor parte del asentamiento inmediato se tiene durante la construcción, a medida que se imponen las cargas muerta y estructural; los daños posteriores se reducirán, por lo tanto, al mínimo si se demora la aplicación de los acabados hasta que actúe toda la carga muerta”. (Lizardi Búrquez, G. 1997).

3.3.1 Daños en la Estructura.

Las arcillas expansibles normalmente no tienen inconvenientes con la capacidad de carga, pero cuando los esfuerzos internos del suelo tienen una inestabilidad proporcional con las cargas a las que la estructura se encuentra sometida es muy habitual encontrar levantamientos en una edificación. Lo más recomendable es siempre mantener reconocimientos meticulosos de la estructura en búsqueda de alteraciones que representen daños como cambios de operatividad correcta de la misma entre ellos la declinación de puertas dificultando su cierre o ventanas obstruidas. (López-Lara, 2002).

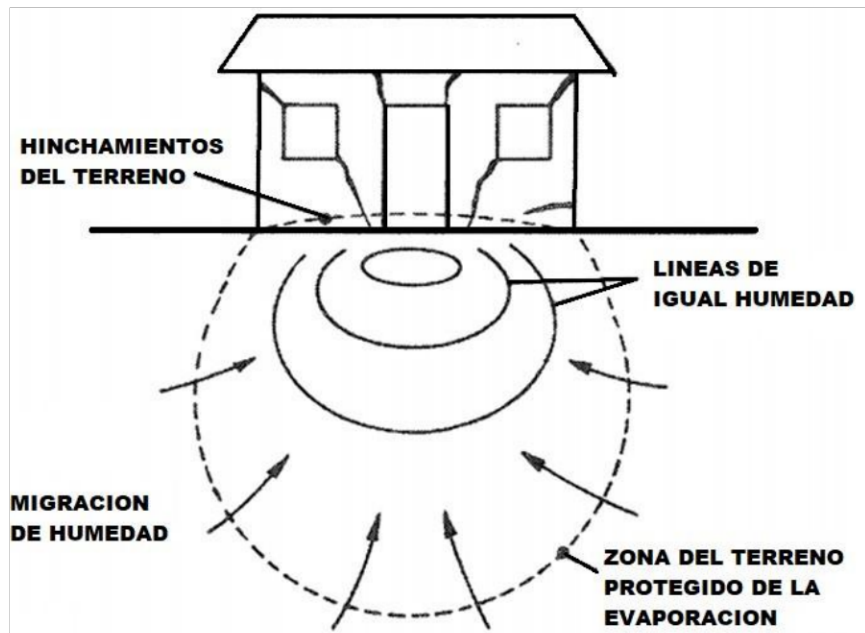


Ilustración 21. Fenómeno de expansión en suelos arcillosos y agrietamiento consecuente. Fuente: (Ortiz, Á. U. 1983).

Localización del Daño		Tipo del Daño
Global		Movimiento diferencial entre fachadas. Inclinaciones. Separaciones de zonas o bloques.
Losas		Bufamientos. Grietas en contacto con columnas y muros. Despegue y distorsión de aceras.
Superestructura	Muros de Carga	Grietas diagonales. Grietas verticales. Grietas horizontales.
	Estructura	Fisuración de cortante en nodos. Trabajo en ménsula con grietas. Horizontales o inclinadas.
	Albañilería	Grietas diagonales. Apertura de esquinas y uniones techo-muro. Descuadre de marcos de puertas y ventanas.
Cimentaciones	Superficial	Despegue de zapatas corridas de muros o terreno. Grietas horizontales por empuje. Grietas diagonales por asentamientos diferenciales.
	Losa	Grietas de flexión. Distorsiones.
Muros de sótano		Grietas de empuje.

Tabla 14. Tipos de daños por fluctuación de volumen del suelo. Fuente: (Trejo, 1989).

Los límites que estas edificaciones pueden admitir muchas de las veces son generadas por medio arbitrario y en otras totalmente omitidas, por lo que se hace necesario determinar criterios que establezcan dichos límites de acuerdo al desempeño (Lizardi, G. 1997):

- 1. Apariencia visual.** Genera sentimientos subjetivos de alarma al usuarios u observadores. Se notarán los desplomes $> 1/250$, desviaciones de la horizontal $> 1/100$ y relaciones de deflexión a claro $> 1/250$.
- 2. Daño visible.** Afecta la construcción y sus categorías serán subjetivas dependiendo del usuario y observador (Tabla 14).
- 3. Daños que afectan la integridad estructural o funcional.** Grietas permiten el ingreso de líquidos como agua obteniendo daños como desintegración, corrosión, moho, etc., la distorsión y movimientos máximos dependerá del uso y funcionalidad de la estructura o equipos instalados dentro del mismo como grúas, drenajes, etc.

Grado de daño	Descripción del daño típico	Anchura aproximada de la grieta (mm)
0. Despreciable	Cuartheaduras muy delgadas, de menos de 0.1 mm se clasifican como depreciables	< 0.1
1. Muy Ligero	Cuartheaduras finas que se pueden reparar con facilidad durante el aplanado normal. Quizás aislando ligeras fracturas de la construcción Grietas en entabacados externos visibles en una inspección cuidadosa	1 – 5
2. Ligero	Grietas que se rellenan con facilidad. Probablemente se requiera volver aplanar. Varias fracturas ligeras que muestran el interior de una construcción. Las son visibles desde el exterior y se pueden necesitar amarres externos para asegurar la hermeticidad contra el agua. Las puertas y ventanas se pueden atorar ligeramente,	>5
3. Moderado	Las grietas necesitan de algo de ensanchamiento y un albañil las puede parchar. Las grietas recurrentes se pueden enmascarar con recubrimientos adecuados. Se necesitan amarres en muros externos de ladrillo y posiblemente se necesite cambiar algo de esos muros. Las puertas y ventanas se traban. Los tubos de servicios se pueden romper y con frecuencia se pierde la hermeticidad al agua	5 – 15 o varias grietas ≥ 3
4. Severo	Se necesitan trabajos extensos de reparación que implican romper y cambiar secciones de muros, sobre puertas y ventanas. Los marcos de puertas y ventanas están torcidos, el piso tiene pendientes apreciables; los muros tienen desplome o abultamiento apreciable, algo de pérdida de carga en las vigas. Se rompen los tubos de servicio.	15 – 25, pero depende también del número de grietas
5. Muy severo	Se necesitan reparaciones mayores que implican construcción parcial o completa. Las vigas pierden sustentación; las paredes están muy inclinadas y necesitan apuntalarse, las ventanas rotas por la distorsión; peligro de inestabilidad.	En general >25, pero depende también del número de grietas

Tabla 15. Clasificación de los daños visibles a las paredes con enfoque en la facilidad de reparación. Fuente: (Burland, Broms & de Mello, 1978).

“El ancho de la grieta es solo un aspecto del daño y no debe usarse como medida directa de este. Cuando se califica la medida del daño se debe tomar en cuenta su ubicación en la construcción o la estructura”.

3.3.2 Identificación del problema relacionados.

Existen situaciones que alteran de manera negativa a las edificaciones haciendo que esta aumente su susceptibilidad a los daños aparte de las generadas por la expansibilidad del terreno donde se ha fijado la estructura. Se debe tener en cuenta que la cimentación esta prediseñada a base de la operatividad de la estructura para poder pronosticar las cargas a las cuales van a ser sometidas, generar adecuaciones en una edificación cambiando de alguna manera la disposición de la misma como una bodega, oficina, garaje, etc., anexar niveles de plantas en la vivienda, remover o trasladar pesos que se concentraba en muros, entre otros complementaran el problema afectando drásticamente el desempeño.

El ingeniero debe estar consciente que los fenómenos existentes en el suelo no son los únicos motivos de defectos estructurales y aunque la mayoría de grietas o desplazamientos de la edificación pueden obedecer al terreno no deben ser descartadas los errores de diferentes índoles como por ejemplo (Torres Gracia, J. D. J. 2005):

- “Muchas losas construidas sobre suelos expansivos se agrietan y levantan debido a un cálculo incorrecto del elemento de concreto”.
- “Se sabe que realizar un mal curado del concreto, junto con la carencia de cohesión en las juntas frías que pueden generar agrietamientos”.
- Gran parte de los agrietamientos en muros son generados por la presión del suelo ejercida sobre su superficie combinado con la presión por percolación.
- “Las casas son construidas generalmente con contratraves colocadas a diferentes niveles, si estos no son reforzados correctamente aparecerán grietas y movimientos”.
- “En ocasiones, las grietas de los muros son causadas por descuidos durante la construcción”.

- “La deficiente mano de obra o los movimientos del suelo mediante equipos, pueden causar grietas verticales y horizontales”.
- “A menudo se culpa a los suelos expansivos por el desplome de los muros, cuando en realidad es por un refuerzo deficiente”.

**CAPÍTULO CUARTO: DISCUSIÓN DE MEDIDAS
PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS**

4.1 MEDIDAS DE PREVENCIÓN

El Ingeniero debe estar preparado para actuar en presencia de un suelo potencialmente expansivo generando una reducción o eliminación de este fenómeno en el suelo, esto debido a las propiedades carentes del mismo necesarias para la consolidación de una estructura por lo que es necesario tratarlos mediante métodos que mejoren sus características mecánicas o físicas con el fin de obtener un terreno con firmeza apto para tolerar las cargas del proyecto comprobando condiciones idóneas en rangos apropiados.

4.1.1 Mejoramiento de suelos expansibles.

4.1.1.1 *Sustitución del suelo.*

Este método se fundamenta en descartar el suelo inadecuado mediante la excavación del mismo reemplazándolo por un material que no tenga propiedades expansivas garantizando sus características mecánicas para una adecuada cimentación, la remoción de este suelo expansivo puede llegar a ser total, pero generalmente el espesor del estrato expansivo del terreno mantiene profundidades altas donde la remoción total de este mantendrá precios inasequibles. Patrone, J., & Prefumo, J. E. (2005) señala que “la experiencia indica que si el suelo natural sobre el que se está apoyando nuestro cimiento consiste en más de 1.50 m de suelo granular del tipo Arena Arcillosa (SC) – Arena mal graduada (SP), que a su vez se apoya en un suelo altamente expansivo, no existe riesgo de movimiento, aunque no está claro si es debido a que el agua superficial no llega al material expansivo, o si existe un reacomodamiento del material granular que hace que los eventuales movimientos sean prácticamente inexistentes, o se debe a una combinación de ambos efectos”

En el caso de ser reemplazado el suelo por un relleno con material de mejor calidad lo expuestos previamente no resulta ser totalmente cierto, por lo que es necesario en este caso

poder determinar el tipo y la profundidad adecuada para el material de sustitución. El material de reemplazo debe tener una clasificación que vaya desde una Grava bien graduada (GW) hasta una Arena arcillosa (SC) con el inconveniente en su permeabilidad ya que puede dejar humedecer al suelo expansivo cuando este se encuentra en contacto directo con el mismo, por lo que es recomendable (Vélez Dávila, P. E. 2012):

- Uso del método sugerido por Federal Highway Administration para el material fino recomendable en el relleno para impedir la entrada de humedad al suelo expansivo.

Límite Líquido	% de material que pasa el tamiz # 200
Mayor a 50	15 - 30
Entre 30 a 50	10 - 40
Menor 30	5 - 50

Tabla 16. Recomendación Federal para el material de reemplazo. Fuente:

- Aislar el material sustituido para evitar el paso del agua mediante una lámina impermeable como geosintético.

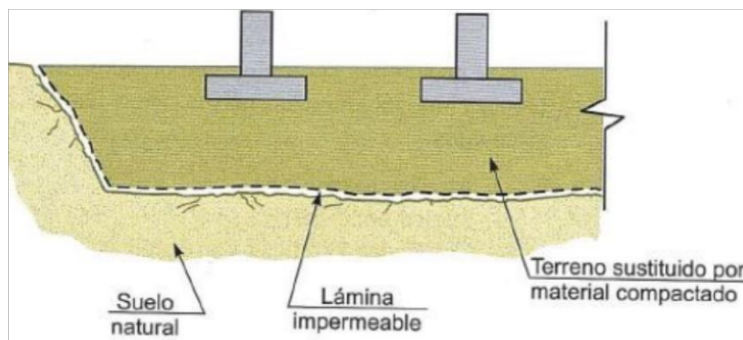


Ilustración 22. Conformación de la sustitución del material en suelos expansivos. Fuente: (Bravo Quiñones I., 2014).

Se debe tener en cuenta que el material de reemplazo deberá mantener limos o arcillas limosas que no sean expansivas con una profundidad de por lo menos 60cm, la humedad de compactación de este material no deberá ser menor al óptimo perteneciente al ensayo de Proctor modificado Norma (ASTM-D 1557 o AASHTO T 180) con una densidad seca máxima de entre 92 – 95%. A pesar de la tecnología que se mantiene actualmente este

método es la mejor opción para suelos expansivos, la asequibilidad del mismo en cuanto a su costo es viable (equipos y tiempo de remoción) comparándolos con métodos químicos u otros, siempre y cuando las profundidades de reemplazo no sean excesivas y se realice un drenaje superficial en el perímetro de la construcción, este método también es uno de los más seguros cuando se realiza una fundición directa a excepción de losas flotantes (Vélez Dávila, P. E. 2012)

4.1.1.2 Prehumedecimiento y control de humedad del suelo

Como se ha visto en el transcurso de definir a los suelos expansivos la variación del contenido de agua es la principal afectación para el desarrollo de este fenómeno por lo que, poder obtener una humedad constante para un suelo permitiría lógicamente inhabilitar los cambios volumétricos a pesar del potencial que este podría tener.

Las variaciones de la humedad de un terreno provienen de dos formas, el primero que se deriva de los niveles de agua subterránea para lo cual se realiza un sistema de drenajes subterráneos teniendo en cuenta su profundidad y la capacidad del mismo, en cuanto al acuífero se tendrá en cuenta la cantidad de agua que escurre por este, el tipo y si se encuentra confinado o no, y el segundo que es la infiltración de agua que proviene de la superficie donde sistemas de barreras ayudaran a impedirlo, tanto de tipo horizontal (drenes, veredas y pavimentos perimetrales, etc.,) como vertical (hormigón, membranas, etc.,) las cuales tendrán una distancia mínima de 70 – 100cm alrededor de la construcción siendo más efectiva y costosa. (Vélez Dávila, P. E. 2012)

En cuanto al método de Prehumedecimiento se trata de la suposición de llevar al suelo a las expansiones máximas antes de realizar la construcción y no esperar cambios volumétricos en el futuro que puedan afectar a la estructura, sin embargo, aunque teóricamente este principio puede generar una solución, existen varios parámetros que generan problemática

en cuanto a este método: la inundación del terreno generada para obtener el aumento de volumen máximo provocara una humectación en los suelos subyacentes provocando nuevas expansión que debido al tiempo que toma la infiltración en suelos arcillosos (baja conductividad hidráulica) podrían continuar dándose por un lapso de 10 años, el tiempo de semisaturación necesaria para un suelo podría llevar entre 1 – 2 meses considerándose un lapso largo en términos de construcción y la humectación uniforme necesaria para este método en cuanto a su obtención es muy discutible. La ventaja de este método se da en construcciones de pavimentos, cimentaciones mediante losas, canales, etc., dando inconvenientes en cimentaciones aisladas por la disminución de los parámetros resistentes del suelo. (Patrone, J., & Prefumo, J. E., 2005)

4.1.1.3 Reducción de la densidad del suelo.

Este método trata de generar un aumento de la condensación del material mediante una acción mecánica a través de procedimientos de compactación reduciendo su densidad seca y a su vez el potencial expansivo en suelos arcillosos, esta técnica a sido utilizada con gran seguridad en el medio con diferentes materiales obteniendo resultados altamente favorables a tal punto de llegar a descuidar aspectos esenciales que garantizan el correcto proceso tergiversando criterios pretendiendo obtener rendimiento positivos mientras mayor este compactado el material. Los suelos arcillosos contienen estructuras complejas formada por fuerzas electroquímicas que aumenta de dificulta al contener material transportado que es reorganizado y compactado componiendo estructuras de grumos de partículas (rigen la disposición e intensidad de fuerzas que influyen dentro del reacomodo) más dificultosas haciendo imposible una esquematización sencilla como base que genere una relación cuantitativa para posteriores trabajos (Rico Rodríguez, A. & del Castillo Mejía, H. 1992).

Los procesos estáticos han mostrado mejores eficiencias en suelos con materiales abundantes en finos, estos suelos se convierten en lodos que dificultan la compactación adhiriéndose a los rodillos lisos por lo que es habitual mayormente la utilización de amasado mediante rodillos de pata de cabra, muestran una mayor utilidad cuando son incorporados sistemas vibratorios, pero, produce desventajas en arcillas originando mecanismos que degeneran su estructura al igual que disminuyen su resistencia al corte, aunque debe señalar que “se han logrado compactaciones adecuadas en suelos prácticamente saturados y aún con muy altos contenidos de arcilla, cuando se utilizan los procedimientos ya mencionados de compactación dinámica con grandes pesos cayendo desde alturas considerables” (Rico Rodríguez, A. & del Castillo Mejía, H. 1992).

4.1.1.4 Estabilización química - inyección

Este tipo de estabilización es el método por el cual se realiza una modificación del material en su estructura química generando cambios en sus propiedades plásticas (disminuye $Li - IP$ e incrementa SL) y el incremento de compacidad, es decir, el descenso del índice de poros mediante una respuesta entre una mezcla fluida (lechada) y las partículas del suelo aumentando la resistencia mecánica de la masa obteniendo menor deformabilidad, los elementos más utilizados y estudiados en el medio para el control de suelos expansivos por inyecciones químicas desde hace décadas ha sido la adición de cemento y cal teniendo su uso especial énfasis en la ingeniería vial para la estabilización de la subrasante y en la construcción de edificaciones para el control de expansiones se ha estudiado en la actualidad con productos tales como los cloruros de calcio ($CaCl_2$), ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$] y silicato de sodio (Na_2SiO_3), mostrando resultados satisfactorios mejorando efectivamente tanto su plasticidad como en mayor grado el descenso de permeabilidad mediante ensayos de laboratorio pero, su empleo en campo es restringido por

su alto costo del producto químico y la forma de aplicación. (Patrone, J., & Prefumo, J. E., 2005; Calero, E., Rivera, M., & Valdez, M. 2016).

La inyección de estos químicos en un terreno debe ser distribuida de manera uniforme teniendo en cuenta la composición de sus huecos, la inclusión de la mezcla está dada mediante diferentes métodos que se describen a continuación (Córdova Salgado, M. A. 2014):

- **Inyecciones de impregnación:** Este tipo de inyección es apropiada para suelos bastante permeables utilizando lechadas con alta penetrabilidad para conseguir una saturación, la mezcla reemplaza el agua intersticial que es introducida a bajas presiones para anular movimientos y roturas en el suelo cubriendo poros, así como fisuras lo que origina una reducción en su permeabilidad. (Ilustración 25.a).
- **Inyecciones de compactación:** Este método genera un desplazamiento lateral volumétrico comprimiendo al suelo blando de forma controlada, la mezcla introducida es un mortero de alta consistencia que no se mezcla utilizada frecuentemente en suelos que sufren asentamientos producidos por la estructura. (Ilustración 25.b).
- **Inyecciones de fracturación hidráulica:** Esta técnica también llamada hidrofisuración o claquage, es la más recomendada para suelos arcillosos blandos, la inyección para este tipo de suelos en el pasado era inviable en la construcción hasta que se adoptados métodos desarrollados en la ingeniería petrolera como el hidrofracturamiento, la lechada es incorporada a través de tubos manguito a altas presiones para cubrir las fisuras generadas que establecen grumos que recomprimen el suelo. (Ilustración 25.c).

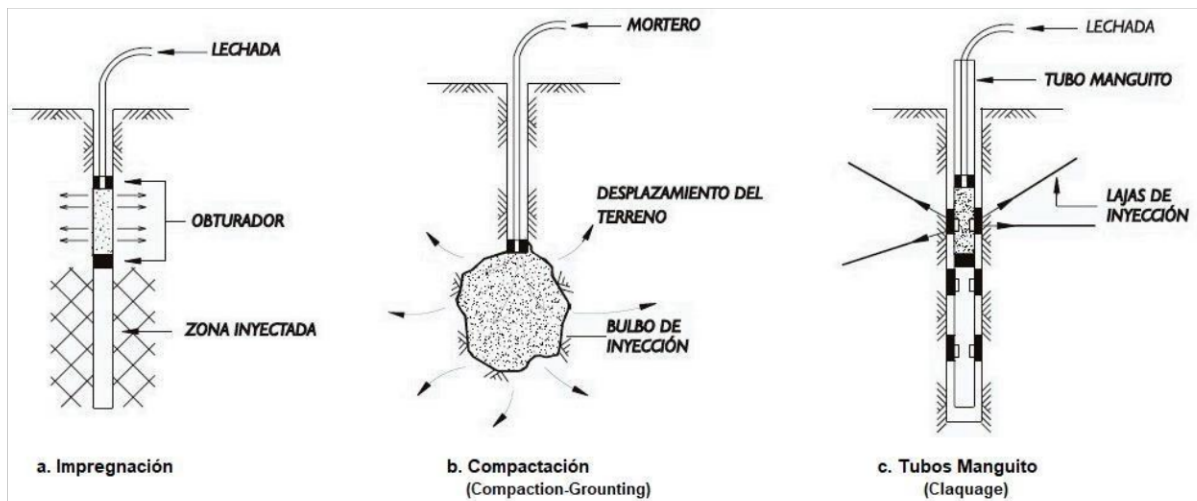


Ilustración 23. Sistema de diferentes técnicas de Inyección. Fuente: (Puertos del Estado, 2005).

Se ha examinado y comprobado una alta efectividad en cuanto a la neutralización de las fuerzas electroquímicas presente en las microestructuras de los minerales, sobre todo en la montmorillonitas y caolinitas presente en las arcillas siendo este el origen del fenómeno de los suelos expansivos, la cal genera reacciones que modifican al suelo atrayendo los cationes (Ca^{++}) a su estructura obteniendo uniones más firmes o fuertes que los normalmente encontrados en el medio acuoso como el sodio (Na^+) o Potasio (K^+), esto genera una estabilidad mayor en su estructura ya que las cargas eléctricas son compensadas con cationes divalentes como es el calcio, el grado de firmeza de los diferentes iones se puede constatar mediante la serie Liotrópica tanto para cationes como para aniones. (Castañeda, J. 2020).

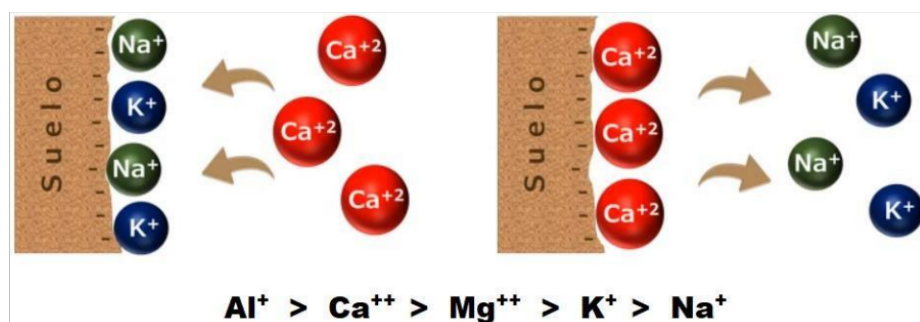


Ilustración 24. Intercambio Catiónico de las arcillas con la cal. Fuente: (Castañeda, J. 2020).

Una vez que se efectúa el cambio catiónico del calcio por los de sodio y potasio se obtiene efectos inmediatos (corto plazo) sobre las capacidades del suelo como (Castañeda, J. 2020):

- Fortalecimiento de la estructura entre la unión de las partículas.
- Disminuirá la capacidad de adsorción del suelo al reducir la capa difusa formada en las partículas de los minerales de la arcilla.
- La cal generará un encapsulado entre las partículas coloidales lo que les dará un peso suficiente para poder depositarse mejorando su trabajabilidad.
- Disminuirá las fuerzas de repulsión electrostáticas entre estos suelos de cargas negativas por la compensación generada en el fenómeno de intercambio, haciendo que la compactación sea mucho más sencilla.
- Se obtendrá una disminución inmediata de la humedad, primero por el polvo seco que ha sido adicionado al suelo y segundo ya que el óxido de calcio al estar en contacto con el agua genera una reacción violenta exotérmica (90°) permite que el agua contenida del suelo sea evaporada, a lo que se suma la aireación obtenida en el proceso de mezclado. (1% de cal podría generar entre 1-5% reducción de humedad).

“Métodos para encontrar el porcentaje óptimo de cal puede haber muchos y la eficacia de cada uno depende de la experiencia del que lo practique, muchos de estos no están normalizados por la ASTM, no obstante, el procedimiento ASTM D-6276-03, método muy útil por su facilidad y fiabilidad, hecho por Eades y Grim, proporciona los medios para estimar el requisito de la proporción del suelo-cal para la estabilización de un suelo plástico.” (Castro Cuadra, A. F. 2017).

C. Mc Dowell (1966) realizó un método gráfico para obtener el porcentaje de cal en relación del porcentaje del peso seco, basado en un ábaco que expone varias curvas de dicho porcentaje en función de IP ($\phi < 3$) y % que pasa por el tamiz N°40 ($\phi < 10\%$).

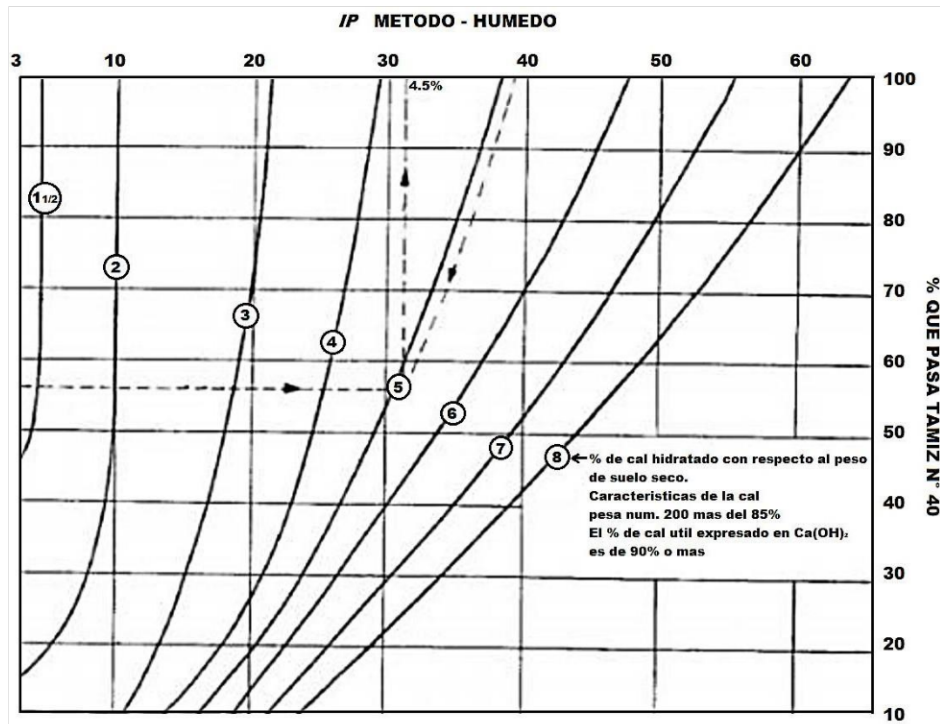


Ilustración 25. Ábaco para diseño de estabilización de suelos con cal. Fuente: (Mc Dowell, 1966).

“Las pendientes a lo largo del Canal Friant-Kern se trató por última vez en la década de 70’s con un 4% de cal viva para mitigar los problemas relacionados con la rotura de la pendiente causada por los suelos expansivos de Porterville (California). Los beneficios inmediatos del tratamiento con cal fueron bien documentados por Bureau of Reclamation. Sin embargo, quedan dudas sobre la durabilidad a largo plazo de los materiales tratados con cal. En este estudio se comparó las propiedades mecánicas y los cambios en la mineralogía del suelo de secciones tratadas y no tratadas para establecer la efectividad de la cal después de más de 40 años de desempeño. Los resultados experimentales muestran una reducción en el índice de plasticidad de 23 a 6 después del tratamiento con cal junto con un aumento de diez veces en la resistencia. La adición de cal reduce el riesgo de expansión volumétrica y erosión en suelos de moderadamente alto a muy bajo. Además, un aumento del pH de 6,30 a 8,90 en las secciones tratadas con cal indica que el tratamiento sigue siendo eficaz. El análisis de fluorescencia de rayos X muestra la presencia de cationes Ca^{++} en cantidades similares a la

dosis de tratamiento inicial, lo que indica una lixiviación insignificante de cal. El historial de desempeño del Canal Friant-Kern, junto con los hallazgos de este estudio, confirman la durabilidad a largo plazo del tratamiento con cal en este proyecto y refuerza el caso del uso de cal en la reparación de estructuras hidráulicas.” (Akula, P., Hariharan, N., Little, D. N., Lesueur, D., & Herrier, G. 2020).

Se debe destacar que las arcillas estudiadas en el artículo investigativo mencionado presentaban problemas severos de expansibilidad en condiciones de alta humectación con climas de desecación, la investigación también demostró que las estructuras de las arcillas seguían vigentes a pesar del tratamiento y el tiempo, por lo que se descarta la suposición que se tenía sobre la reversibilidad de las arcillas. (Castañeda, J. 2020).

4.2 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

4.2.1 Consideraciones en el diseño de la estructura.

En este apartado la estabilización estará guiada a través de la estructura con una selección apropiada de cimentación como del diseño (Anexo 5), la problemática producida por los suelos expansivos que soportarán la construcción de obras será abarcadas a través de la rigidización (capacidad de tolerar deformaciones) o de la contención flexible (capacidad de absorber las deformaciones) del diseño de la cimentación, la agrupación de cargas que estas soportan serán transmitidas al suelo de tal manera que puedan contener las deformaciones resultantes. (Patrone, J., & Prefumo, J. E., 2005).

Calidad del terreno	Hinchamiento / Retracción (mm)	Tipo de cimentación y otras medidas
Excelente	0 - 6	Cimentación común
Bueno	6 – 12	Cimentación común, reforzada
Satisfactorio	12 – 50	Juntas de asiento más frecuentes de lo habitual
Malo	50 – 100	Cimentación con pilotes y muros armados
Muy malo	0 - 100	Cimentación con pilotes y base ensanchada

Tabla 17. Recomendación de tipos de cimentaciones a construir. Fuente: (Llorca, 1980).

En la mayoría de las ocasiones este método puede ser utilizado de manera simultánea con el tratamiento de mejoramiento de suelos abordado previamente en este documento, la forma en cómo se puede englobar los tipos de diseño para la fundación de una estructura con el fin de disminuir los asentamientos diferenciales que puede experimentar por los suelos expansivos serán descritos a continuación.

4.2.1.1 *Transferencia de carga por debajo del suelo expansible.*

La transferencia se lo realiza a través de cimentaciones profundas definidas como aquella cuya longitud hasta el extremo inferior asentada sobre un estrato estable sea 8 veces mayor a su diámetro, en nuestro medio este tipo de cimentaciones (pilas, cilindros, cajones, etc.) suelen usarse en construcciones de puentes, muelles, grandes edificaciones, etc., debido a su complejidad en cuanto a su ejecución, equipamiento e infraestructura, acarreando grandes inversiones económicas, por lo que los pilotes son usados con más frecuencia para otras obras menores.

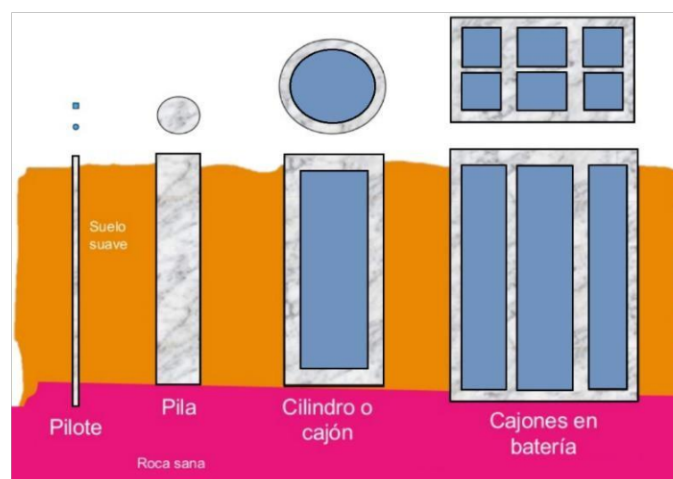


Ilustración 26. Tipos de cimentaciones profundas. Generado por el Autor.

Pilas

Cuando se tiene dificultades como por ejemplo al hallar un estrato firme mediante las excavaciones o estas puedan generar problemas a las edificaciones colindantes, las deflexiones esperadas son mayores a 1/250 o la expansión del suelo puede generar un levantamiento de la losa mayor a 100 mm se opta por la utilización de pilas, en la actualidad este tipo de elementos son los más empleados por razones económicas ya que son mayormente viables a comparación con la utilización de pilotes hincados; sus resultados son superiores a diferencia de las losas de cimentación siempre y cuando las pilas mantengan una profundidad de entre 6 a 8 m y mantiene considerables ventajas si se relaciona con las zapatas corridas siempre que la construcción comprenda áreas abundantes y contenga longitudes dentro de 3 a 4 m de su fuste. Estos elementos son colados *in situ*, evidentemente cimentadas sobre profundidades mayores que la capa de arcilla activa donde se origina fenómenos de expansión, el diseño de estas cuando son implementadas sobre este tipo de suelos deben contemplar tres aspectos fundamentales como (Tzatchkov, V. 2007);

- *Tensión en la pila*, para el diseño de pilas este es un criterio característico cuando se desea realizarlo sobre suelo expansivo, por lo cual merece una apreciable atención.
- *Capacidad de carga*.
- *Deformación*.

“Las pilas deberán estar ligadas en su cabezal por trabes de piso, los cuales no deben tener contacto con el terreno; se debe tener un espacio vacío de 10 a 35 cm o el doble de la expansión del suelo estimada entre las trabes y la superficie del terreno. El piso deberá colgarse de las trabes 20 cm arriba del terreno o apoyarse directamente sobre este si se dispone del aislamiento entre el piso y los muros.” (Tzatchkov, V. 2007).

Pilotes.

Esta técnica es la más usada por el hombre a través del tiempo para suelos blandos los cuales consistían de materiales como madera por su fácil maniobrabilidad la cual se limitaba en su

capacidad de carga por el grosor de las mismas, a medida de la era industrial se tuvo una gran demanda de obras donde se comenzó a utilizar pilotes de concreto y posteriormente las de acero ya que proporcionaba mejores rendimientos en el hinchamiento a grandes profundidades, “los pilotes largos o pilotes acampanados en su base son usados en diferentes áreas, depende de las condiciones del suelo, la profundidad de la roca y condiciones del agua freática. Estos últimos son usados generalmente en áreas donde los suelos en la parte superior son altamente expansivos o donde el aporte por fricción de la parte inferior no es suficiente. Estos pilotes deben tener un diámetro del fuste entre 450mm a 600mm para permitir la inspección de la perforación El costo la dificultad de inspección de este tipo de pilotes es la mayor desventaja de este sistema, la transferencia de cargas estructurales a una profundidad determinada genera un anclaje de la siguiente forma” (Segura Segura, C. A. 2009):

- “Pilotes excavados en la roca para soportar las grandes cargas de las columnas o proporcionar anclaje.”
- “Pilotes de fricción colocados a través de un suelo no expansivo. No necesariamente deben trabajar por punta en un estrato rígido o de arena.”
- “Pilotes acampanados en la base, a un estrato estable para soportar cargas medianas de las columnas o proporcionar anclaje.”
- “Pilotes largos excavados en una zona estable que no es afectada por cambios de humedad.”

Las mayores ventajas sobre este tipo de elementos es que a pesar de que haya levantamientos en el suelo producto del hundimiento de los demás pilotes estos no se dañan, en el proceso de construcción estos no se ven afectados por motivo del agua subterránea, las profundidades de hundimiento de estos elementos pueden llegar a ser muy altas y una

característica es la utilización de estos en estructuras marítimas (Urbina Palacios, R. F. 2012).

4.2.1.2 *Diseño de cimentaciones resistente al asentamiento.*

Losas de cimentación.

La utilización de losas normales en este tipo de suelo son descartados tanto por su soporte de cargas mínimas o por su peso propio despreciable al momento de contrarrestar hinchamientos por parte del suelo afectando no solo con fisuras si no en la mayoría de casos en la totalidad de la estructura, la rigidización de estas cimentaciones para su utilización sobre suelos con grado de expansividad bajo vienen dadas a través de vigas que habitualmente se encuentran en su cara inferior para elevar su inercia, consiguiendo rendimientos positivos tanto en estructuras livianas como parcialmente pesadas al tener suelos con valores inferiores al 1% en su expansión libre y 0.3 Kg/cm^2 en la presión de hinchamiento (Tabla 17), este tipo de cimentación son usadas primordialmente cuando los costos de métodos de cimentaciones profundas implican costos altos en la construcción. El diseño se encuentra basado en la interacción suelo-estructura, por lo que en primera instancia se deberá realizar mediante el estudio geotécnico la predicción del montículo formado por el suelo (hinchamiento) tanto en su forma, altura como las propiedades de las deformaciones experimentadas por el contenido de humedad bajo la losa, se debe señalar que la expansión suele darse frecuentemente en el centro de la estructura ya que la acumulación de agua es mayor en esta zona y en los bordes se genera desecación mediante la evapotranspiración por lo que el método de una inundación previa podría funcionar correctamente para este tipo de cimentación (pavimentos, contrapisos, losas, etc.) conteniendo la humedad, el diseño de la rigidez de la losa estará en base a la carga por la

presión formada del hinchamiento determinando momentos flectores y esfuerzo cortantes.

(Segura Segura, C. A. 2009)

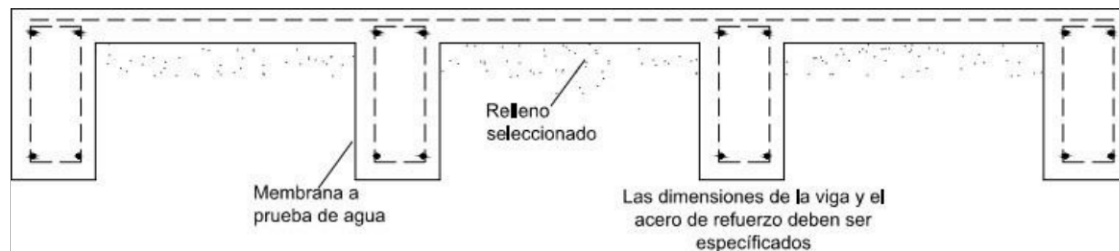


Ilustración 27. Sistemas de Losas de Cimentación Rígidas. Fuente: (Segura Segura, C. A. 2009).

Cimentaciones en Zapatas

Estos elementos son los más utilizados en cuanto a cimentaciones superficiales para estructuras cuyos pesos sean livianos, estas no son usualmente adoptadas cuando se tiene suelos expansivos por lo que su uso se centra como prolongación de la columna generando la ampliación de la superficie para la transmisión adecuada de cargas al suelo dependiendo de sus propiedades. (Montoya, J., & Pinto Vega, F., 2010) Se recomienda que la utilización de estos elementos cuando se registren suelos menores al 1% del potencial expansivo, presiones de expansión relativamente bajas, estratos de poco espesor de suelos expansivos y generar modificaciones para para aumentar el esfuerzo de contacto disminuyendo así la afectación del fenómeno (Tzatchkov, V. 2007):

- Minimizar los espesores de la zapata.
- El refuerzo debe ser incrementado en la losa y en el perímetro para elevar su rigidez de la cimentación.
- En el caso de que la construcción contenga muros estos deben ser cimentados de forma directa sobre el suelo.

La utilización de *Zapatas corridas* puede ser viable en suelos expansibles cuando se las cimentan a profundidades mayores que la capa activa (1.5 – 2 m profundidad del terreno

natural) o se las tome como alternativa a otras, siempre y cuando el nivel freático del terreno sea escasamente factible que ascienda o la estructura que soporte sea de madera. Las *Zapatas aisladas* tienen cierta igualdad con las cimentaciones profundas ya que la carga soportada es transmitida en diferentes puntos con la diferencia obvia de la profundidad de fundición sin percibir fricciones laterales, lo que se hace normalmente para la adopción de este elemento en suelos expansivos es permitir un espacio vacío con el fin de colocar bloques de pómez dentro de ella, este proceso se realiza para que el hinchamiento afecte al bloque y los elementos estructurales no sean afectados. (Vélez Dávila, P. E. 2012).

Pero Peck, B. P., Hanson, E. W., & Thornburn, H. T. (1974), en su investigación indicaron que solo se puede contrarrestar la expansión en zonas puntuales donde las tensiones sean provocadas por la cimentación.

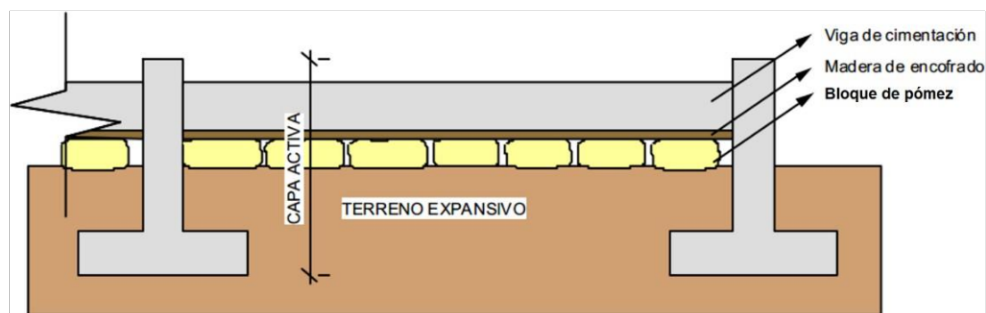


Ilustración 28. Cimiento de zapatas con vigas apoyadas en bloques de pómez. Fuente: (Vélez Dávila, P. E. 2012).

A continuación, en la tabla 17, se presenta un cuadro resumen sobre la utilización de las diferentes soluciones que puede ser utilizado en la construcción sobre suelos expansibles calificados a través de diferentes parámetros cualitativos y cuantitativos, el cual debe ser complementado con el Anexo 5 que ofrece una descripción sobre el procedimiento, el detalle de diseño y el control de calidad de cimentaciones que se debe considera para este tipo de suelos expansivos.

Grado Expansividad	Expansión Libre (%)	Presión de Hinchamiento (kg/cm ²)	Hinchamiento / Retracción (mm)	Construcción Recomendada
			< 6	Cimentación común, ninguna precaución
Bajo	< 1	0.3	6 – 12	Cimentaciones: Zapatas Zapatas corridas Losas de piso: Reticuladas Postensadas
Bajo a Medio	1 – 5	0.3 – 1.2	12 – 50	Cimentaciones: Zapatas Aisladas Gato Hidráulico Juntas: Libre Flexible
Medio a Alto	5 – 10	1.2 – 2.5	50 – 100	Muros: Flexible Construcción Unitaria Marco de Acero Cimentaciones Profundas: Pilas
Muy Alto	> 10	> 2.5	> 100	Cimentaciones Profundas: Pilas de base ensanchada Pilotes Cajones

Tabla 18. Resumen de medidas de construcción para suelos expansivos. Generado por el Autor.

CAPÍTULO QUINTO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Previo a la proyección de una obra civil, la determinación para el diseño de los diferentes elementos que esta compone, se debe realizar un adecuado reconocimiento del tipo de suelo con el que se va a trabajar, esto se desarrolla a través de una metodología detallada que comprenda en primer instante el reconocimiento *in situ* del terreno donde se va a construir para proceder con la toma de muestras para su posterior análisis de propiedades mediante ensayos.
- En cuanto a los suelos metaestables se los puede caracterizar por su alta relación de vacíos, un contenido disminuido en su cohesión en donde sus partículas se encuentran adheridas mediante un material cementante además de las fuerzas electroquímicas.
- Los suelos licuables en la investigación de su caracterización se encontró una gran variedad de descripciones y definiciones distintas las cuales frecuentemente presentaban discordancia en cuanto sus resultados experimentales, esto se puede deber a su compleja estructuración del fenómeno la cual no está plenamente entendida.
- La característica principal de los suelos expansivos es su contracción y expansión efecto generado en consecuencia de la cantidad de arcilla que el terreno pueda contener, su determinación debe estar basada más allá de un análisis químico de muestras, generando un estudio comparativo de varios métodos para complementar la precisión de los resultados.

- La identificación oportuna de estos suelos puede dar como resultado el estudio de alternativas en la selección del terreno cuando es viable, en caso contrario como usualmente sucede y la construcción debe realizarse estrictamente en el terreno escogido, se debe guiar el diseño por medio de procedimientos que afronten los resultados de los fenómenos del suelo que engloben soluciones por medio del material donde se tratara de disminuir propiedades problemáticas o por mecanismos estructurales que sean capaz de soportar las deformaciones proveniente de tales fenómenos.

5.2 RECOMENDACIONES

- La NEC-SE-GC 2015 (Norma Ecuatoriana de la Construcción, Geotecnia y Cimentaciones) aconseja realizar estudios de suelos para edificaciones a partir de 3 pisos, estos estudios se deberían sugerir en construcciones de vivienda a partir de una planta basados en el reconocimiento *in situ* por parte del ingeniero de posibles suelos problemáticos ya que la estructura puede presentar daños graves al ser cimentado en este tipo de terrenos.
- Dentro de un proyecto de construcción es necesario un estudio geotécnico que debe contener si existe estratos inestables, perfiles de tensión permisibles, la influencia que puede tener las cimentaciones de estructuras cercanas, recomendación de métodos de estabilización, etc., con el fin de diseñar de manera precisa un sistema de cimentación apropiada.
- El razonamiento que se tiene por parte del contratista como del propietario al desarrollar una construcción sobre la viabilidad económica respecto a los estudios de suelo como la estabilización del mismo se debe modificar al tener en cuenta que cuando estos no son realizados pueden englobar costos posteriores para solucionar y corregir daños en la estructura, derivando en gastos y tiempo que pueden superar las que hubiese tomado el adoptar las medidas preventivas desde un inicio.
- En los suelos expansivos se debe tener un enfoque especial sobre su capacidad en el aumento o disminución de la humedad, por lo que se recomienda redireccionar el agua que puede presentarse por el aumento del nivel freático, filtraciones por fractura de tubería, agua pluvial, etc., al igual que la remoción de árboles y plantas alrededor de la

construcción (3 m.) encargado de la reducción del agua en el terreno o caso contrario si se desea conservar y mantener jardinerías optar por sistemas de irrigación por goteo.

- Se recomienda realizar ensayos con una cantidad de muestras considerables tanto en estado seco como húmedo, esto con el fin de relacionar su comportamiento real en campo ante el aumento de agua mediante el empleo de equipo triaxial como de corte, verificando su adecuada aplicación mediante la normativa vigente.
- En cuanto a la estabilización de suelos expansibles no se recomienda la utilización del método de Prehumedecimiento por medio de la inundación del terreno de construcción ya que como se expuso escasamente es eficiente debido a tiempo y uniformidad de la infiltración y en el caso de obtenerlo no se puede llegar a asegurar que la humedad obtenida pueda ser constante en el transcurso del tiempo.
- Se debe tener precaución en el uso de las ecuaciones para las correlaciones de expansión ya que muchos de estos utilizan parámetros en base a la humedad natural del suelo el cual fluctúa ampliamente en función del periodo del año, por lo que se debería analizar las épocas en el cual se adquirirán las muestras que se empleen en los ensayos.
- Aunque las correlaciones existentes para poder realizar los cálculos de la presión de expansión nos ofrecen una cuantificación de su valor, estas siempre pueden mostrar errores por lo que se sugiere que este valor sea obtenido de ser posible por medio del ensayo de expansión controlada.

- Con el fin de contrastar y verificar los resultados obtenidos en la fase de la caracterización de los suelos expansivos se debe realizar un análisis gráfico comparativo de los datos obtenidos con los ensayos de expansión y las correlaciones usadas para la eliminación de aquellos que puedan mostrar error.
- Al momento de compactar utilizando la arcilla potencialmente expansiva del terreno como relleno se recomienda que se lo realice por medio de equipo ligero (pisones, placas vibratorias, etc.) garantizando la humedad por encima de la óptima con un grado no mayor al 95% de compactación de la prueba Proctor estándar.
- Las losas de cimentación rigidizadas no son recomendadas en suelos expansible cuando se tiene una marcada irregularidad en las cargas soportantes de las columnas contiguas con grandes distancias ya que la distribución de dichas cargas será ineficiente.
- Se debe asegurar un peso mínimo (5ton/m^2) en la obra tratando de contrarrestar la expansión de suelo con la carga muerta de la estructura, se opta normalmente por zapatas con un tamaño ajustado para la concentración de la carga teniendo en cuenta la normativa para las dimensiones mínimas de la misma.
- La utilización de pilotes aislados genera restricciones en su utilización cuando se tiene zonas con riesgo alto de sismo, en terrenos con pendientes mayores al 10% y cuando el espesor de la capa del suelo inestable sea tres veces mayor al diámetro del pilote.
- Se debería generar una investigación que implique la combinación entre los diferentes métodos para dar solución a los fenómenos correspondiente a los suelos expansivos, basados en brindar una amplia ventaja al realizarlos, tanto en viabilidad económica

como en la factibilidad constructiva dentro de nuestro medio en la ciudad de Cuenca, teniendo en cuenta medidas y métodos de evaluación.

BIBLIOGRAFÍA

- Clemence, S. P., & Finbarr, A. O. (1981). Design considerations for collapsible soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(3), 305-317
- Ortiz, Á. U. (1983). Patología de las cimentaciones. *Informes de la Construcción*, 35(350), 5-35.
- DUDLEY, A. (1970). Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. Of the American Society of Civil Engineer.*
- AITCHISON, G.D. (1973). Proc. 8th IMFE, Moscú, General Report session 4, vol. 3: 161-190
- Popescu, M. E. (1986). A comparison between the behaviour of swelling and of collapsing soils. *Engineering Geology*, 23(2), 145-163.
- Alonso, E. E., Gens, A., and Hight, D. W. (1987), “Special problem soils general report”, 9th European conference on soil mechanics and foundations engineering, Dublín, Vol.3.
- Flor Arroyo, F. D., (2016). Determinación de ángulo de fricción y cohesión del suelo mediante correlaciones obtenidas en los ensayos de plasticidad, módulo de elasticidad y NSPT de suelos de tres sectores de la ciudad de Quito (Doctoral dissertation, Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito).
- Fernández Sixto, E. A. (1998). Investigación del conglomerado colapsable de la Cano-Vitor Arequipa. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Holtz, W. G., y Hilf, J. W. (1961). “Settlement of Soil Foundations Due to Saturation Proceedings, 5ª Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e ingeniería de Fundaciones, Paris, vol. 1, 1961, pp. 673-679

- Ridley, A. M., 1993. The measurement of soil moisture suction (PhD Thesis). University of London.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., y Fredlund, M. D. (2012). Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Aretxabala-Díez, A. (2002). Algunas aclaraciones sobre los estudios geotécnicos en suelos colapsables en Navarra.
- Behzad Kalantari PhD. (11/2012). Foundations on collapsible soils: a review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 166 Issue FE2, 57–63. 07/2012, De Institution of Civil Engineers Base de datos.
- Laporte, G., & Sáenz, S. (1985, noviembre). Métodos aproximados de cálculo consolidación de limos compresibles aplicables a Costa Rica. En: 3er Seminario Nacional de Geotecnia. San José, Costa Rica.
- Rogers C.D.F. (1995). Types and Distribution of Collapsible Soils. In: Derbyshire E., Dijkstra T., Smalley I.J. (eds) Genesis and Properties of Collapsible Soils. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 468. Springer, Dordrecht.
- ZUR, A. Y WISEMAN, G., 1973. A Study of Collapse Phenomena of an Undisturbed Loess. 8º International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2.2, Session 4/43, pp.265-268. Moscú, URSS.
- Springall R. (1974). Estudio y análisis estadístico del oleaje generado por huracanes en el suroeste del Golfo de México. Tesis (Doctorado). México. Universidad Autónoma de México.
- Badillo, E. J., & Rodríguez, A. R. (1976). Mecánica de suelos: Teoría y aplicación de la mecánica de suelos. Limusa.

- Reginatto, A. R., & Ferrero, J. C. (1975, April). Collapse potential of soils and soil-water chemistry: Conference. Session four. 6F, 3T, 7R. PROC. EIGHTH INT. CONF. ON SOIL MECH. FOUND. ENGG. MOSCOW, V2. 2, 1973, P177–183. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 12, No. 4, p. 59). Pergamon.
- RUANO, D., (2012). Estabilización de Suelos Cohesivos por Medio de Arenas Volcanicas y Cal Viva, Guatemala, 216pp
- Díaz del Real y Salguero, E. M. (2015). Sistemas de recalce de cimentaciones en los proyectos de conservación de edificios patrimoniales en Andalucía. Revisión crítica de intervenciones realizadas y de los sistemas empleados.
- Redolfi, E. R. (2007). Suelos colapsables. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Departamento de Construcciones Civiles, Bogotá.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). Rate of capillary rise in soil. Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering, 130(6), 646-650.
- Gaaver, K. E. (2012). Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils. Alexandria Engineering Journal, 51(3), 205-210.
- Torres Rodríguez, N. E. (2019). Incidencia del grado de saturación de los suelos colapsables en la estabilidad de taludes del puerto de Paita-Piura, en el año 2019.
- Lizcano, A., Herrera, M. C., & Santamarina, J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil, 6(2), 167-198.

- López Martínez, M. A. (2017). Mejoramiento de las propiedades físico mecánicas de los suelos arenosos del sector de Pomasqui para cimentaciones superficiales y contrapisos, mediante el uso de cemento tipo MH (Bachelor's thesis, PUCE).
- RODRÍGUEZ, D. P. (2019). Diseño de zapatas aisladas mediante interacción estática suelo-estructura. Licenciatura en Arquitectura. Universidad de Guanajuato.
- Zapata, O. (2012). Estimación de desplazamiento lateral y vertical del terreno debido a licuación inducido por sismo en México. (Tesis de ingeniería civil). Universidad Nacional Autónoma de México
- Das, B. M. (2015). Principles of foundation engineering. Cengage learning.
- Besoain, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos (No. 60). Bib. Orton IICA/CATIE.
- Condori Quispe, B. M. (2012). Investigación del conglomerado especial en la ciudad de Tacna. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Tzatchkov, V. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos. Comisión Nacional del Agua, México.
- Torres García, J. D. J. (2015). Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos (Doctoral dissertation). Facultad de Ingeniería, Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro
- Rodríguez Ortiz, J. M., Serra Gesta, J., & Oteo Mazo, C. A. R. L. O. S. (1982). Curso aplicado de cimentaciones. Séptim a edición. COAM.
- Basset Salom, L. (2015). Patología de las cimentaciones: causas. Patología de las cimentaciones: causas. Universidad Politécnica de Valencia.

- Lindao Baque, J. V., & Polonio Briones, L. M. (2014). Evaluación del potencial de licuefacción de suelos en la zona de Chipipe del cantón Salinas (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2015).
- Falcon, M., & Ramirez, P. (2012). Generación de mapas de licuefacción a partir del sismo de febrero de 2010. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Chile.
- BARRERA, M. Y P. GARNICA. 2002. Introducción a la Mecánica de suelos no Saturados en Vías Terrestres. Publicación Técnica No. 198 Sanfandila, Qro. México.
- Flores Mello, A. O. (2018). Determinación del tipo de suelo y potencial de colapso del suelo del puesto de salud Intiorko, Distrito de Ciudad Nueva, Departamento de Tacna-2017. Veritas Et Scientia, 877-889.
- Maswoswe, J. 1985. Stress path for compacted soil during collapse due to wetting. Ph.D. Thesis, Imperial College, London.
- Quijano Arias, D. A., & Tenjo Ramos, E. A. (2018). Análisis de efectividad en la estabilización de suelos colapsables en el tramo II de la transversal el bosque en el Municipio de Floridablanca, Santander. Bogota: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- CARRILLO GIL A.,1978 - "Estabilidad y Deformación de los Suelos Especiales en el Perú" Memorias del II Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, Perú.
- CARRILLO GIL, A.,1991- "Propiedades Geotécnicas de los Suelos de América: Suelos Aluviales"- Informe del Relator General IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos, Viña del Mar, Chile.

- Díez, A. A. (2005). Algunas aclaraciones sobre los estudios geotécnicos en suelos colapsables
- Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., & Donald, I. B. (1960). Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils.
- Wu, S., Gray, D., & Richart, F. (1984). Capillary Effects on Dynamic Modulus of Sand and Silts. (ASCE, Ed.) *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(9), 1188-1203.
- Guamán, G. P. S. (2019). Caracterización de suelos inestables frente a deslizamiento en dos laderas situadas en los alrededores de la ciudad de Cuenca (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD DE CUENCA).
- URIEL, S. and SERRANO, A. A. (1973). Geotechnical properties of two collapsible soils of low bulk density at the site of two dams in Canary Islands, Spain. *Proc. 8th mt. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.* vol. 2.2, pp 251-264.
- Sánchez, J. C. (2020, 31 marzo). Ciclo de las rocas: Ígneas, metamórficas y sedimentarias - Origen y composición del suelo Parte I [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=BgMvVT8Ai8A>
- Manzanal, D. G. (2008). Modelo constitutivo basado en la teoría de la plasticidad generalizada con la incorporación de parámetros de estado para arenas saturadas y no saturadas (Doctoral dissertation, Caminos).
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3), 313-321.
- Escario, V. and Sáez, J. (1986). The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique* 36, No. 3: 453-456.

- Gan, J. K. M., Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), 500-510.
- Escario, V., Juca, J. F. T., & Coppe, M. S. (1989). Strength and deformation of partly saturated soils. In *Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations*. 12 (pp. 43-46).
- Gonzaga Garzón, M. A. (2018). Evolución tectono-sedimentaria de la cuenca miocénica de Cuenca (Bachelor's thesis, Quito, 2018).
- López-Lara, Teresa (2002). "Estudio fisicoquímico de la modificación de suelos expansivos". Doctorado en ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro. México.
- Arance, I. R., & Rosales, M. R. (2015). *Biología y Geología: 1 ESO: Volumen: La Tierra en el universo*. Oxford University Press.
- Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. (2014). *Contenidos de edafología, génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo*. D-Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- G.W. Donaldson. 1969. The occurrence of problems oh heave ad the actor affecting its nature. *Proceeding of 2nd international Research and Engineering Conference on Expansive Soils*. A.E.M. Press, Texas.
- Idrovo Angumba, B. S. (2019). *Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD DE CUENCA).

- Pedro, G. (1968). Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique*, 10(2), 457-470.
- Bravo Heredia, P. E., & Daza Orellana, P. A. (2019-04-17). Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca (Bachelor's thesis).
- Llorca Aquesolo, J., (1980). Sobre la edificación en arcillas expansivas. *Informes de la Construcción*, 33(321), 71-82.
- Díaz, A. & Ramírez, J. (2009) - Compendio de rocas y minerales industriales en el Perú. INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 19, 482 p., 44 mapas.
- Vergara Rebaza, B. L. (2017). Estimación de reservas probables de yacimientos no metálicos en arcillas del distrito de Llacanora Cajamarca, Perú—2015.
- Cadena Nogales, A. C. (2014). Estudio químico de la presencia de montmorillonita en arcillas de la cuenca sedimentaria miocénica de Loja mediante técnicas de espectroscopía (Bachelor's thesis).
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 75-106.
- Silva, S. M., Braga, C. R., Fook, M. V., Raposo, C. M., Carvalho, L. H., & Canedo, E. L. (2012). Application of infrared spectroscopy to analysis of chitosan/clay nanocomposites. *Infrared spectroscopy—materials science, engineering and technology*, 43-62.

- Barbeta, G. (2000). Método para la selección del estabilizante óptimo. línea] http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1105102-161519//07TESI6.pdf, consultado el, 2.
- Fassbender, H. W., & Bornemisza, E. (1987). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Iica.
- Díaz, R. A. G., & Gómez, M. M. (2007). Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad Multidisciplinaria Oriental. Trabajo de graduación para optar al título de ingeniero civil, Universidad de El Salvador (UES), San Salvador, El Salvador.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior (Vol. 3). New York: John Wiley & Sons.
- de Santiago Buey, C. (2012). COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS Y SEDIMENTOS. Laboratorio de Geotecnia. El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (CEDEX)
- Leoni, A. J. (2005). Propiedades Físicas de los Suelos: Capítulo 1 – Formación de los Suelos. Facultad de Ingeniería UNLP.
- Delgado A. (1986). Influencia de las trayectorias de las tensiones de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Bucio, M. B., & Anguas, P. G. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. Publicación técnica, 198.
- Ramírez Bustamante, J. A. (2019). Estudio de las transformaciones de las fases cristalinas de las arcillas en el proceso de quema de la cerámica (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

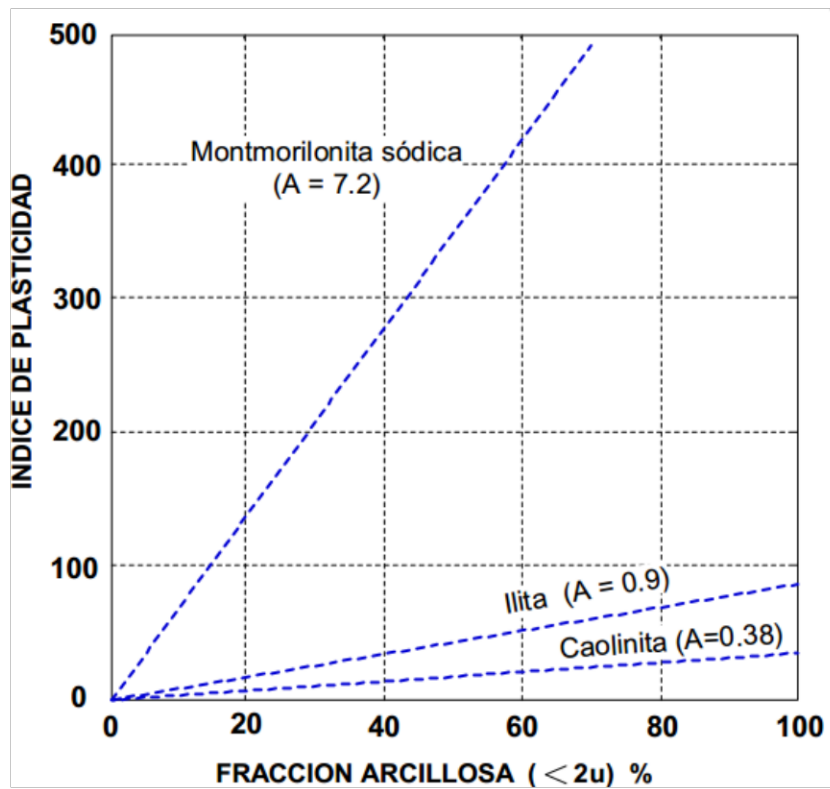
- Zalba, P. E. (1978). Estudio geológico mineralógico de los yacimientos de arcillas de la zona de Barker, partido de Juárez, provincia de Buenos Aires y su importancia económica (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Da Mata de Alva Costa, W. (2009). Modelación de Estructuras con Muros Albañilería sobre Suelos Expansivos (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas).
- Mata Monge, R. (2005). Análisis de asentamientos de losas de fundación sobre rellenos de suelo colapsable mediante la aplicación de un modelo físico.
- Córdova Salgado, M. A. (2014). Estudio de mezclas de inyección incorporando al cemento materiales como cangahua, bentonita, crudo de caliza-arcilla o aditivos para estabilización y mejoramiento de suelos (Bachelor's thesis, Quito, 2014).
- Puertos del Estado (2005), Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias ROM 0.5-05, Ministerio de Fomento. Madrid.
- Jiménez Chappotin, R., & Crespo Castillo, R. (2013). Caracterización de áridos finos y minerales arcillosos con el empleo del azul de metileno como herramientas para la clasificación.
- Dra. Angelone, S. (2018). TIPOS DE SUELOS: CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS Y LIMOSOS. Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL. [Apunte]
- Altmeyer, W. T. (1955, March). Discussion of engineering properties of expansive clays. In Proc. ASCE (Vol. 81, No. 658, pp. 17-19).
- Skempton, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. Selected papers on soil mechanics, 106-118.

- Nelson, J.D. & Miller, (1992). *Expansive Soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. New York, John Wiley & Sons.
- Trejo Moedano A., (1989). "Los suelos expansivos y su problemática". Academia mexicana de ingeniería a alternativas tecnológicas 29 mesa redondas sobre los suelos expansivos y su problemática. México.
- Seed, H. B., Woodward, R. J., & Lundgren, R. (1964). Fundamental aspects of the Atterberg limits. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(6), 75-106.
- Burland, J. B., Broms, B. B., & De Mello, V. F. (1978). Behaviour of foundations and structures.
- Patrone, J., & Prefumo, J. E. (2005). La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (4), 51-74.
- Ochoa, V. E. M. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 23-38.
- Ibáñez, S. J. (2009). Análisis de ensayos de penetración dinámica a través de su rendimiento energético (Doctoral dissertation, Thesis presented to the University of Cantabria, at Santander, Spain, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy).
- Flores Cano, J. M. (2014). Validación de la determinación de la densidad In-Situ de un tramo del proyecto " Collas-Tababela" utilizando un densímetro eléctrico y comparando los resultados con el densímetro nuclear y el cono y arena (Bachelor's thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador).

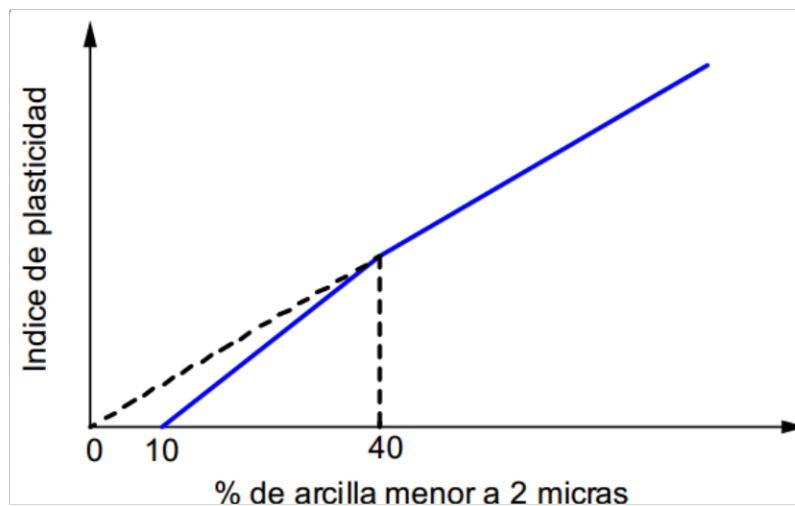
- Vélez Dávila, P. E. (2012). Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba. Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones.
- Lizardi Búrquez, G. (1997). Reconocimiento, prevención y corrección de grietas ocasionadas en edificios por movimientos del subsuelo. Hermosillo: Universidad de Sonora.
- Hurtado, J. E. A. (1996). Terzaghi y la Mecánica de Suelos . Perú: Editorial UNI.
- Whitlow, R. (1994). Fundamentos de la Mecánica de Suelos, México DF, México: Compañía Editorial Continental S.A.
- Bravo Quiñones I., (2014). Estudio Geotécnico para Vivienda Unifamiliar en Terreno Expansivo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.
- Rico Rodríguez, A. & del Castillo Mejía, H. (1992). Consideraciones sobre Compactación de suelos en obras de Infraestructura de Transporte. Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- Calero, E., Rivera, M., & Valdez, M. (2016). Determinación del comportamiento al hinchamiento y retracción de suelos que tienen plasticidad, en algunos puntos de la carretera longitudinal del norte en el tramo comprendido entre Metapan (Dpto. Santa Ana) y Sensuntepeque (Dpto. Cabañas). Trabajo de grado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Ortiz Ulloa, F. A., & Pauta Suárez, B. R. (2016). Determinación de los factores que explican la distribución espacial de daños por deformaciones del terreno en la zona de colinas de Challuabamba (Bachelor's thesis).

- Lambe, T. W., Whitman, R. V., Massachusetts Institute of Technology. Soil Engineering Division, & Colo.) Soil Mechanics Conference (1st: 1959: Golden. (1959). The role of effective stress in the behavior of expansive soils. MIT, Soil Engineering Division.
- Castañeda, J. (2020, 6 mayo). Suelos Susceptibles a la Estabilización con Cal y Química de la reacción. CALIDRA. [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=KhpUQIQPUhE>
- Castro Cuadra, A. F. (2017). Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Ingeniería).
- Akula, P., Hariharan, N., Little, D. N., Lesueur, D., & Herrier, G. (2020). Evaluating the Long-Term Durability of Lime Treatment in Hydraulic Structures: Case Study on the Friant-Kern Canal. *Transportation Research Record*, 2674(6), 431-443.
- Segura Segura, C. A. (2009). Cimentaciones superficiales en suelos expansivos (Master's thesis, Uniandes).
- Urbina Palacios, R. F. (2012). Guía para el diseño de pilotes. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Piura.
- Peck, B. P., Hanson, E. W., & Thornburn, H. T. (1974). *Foundation Engineering*. 2nd. Edition. New York: John Willy & Sons, 7-8.
- Montoya, J., & Pinto Vega, F., (2010). CIMENTACIONES. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida.

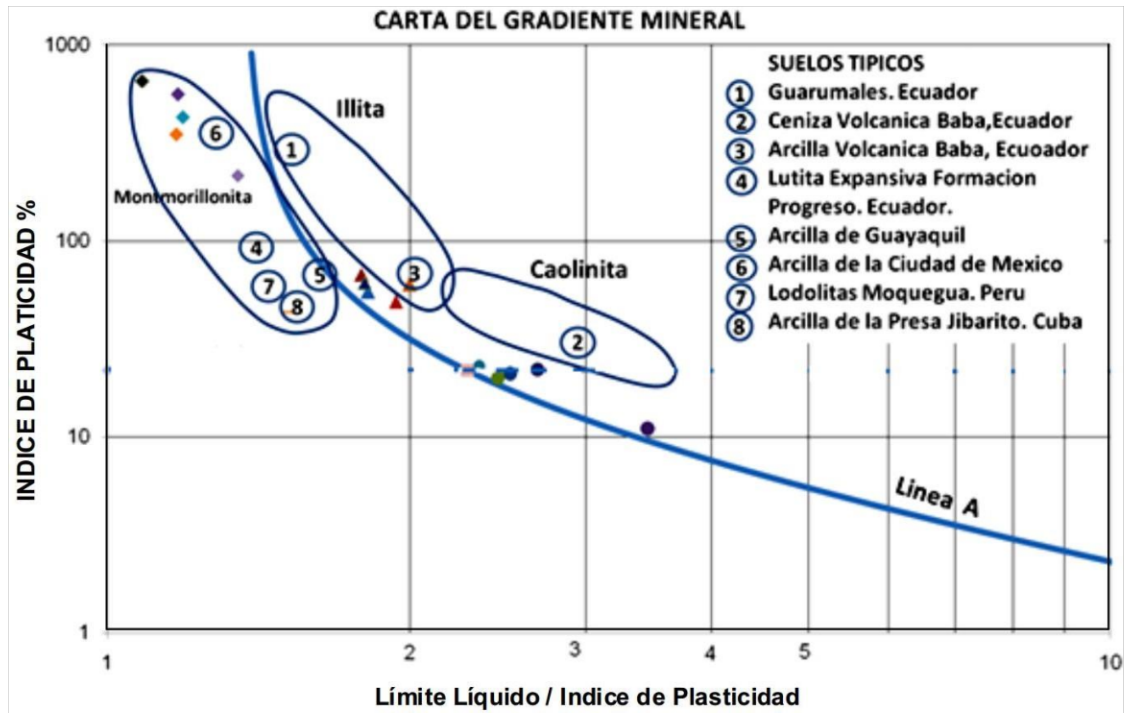
ANEXOS



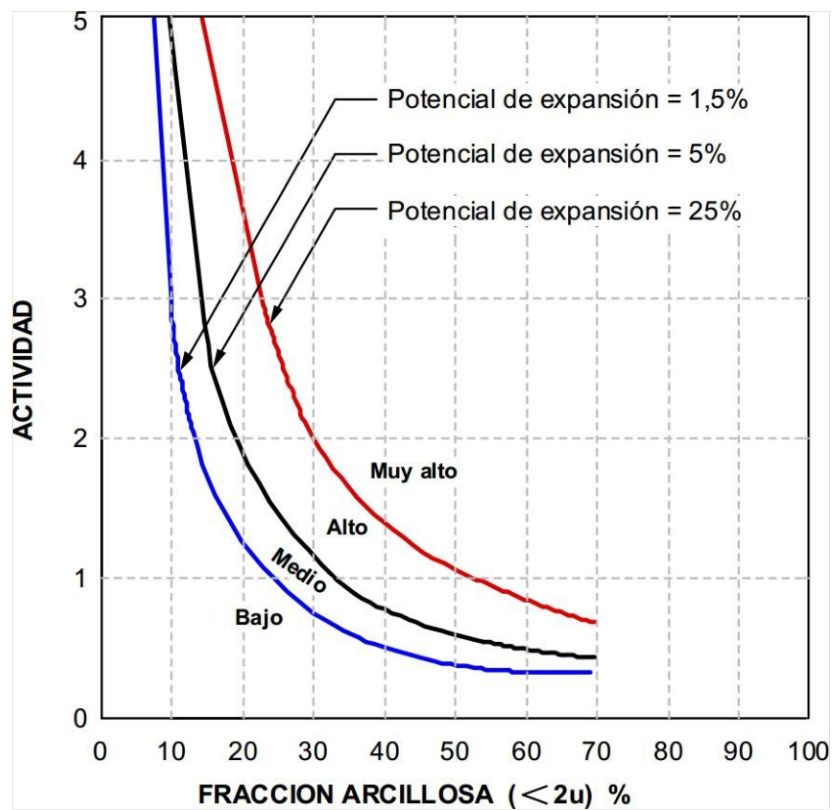
Anexo 1. Relación A_c (Actividad) y el mineral predominante del suelo. Fuente: (Según Skempton, 1953).



Anexo 2. Actividad de una arcilla. Fuente: (Seed, Woodward & Lundgren, 1964).



Anexo 3. Gradiente mineral. Fuente: (Marín Nieto, L. 1991).



Anexo 4. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas. Fuente:

Tipo de fundación	Objetivo del diseño	Procedimiento de diseño	Detalles de diseño	Control de calidad
Pilotes pre-excavados y vigas	Transferir las cargas a un estrato estable	Determinar longitud del pilote basado en la fluctuación de humedad de la zona	Extender acero de refuerzo en toda la longitud del pilote y flejes en las vigas de cimentación	Evitar forma de champiñón en la cabeza del pilote
	Contrarrestar fuerza hacia arriba de expansión con anclaje en estrato no expansivo	Diseñar diámetro basado en la mínima presión de carga muerta	Se les puede colocar camisas para reducir fuerza hacia arriba	Verificar separación entre vigas de cimentación y losas de entre piso
		Proporcionar acero de refuerzo para resistir tracción	Se puede diseñar con base acampanada para resistir levantamientos	Separar vigas de cimentación de losas estructurales
		Diseñar vigas de cimentación que resistan cargas provenientes de pisos y muros	Evitar pilotes de diámetros pequeños	Asegurar limpieza del acero de refuerzo y longitudes apropiadas
			Proporcionar separación entre las vigas de cimentación y las losas	Evitar segregación del concreto de pilotes
				Asegurar base del pilote limpia
Losas de cimentación rígidas	Proporciona suficiente rigidez en la cimentación para minimizar distorsiones estructurales a niveles aceptables	Definir el patrón de levantamiento del suelo	Proporcionar suficiente refuerzo que garantice la interacción losa viga de cimentación	Revisión del acero de refuerzo
		Definir las cargas en la losa de cimentación	Ajustar la separación de las vigas para que coincida con muros o cargas concentradas	Evitar el exceso o defecto de compactación el material bajo la losa
		Determinar momentos positivos y negativos	La separación de las vigas no deber ser mayor a 6 m	
		Diseñar estructuralmente el refuerzo la losa Determinar la altura de las vigas y el refuerzo adecuado		
Zapatas perimetrales continuas, muros de cimentación o muros de sótano	Proporciona vigas o muros capaces de evitar levantamiento diferencial		Para sótanos fundir la losa de contrapiso tan tarde como sea posible para permitir "rebote" del suelo	Inspección estándar de construcción
	Proporciona suficiente esfuerzo al suelo que contrarresta la expansión			

Anexo 5. Tabla de diseños más utilizados de cimentación en los suelos expansivos. Fuente: (Segura Segura, C. A. 2009).

Grado de expansividad	Índice de plasticidad
Leve	0-15
Medio	10-35
Alto	20-55
Muy alto	>55

Anexo 6. Método de Holtz y Gibbs, en función del IP

Peligro de hinchamiento	Índice de plasticidad
Leve	>12
Medio	0-12
Alto	<10

Anexo 7. Método de Holtz y Gibbs, en función del SL.

Grado de Expansión	Contenido de coloide (<0.001mm) en %	Índice Plástico	Límite de contracción	% Expansión bajo carga de 1.0 psi
Muy alto	> 28	>35	<11	>30
Alto	20 –13	25 – 41	7 – 12	20 –30
Medio	13- 23	15 – 28	10 –16	10 – 30
Bajo	>15	<18	>15	<10

Anexo 8. Clasificación de suelos expansivos basado en el % coloides, IP y SL.

Grado de Expansión	Índice Plástico	Límite de contracción	Límite Líquido
Bajo	< 18	> 15	20-35
Medio	15 -25	10 -15	35-50
Alto	25 - 41	7-12	50-70
Muy Alto	> 35	< 11	> 70

Anexo 9. Grado de expansión, método Holtz, Dakshanamurthy y Raman.

Expansividad	LC	Ip	Li	% N200	% < 0.001 mm	Actividad (Skempton)	Sp (Seed) %	Lambe kg/cm2	Presión de hinchamiento kg/cm2	% de hinchamiento
Baja	>15	<18	<30	<30	<15	<0.5	0-1.5	<0.8	<0.3	<1
Media	12-16	15-28	30-40	30-60	13-23	0.5-0.7	1.5-5.0	0.8-1.5	0.3-1.2	1-5
Alta	8-12	25-40	40-60	60-95	20-30	0.7-1.0	5-25	1.5-2.3	1.2-3.0	3-10
Muy alta	<10	35	>60	>95	>30	>1.0	>25	>2.3	>3	>10

Anexo 10. Resumen de criterios de expansividad. Fuente (R. Ortiz, 1975)

Grado	Expansividad	% Finos	LL	Lambe (Kpa)	Presión de hinchamiento	(Kpa)% de Hinchamiento
I	Baja	< 30	< 35	< 80	< 25	< 1
II	Baja a Media	30 - 60	35-50	80 - 150	25 - 125	1 - 4
III	Media a Alta	60 - 95	60 - 65	150 - 230	125 - 300	4 - 10
IV	Muy Alta	> 95	> 65	> 230	> 300	> 10

Anexo 11. Relación de grado de expansividad y parámetros geotécnicos. Fuente: (González de Vallejo, 2002)


Grado de Expansión	% Finos	LL	SPT	Expansión libre [%]	Presión de Hinchamiento
Bajo	< 30	< 30	< 10	< 1	<0.5
Medio	30 - 60	30 - 40	10 - 20	1 - 5	1.5 - 2.5
Alto	60 - 95	40 - 60	20 - 30	3 - 10	2.5 - 10
Muy Alto	> 95	> 60	> 30	> 10	> 10

Anexo 12. Grado de expansividad. Fuente: (Chen, 1

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Luis Rubén Ordóñez Jiménez** portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105193478. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“SUELOS COLAPSABLES, CARACTERISTICAS, METODOS DE IDENTIFICACION, MEJORAMIENTO Y POSIBLES USOS”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **06 de agosto de 2021**

F: 

Luis Rubén Ordóñez Jiménez
C.I. 0105193478