



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Efecto de NanoSiO₂ sobre los
límites de consistencia en
arcillas del exLago de Texcoco**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERA GEOLÓGA

P R E S E N T A

CASTILLO GALVÁN ILCE NALLELY

DIRECTORA DE TESIS

DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de estar en una de las mejores universidades de Latinoamérica, por ofrecerme un mundo de conocimientos y oportunidades.

Dra. Silvia Raquel García Benítez le agradezco por permitirme formar parte de su equipo de trabajo en el Instituto de Ingeniería. Gracias por su apoyo, tiempo, comprensión y sobre todo por tenerme confianza y creer en mí. Su guía y sus consejos siempre los atesoraré.

Al **M. I. Carlos Padilla** y a todo el equipo del laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería por su ayuda en la realización de las pruebas en el laboratorio.

A cada uno de mis maestros que compartieron sus conocimientos y siempre me apoyaron en mi formación académica. En particular a mis sinodales **el Dr. Joaquín Aguayo Camargo, Ing. Javier Mancera Alejándrez, Ing. Gabriel Salinas Calleros e Ing. Luis Arturo Tapia Crespo**. Por su tiempo y dedicación al revisar este trabajo.

Gracias a mi familia, a mi madre **Luz María Galván**, a **Cesar Hernández** y a mi hermano **Jhoseth Castillo** gracias por su apoyo ilimitado sin ustedes no estaría concluyendo esta etapa de mi vida. Y a **Iker Torres** por su amor incondicional.

Y por último pero no menos importante agradezco a mis amigos que formaron parte de esta gran experiencia que sin duda ha sido la mejor.

CONTENIDO

Resumen	ix
Abstract.....	ix
1 Introducción	1
2 Marco geológico de los suelos arcillosos del Valle de México	3
2.1 Zonificación estratigráfica de la Cuenca del Valle de México	7
2.1.1 Zonificación geotécnica de la Cuenca del Valle de México (VM).....	10
2.2 Mineralogía de los suelos del Valle de México	12
2.3 Suelos diatomáceos del Valle de México	15
2.3.1 Diatomeas	15
2.3.2 Características geotécnicas de los suelos diatomáceos del Valle de México.....	17
3 PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS ARCILLOSOS	23
3.1 Clasificación de los suelos.....	23
3.2 Minerales constitutivos de las arcillas	27
3.2.1 Tipos de enlaces atómicos	32
3.3 Propiedades físico-químicas de las arcillas	33
3.4 Propiedades índice de los suelos.....	36
3.4.1 Distribución granulométrica	40
4 Índice de plasticidad	43
4.1 Límites de consistencia	43
4.1.1 Índice de liquidez y actividad	45
4.1.2 Generalidades de los límites de Atterberg.....	46
4.2 Determinación de los límites de Atterberg.....	47
4.3 Carta de plasticidad.....	51
4.4 Límites de Atterberg en suelos contaminados	52
5 Nanotecnología	57
5.1 Nanociencia	57
5.2 Nanotecnología	57
5.3 Escala nanoscópica.....	58

5.4	Nanomateriales	60
5.5	NanoSiO ₂	62
5.6	Mejoramiento del suelo a través de la nanotecnología.....	63
6	Metodología y resultados	71
6.1	Descripción del sujeto de estudio	71
6.1.1	Conjunto de Muestras A	72
6.1.2	Conjunto de Muestras B.....	75
6.2	Desarrollo de las pruebas de laboratorio	77
6.2.1	Contenido de Agua W%	79
6.2.2	Densidad de sólidos.....	80
6.2.3	Granulometría.....	82
6.2.4	Incorporación de nanosustancia a la masa arcillosa	84
6.3	Resultados	85
6.3.1	Sobre el límite líquido.....	86
6.3.2	Resultados del límite plástico	88
6.3.3	Resultados sobre el índice plástico y el índice de liquidez	91
6.4	Notas sobre los resultados.	94
7	Conclusiones.....	97
8	Referencias	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cuenca del Valle de México (Tomada de Santoyo et al., 2005).....	4
Figura 2.2 Formación de los lagos principales del Valle de México. (Tomada de Santoyo et al., 2005).	5
Figura 2.3 Representación geológica de la Cuenca de México (Tomada de Santoyo et al., 2005).	7
Figura 2.4 Estratigrafía de los primeros 150 m debajo de la Ciudad de México. (Tomada de Santoyo et al., 2005).	9
Figura 2.5 Zonificación geotécnica de la Cuenca de México (Tamez et al., 1987. Modificada por Santoyo et al., 2005).	12
Figura 2.6 Principales tipos de diatomeas de los sedimentos de la Cuenca de México. (Tomada de Almanza et al., 2013).	17
Figura 2.7 Módulo de compresibilidad volumétrica para varias arcillas, donde p_c es la carga de preconsolidación (Tomada Marsal & Mazari, 1959).	20
Figura 3.1 Fracciones constituyentes del suelo (Dominio público de internet).	23
Figura 3.2 Clasificación de suelos de acuerdo a AASHTO. (Tomada de AASHTO, 1987).	24
Figura 3.3 Diagrama ternario para clasificar suelos de acuerdo al USDA. (Tomada de USDA, 1999).	25
Figura 3.4 A) Unidad y B) lámina silícica de las arcillas (Tomada de Budhu, 2010).	28
Figura 3.5 Unidad y B) Lámina alumínica (Tomada de Budhu, 2010).	29
Figura 3.6 Montmorillonita (Tomada de Varadan et al., 2010).	30
Figura 3.7 Representación estructural de los diferentes minerales constitutivos de las arcillas (Tomada de Budhu, 2010).	32
Figura 3.8 Sistema agua-arcilla (Tomada de Le et al., 2012).	35
Figura 3.9 Doble capa difusa en un sistema arcilla-agua (Tomada de Mitchell & Soga, 2005).	36
Figura 3.10 Constitución del suelo (Tomada de Díaz-Rodríguez, 2014).	37
Figura 3.11 Gráfica semilogarítmica de distribución granulométrica. 1. Suelo bien graduado. 2. Suelo uniforme. 3. Suelo mal graduado (Modificada de Díaz-Rodríguez, 2014).	41
Figura 4.1 Estados y límites de consistencia del suelo (Tomada de Smith & Smith, 1998).	45
Figura 4.2 Copa de Casagrande y ranurador estándar (Tomada de Budhu, 2010).	47
Figura 4.3 Obtención del límite líquido con la copa de Casagrande.	48
Figura 4.4 Gráfica semilogarítmica para determinar el límite líquido.	49
Figura 4.5 Rollitos de 3 mm, para determinar el límite plástico del suelo.	49
Figura 4.6 Cono de penetración para la obtención del límite líquido. (Tomada de Smith & Smith, 1998).	50
Figura 4.7 Carta de plasticidad (Tomada de ASTM D-2487).	51

Figura 4.8 Variación en los límites de Atterberg en el suelo contaminado (Tomada de Rahman et al., 2010).	54
Figura 4.9 Impacto en los límites de Atterberg en suelos contaminados con petróleo crudo. (Tomada de Ibunkun et al., 2014).	54
Figura 5.1 Escala nanométrica (Tomada de National Nanotechnology Initiative).	59
Figura 5.2 Nanomateriales. (Tomada de Ashby et al., 2009).	61
Figura 5.3 Comportamiento del suelo con la adición de diferentes contenidos de nanoSiO ₂ . (a) Curvas tensión-deformación (UCS). (b) Módulo elástico. (c) curva de esfuerzo desplazamiento a $\sigma_n = 300$ KPa (Resistencia al corte). (Tomada de Changizi & Haddad, 2015).....	64
Figura 5.4 Comportamiento del suelo en la adición de nanoarcilla. A) Efecto en los límites de Atterberg. B) Prueba CBR para muestras que contienen nanoarcilla. C) Prueba de compresión no confinada para muestras con nanoarcilla. D) El proceso de resistencia al corte en prueba de corte directo. (Tomada de Mohammadi & Niazián, 2013).	66
Figura 5.5 Comportamiento de un suelo lacustre, blando y de alta plasticidad a la adición de nanSiO ₂ . (Tomado de García et al., 2017).	67
Figura 5.6 Comportamiento en la adición de nanoalúmina al suelo estabilizado con cemento/cenizas. a. En la resistencia a la compresión. b. Resultados en el índice de plasticidad. (Tomada de Huan-Lin et al., 2012).	68
Figura 5.7 Índice de hinchazón de montmorillonita con concentraciones variables de nanopartículas en función de la concentración de NaCl y KCl. (Tomada de Pham & Nguyen, 2014).....	69
Figura 6.1 Fotografía SEM a 100 micrómetros, se observa una diatomea céntrica características de los sedimentos del ex-Lago de Texcoco.	72
Figura 6.2 Ubicación en la carta de plasticidad de las Muestras A.	73
Figura 6.3 Muestra A, suelo de 0 a 20 cm de TOP a BOTTOM de tubo.	73
Figura 6.4 Muestra A, suelo a la mitad de tubo.	74
Figura 6.5 Muestra A, suelo de 37 a 60 cm de TOP a BOTTOM de tubo.	74
Figura 6.6 Primer subconjunto de las Muestras B. a) Shelby. b) suelo remoldeado.	75
Figura 6.7 Segundo subconjunto. a) Muestra extraída. b) suelo remoldeado.	76
Figura 6.8 Tercer subconjunto. a) Muestra extraída. b) suelo remoldeado.	76
Figura 6.9 Ubicación en la carta de plasticidad de Casagrande de las Muestras B.....	77
Figura 6.10 Secuencia de actividades.	78
Figura 6.11 Momento de extracción de las muestras para los fines especificados en este trabajo.	79
Figura 6.12 Variación en el contenido de agua natural para las Muestras A y B.	80
Figura 6.13 Desarrollo de la prueba de densidad de sólidos.....	82
Figura 6.14 Densidad de sólidos de la Muestra B. a) Primer subconjunto. b) Segundo subconjunto.	82

Figura 6.15 Desarrollo de la prueba de granulometría para el primer subconjunto de B. a) Lavado de la muestra. b) Suelo que pasó la malla No. 200 y suelo que no pasó la malla No.200.....	83
Figura 6.16 Segundo subconjunto de B. a) Suelo en estado natural. b) Muestra con 5% de nanoSiO ₂ . c) Muestra con 9 % de nanoSiO ₂ . d) Muestra con 11 % de nanoSiO ₂	84
Figura 6.17 Preparación de las muestras nanomodificadas con nanoSiO ₂ : etapa de mezclado.....	85
Figura 6.18 Desarrollo para determinar los límites de Atterberg.	85
Figura 6.19 Comportamiento del límite líquido en las Muestras A. Muestra ID “a” (profundidad. 10.40-10.505 m), muestra ID “b” (profundidad 10.505-10.61 m), muestra ID “c”, muestra ID “d” (profundidad 10.61-10.76 m), muestra ID “e” (10.76-10.87 m).....	86
Figura 6.20 Comportamiento del límite líquido en el conjunto de Muestras B. Primer subconjunto (prof 3.50-3.65 m). Segundo subconjunto (prof. 16.40-16.55 m). Tercer Subconjunto de B (prof. 8.30-8.45 m).	87
Figura 6.21 Comportamiento del índice de flujo para las Muestras A.	88
Figura 6.22 Comportamiento del índice de flujo para las Muestras B.	88
Figura 6.23 Comportamiento del límite plástico en las Muestras A.....	89
Figura 6.24 Comportamiento del límite plástico en las Muestras B.	90
Figura 6.25 Variación del índice plástico en las Muestras A, tanto en suelos naturales como en nanomodificados.	92
Figura 6.26 Variación del índice plástico en las Muestras B, tanto en suelos naturales como en nanomodificados.	92
Figura 6.27 Variación del IL para las Muestras A. a) Muestra ID “b”. b) Muestra ID “c”. c) Muestra ID “d”. d) Muestra ID “e”.....	93
Figura 6.28 Variación del IL para las Muestras B. a) Primer subconjunto de B. b) Segundo subconjunto de B. c) Tercer subconjunto de B.....	94
Figura 6.29 Fotografía SEM de una muestra de suelo del ex-Lago de Texcoco con 5 % de nanoSiO ₂ (Tomada en el laboratorio del SEM en la UAM Azcapotzalco.....	95
Figura 6.30 Fotografía SEM de una muestra de suelo del ex-Lago de Texcoco con nanoSiO ₂ (Tomada en el laboratorio del SEM en la UAM Azcapotzalco).	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición mineralógica de las arcillas de la Cuenca de México. (Modificada de Carreón-Freyre et al., 2006).	14
Tabla 2.2 Sondeos de la zona de lago, la cual no presenta sobrecargas en la superficie y ni sobreexplotación de los acuíferos (Tomada de Marsal & Mazari, 1959).	19
Tabla 3.1 Clasificación de suelos de acuerdo al SUCS (Tomada de Tamez, 2001).	27
Tabla 3.2 Relación de los límites de Atterberg con el tipo de catión absorbido (Tomada de Lambe & Whitman, 1969). Datos de (Cornell, 1951).	34
Tabla 3.3 Número de mallas y su respectiva abertura en mm, para un análisis granulométrico (Tomada de Díaz-Rodríguez, 2014).	40
Tabla 4.1 Límites de consistencia en suelos contaminados. Modificada de (Tomada de Galindo, 2012).	53
Tabla 5.1 Resistencia a la compresión de ladrillos con nanoarcilla y ladrillos normales. (Tomada de Niroumand et al., 2013).	66
Tabla 6.1 Características de las Muestras A.	75
Tabla 6.2 Características de las Muestras B.	77
Tabla 6.3 Resultados de la prueba de granulometría.	83
Tabla 6.4 Resultados del conjunto de Muestras A y B, tanto para muestras naturales como muestras nanomodificadas.	94

RESUMEN

Se estudia la modificación de las propiedades índice de un suelo arcilloso mediante la adición de nanoSiO₂. Las muestras que se analizan en esta investigación fueron extraídas de terrenos del ex-Lago de Texcoco, suelos elegidos por sus características excepcionales: muy alta plasticidad y elevada concentración de microorganismos. Se trabaja sobre los Límites de Atterberg pero se recurre a índices alternativos como el de Fluidez y Liquidez para concluir sobre el impacto de la nanosustancia en la resistencia del material. A partir de los resultados se resuelve que existe una evidente alteración de la consistencia de la arcilla y se infiere que podría deberse a dos posibles mecanismos a) incremento de la fuerza de atracción entre partículas y/o b) disminución de la permeabilidad (porosidad).

ABSTRACT

The modification of index properties of a clay soil is studying by addition of nanoSiO₂. The samples used for this investigation were extracted from the ex-Lake of Texcoco, soil extractes for their exceptional characteristics: high plasticity and high concentration of microorganisms. Work is done of Atterberg's limits but alternative indicator such as fluidity and liquidity are used to conclude on the impact of the nanosubstance on the resistance of the material. From the results it's resolved that there is an evident alteration of the clay's consistency and it's inferred that it could be due to two possible mechanisms: a) increase in the attraction force between particles or b) decrease of permeability (porosity).



1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo de tesis aborda la modificación de los Límites de Atterberg de una arcilla de alta plasticidad por medio de la adición, en diferentes porcentajes, de nano-sílice (nano-SiO₂). Esta intención responde a la necesidad de cimentaciones seguras y eficientes que soporten los proyectos de ingeniería moderna. La investigación se basa en los métodos para el mejoramiento de algunas propiedades (con materiales estabilizantes de todo tipo) que han sido exitosos en suelos del ex – Lago de Texcoco. La consistencia del suelo, descrita por los límites mencionados, está relacionada con la resistencia de los suelos a la deformación y a la ruptura, de ahí la importancia de esta investigación.

En este trabajo se aborda la novedosa tendencia a estudiar modificaciones de los materiales en lo *nano* (del griego *vávoç*, que significa «*enano*»). Estudiar a la arcilla como un sistema complejo cuyas propiedades específicas dependen del tamaño de la escala de medición es una visión radicalmente distinta de la tradicional manera de analizar a los suelos y las rocas, por lo que las evidencias del comportamiento de los materiales a escala nanoscópica desafían el actual conocimiento científico del ingeniero geotecnista.

La propuesta utiliza muestras de suelos del ex-Lago de Texcoco (Estado de México, México) para estudiar los Límites Líquido y Plástico, su correspondiente Límite de Plasticidad, Índice de Fluidez y Índice de Liquidez, parámetros elegidos por su relación directa con la resistencia (a la compresión simple y al corte directo) de los materiales arcillosos de la zona. Además de generar respuestas que se pueden integrar a otros esfuerzos académicos en el mundo para, en un futuro, ser capaces de *diseñar* estratos con consistencias y permeabilidades específicas desde lo *nano*, esta investigación señala necesidades de actualización al ejercicio de la caracterización geotécnica sobre todo cuando se tratan materiales excepcionales.

Sin duda, la integración de las ciencias *Geo* a la nanotecnología impactará profundamente en el tipo de sub- y súper-estructuras que somos capaces de desarrollar.

2 MARCO GEOLÓGICO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS DEL VALLE DE MÉXICO

La cuenca de México es una cuenca endorreica, localizada en la parte centro-oriental de la provincia fisiográfica de la faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) (Ferrari et al., 2012). Territorialmente abarca la Ciudad de México, prácticamente la totalidad del área metropolitana de la Ciudad (Estado de México), la parte sur del estado de Hidalgo y parte de la zona occidental de Tlaxcala; geográficamente está limitada por un conjunto de sierras volcánicas, al norte por las sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca, al este por los llanos de Apan y la Sierra Nevada (Ixtacihuatl y Popocatepetl con una altura media de 5300 m), al sur por las Sierras del Ajusco y Cuauhtzin (también llamada Chichinautzin), y al oeste por las Sierras de las cruces, Monte Alto y Monte Bajo. En el centro de la cuenca existen Sierras aisladas, en dirección oeste-este, se encuentra la Sierra de Guadalupe, y en el sur, corre la Sierra de Santa Catarina en dirección Este-Oeste (Figura 2.1).

La cuenca tiene una superficie total de 7160 km² (3080 km² corresponden a la zona montañosa con altitudes superiores a 2430 msnm y 2050 km² a las partes bajas), una longitud de 110 km en dirección N-S y un ancho en dirección E-O de 80 km (Marsal & Mazari, 1959).

El Valle de México (VM) corresponde a la parte plana de la cuenca (llanura lacustre), siendo la parte más baja, con una elevación aproximada de 2230 msnm, que en el pasado era un gran lago, durante los periodos geológicos de mayor precipitación llegó a medir 80 km de norte a sur y unos 45 km de oriente a poniente (Santoyo et al., 2005) gracias al aporte de ríos, manantiales y pequeños arroyos. Estos cuerpos de agua dieron origen a varios cuerpos lacustres, como el lago Zumpango y Xaltocan en la parte norte; San Cristóbal y Texcoco al centro; Xochimilco y Chalco al sur, que dependiendo de la época de inundación o sequía, estos dos últimos lagos se unían o separaban. En la actualidad existen pequeñas porciones de los lagos de Zumpango, Texcoco y Xochimilco ya que han ido secando progresivamente durante los últimos 400 años más o menos (Figura 2.2).

Al lago de Texcoco se le atribuye alta salinidad (además de su formación por la influencia de los manantiales) en comparación de los cuerpos de agua de Xochimilco y Chalco donde existía poco contenido de minerales disueltos. En 1789 la cuenca se abrió artificialmente con el tajo de Nochistongo para drenar la zona lacustre (Marsal & Mazari, 1959).

De acuerdo con su geomorfología, la cuenca del VM se puede dividir en tres regiones. Para fines de esta investigación nos centraremos en la zona baja correspondiente al ex-Lago de Texcoco, la cual, tiene una altitud mínima y máxima de 2236 y 2250 msnm respectivamente.

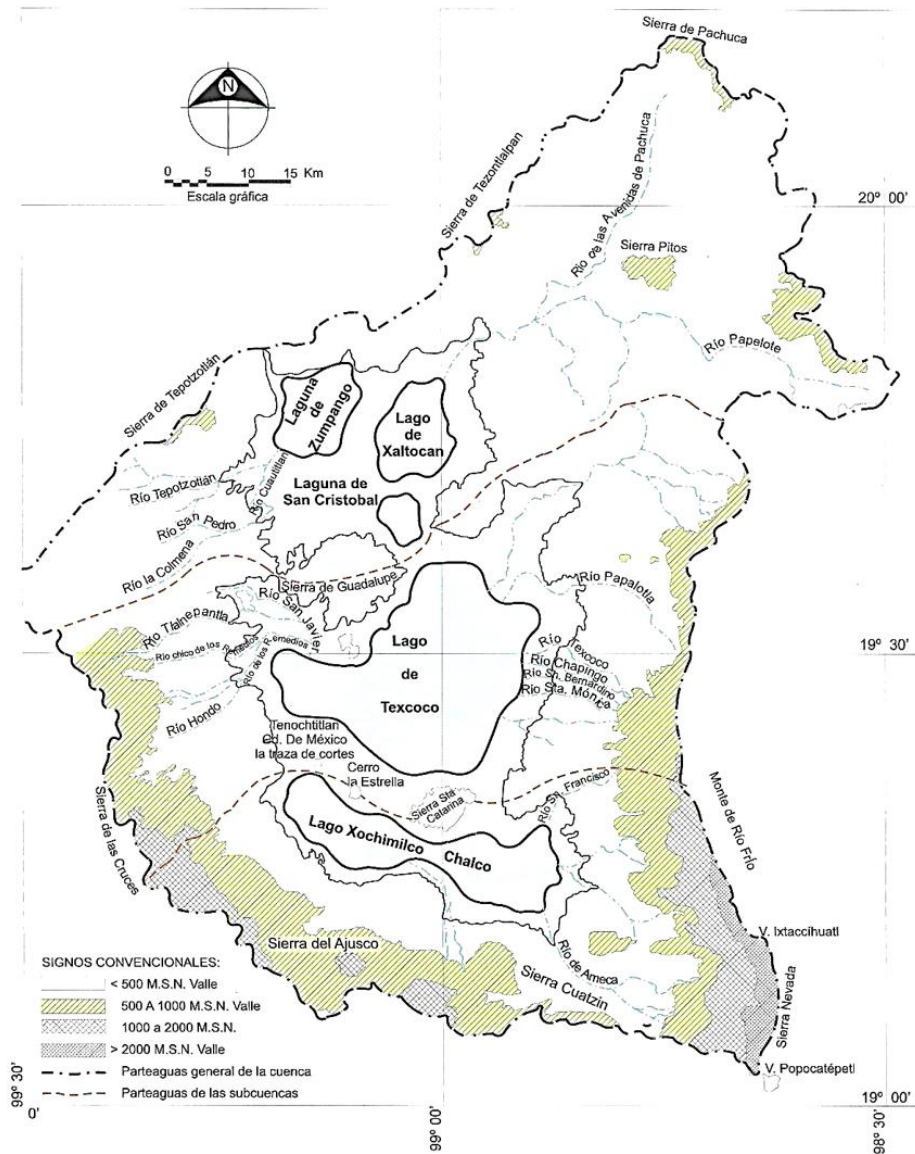


Figura 2.1 Cuenca del Valle de México (Tomada de Santoyo et al., 2005).

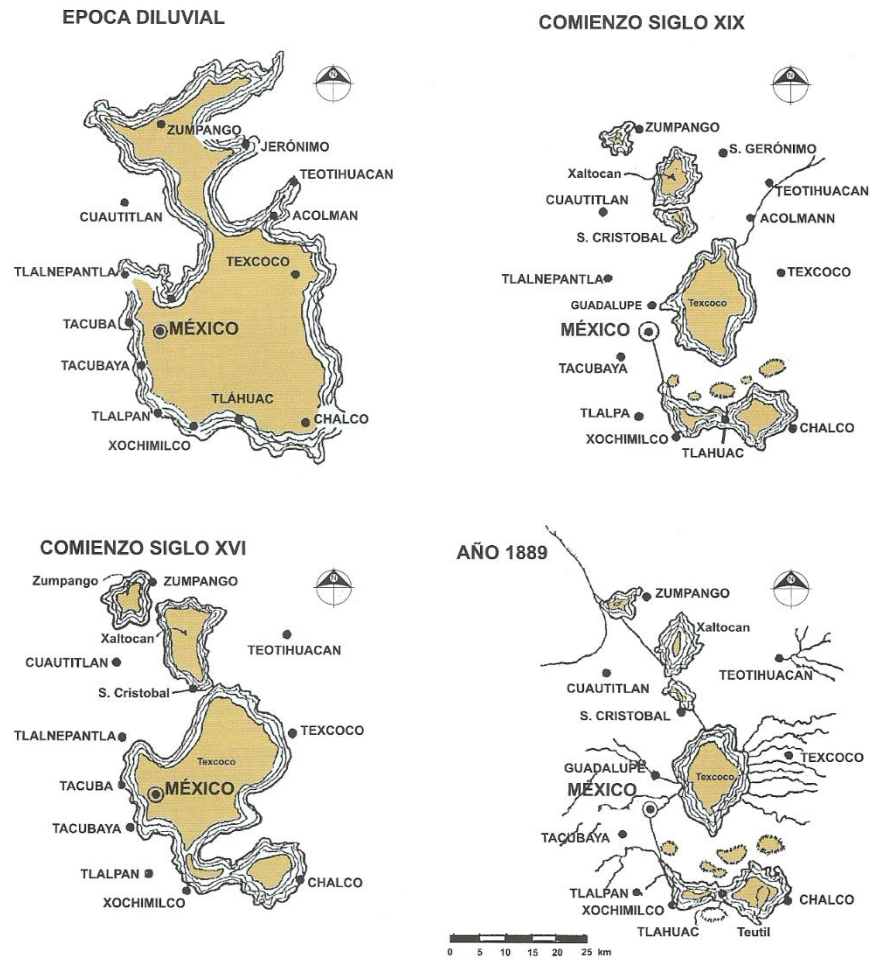


Figura 2.2 Formación de los lagos principales del Valle de México. (Tomada de Santoyo et al., 2005).

Mosser (1975) sostiene que la geomorfología de la cuenca del VM se debe a siete principales eventos geológicos. La primera fase fue durante el Paleógeno, donde se originaron rocas volcánicas, que no afloran en la superficie (a profundidad de 2265 m), la segunda fase ocurre en el Oligoceno Medio, se caracteriza por la presencia de varias coladas de lava de composición ácida e intermedia (en Huehuetoca y Coyotepec) y la tercera fase se desarrolla en el Oligoceno Superior, donde se desarrolla la base de las Sierras Mayores del este y oeste de la actual cuenca. Su principal composición es ácida y forma grandes depósitos de dacitas. Algunas pequeñas elevaciones aisladas como Peñón de los Baños, Chapultepec, Tlapacoya, Zacaltépetl corresponden a este período.

El inicio de la cuarta fase se ve marcada por la aparición de la Sierra de Guadalupe la cual corresponde al Mioceno, se caracteriza por la emisión de grandes masas de lavas intermedias y ácidas. Otras estructuras asociadas son las sierras de Tepotzotlán, Los Pitos, Patlachique y El



Tepozán. Al finalizar el Mioceno empieza la quinta fase volcánica, donde se originan las Sierras Mayores; en el oeste la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo; al este la Sierra Nevada y Río Frío. Estas Sierras son de composición intermedia y ácida.

La sexta fase volcánica se desarrolla durante el Pleistoceno, donde abundan materiales de composición andesito-basálticos que formaron los cerros de Chimalhuacán, Chiconautla, el Peñón del Marqués, el Cerro de la Estrella y el Cerro Gordo. La última fase culminó en el Cuaternario Superior con la formación de la Sierra de Chichinautzin en la parte sur del antiguo VM, dando como resultado la edificación de varios conos, derrames lávicos y material piroclástico.

Gracias a este conjunto volcánico quedan establecidos los rasgos morfológicos actuales que dieron origen a la Cuenca del VM, transformando el valle en una cuenca cerrada en la que se obstruyó el drenaje al río Balsas y se dio inicio a la sedimentación lacustre en el sector central, la mayor parte de la Ciudad de México. En el fondo de la cuenca se depositaron diferentes materiales como proluviales (limos y arenas), los lacustres (arcillas y limos), además de arenas y cenizas volcánicas que al intemperizarse forman arcillas altamente compresibles.

El relieve irregular de la cuenca se fue sepultando gracias al acarreo fluvial y a los depósitos de materiales volcánicos, por lo que se desarrolló una notable variación del espesor del relleno, con mayor profundidad de norte a sur (Auvinet et al., 2017). Las últimas manifestaciones de vulcanismo son la del Xitle, al pie del Ajusco que apareció hace 2400 años aproximadamente, y la erupción del Popocatepetl en 1920 (Marsal & Mazari, 1959).

Las exploraciones profundas en el VM han ayudado para conocer la hidrogeología de la cuenca (Morales-Casique et al., 2014):

- a) La primera unidad corresponde a un acuitardo de 0 a 70 m, compuesto por sedimentos lacustres arcillosos.
- b) Acuífero superior que consisten de materiales vulcanoclásticos, en el intervalo de 70 a 50 m de profundidad.
- c) De 500 a 750 m corresponde a un acuífero de lavas y flujos piroclásticos.
- d) En el intervalo de 750 m a 1140 m existe un acuitardo compuesto por ignimbritas, arcillas y materiales vulcano clásticos.
- e) Entre 1040 y 2008 m se encuentra un acuífero en rocas volcánicas con intercalaciones de acuitardos.

Por otro lado, la cuenca de México es una depresión volcano-tectónica de gran altitud que se ha llenado de productos volcánicos (lavas y depósitos piroclásticos), así como también de material epiclástico y depósitos lacustres. En la parte central de la cuenca se fueron depositando limos-arenosos, limos-arcillosos, emisiones de cenizas y piedra pómez provenientes de los volcanes del



- Costra seca (CS). Es el resultado del descenso del nivel del agua en el lago, el cual se secó y quedó consolidada.

b) Formación arcillosa superior (FAS)

Esta formación tiene un espesor que puede variar de los 25 a los 50 m; en él se determinan cuatro estratos principales, que dependen de su origen geológico, de los efectos de la consolidación inducida por sobrecargas superficiales y por el bombeo. Consiste de una secuencia de arcillas poco consolidadas del Pleistoceno y arcillas blandas a muy blandas.

- Arcilla preconsolidada superficial (APS).
- Arcilla normalmente consolidada (ANC). Se localiza en una profundidad donde ya no es afectada por las sobrecargas superficiales y por arriba de los suelos consolidados por bombeo, por lo que aún esta capa está en proceso de consolidación.
- Arcilla consolidada profunda (ACP). Arcillas que se ven afectadas por el bombeo excesivo para abastecer a la CdMx.
- Lentes Duros (LD). Los estratos anteriores pueden presentar intercalaciones de lentes duros, los cuales pueden ser costras de secado solar, ceniza volcánica o vidrio pómez; su espesor puede variar de unos centímetros hasta cerca de 2 m.

c) Capa dura (CD)

De acuerdo con Santoyo et al. (2005) es un depósito que se desarrolló en el período climático del interglacial Sangamon. En esta capa predominan limos arenosos con presencia de arcilla y gravas esporádicas con una cementación muy errática. Su espesor puede variar, es muy delgada en la zona centro del lago de Texcoco y en sus orillas puede tener 5 m, aumentando gradualmente hacia el poniente de la actual zona urbana y se reduce hacia el oriente, así mismo ocurre con su resistencia. Una característica de la capa dura es que tiene presencia de lentes de arcilla, formados en los períodos de humedad.

De acuerdo con Auvinet et al. (2017) la capa dura es un estrato a una profundidad de 30 m en la parte centro de la ciudad, el cual es usado para cimentar construcciones grandes mediante pilotes. Esta capa es un depósito de ceniza volcánica con granulometría similar a un limo, densa y cementada, con permeabilidad suficiente para funcionar como un acuífero y que desde el siglo XIX se empezó a explotar.

La CD es el resultado de dos erupciones volcánicas pumíticas del Cerro San Miguel (del actual cerro de La Palma) de hace aproximadamente 120 000 años (Mooser & Zuñiga, 2005).

d) Formación arcillosa inferior (FAI)

Esta formación está caracterizada por una secuencia de estratos de arcilla más consolidadas que la FAS, separados por lentes duros, presenta un espesor de 15 m al centro del lago y desaparece en sus orillas.

e) Depósitos profundos (DP)

Está constituida por arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcilla duras y carbonatos de calcio.

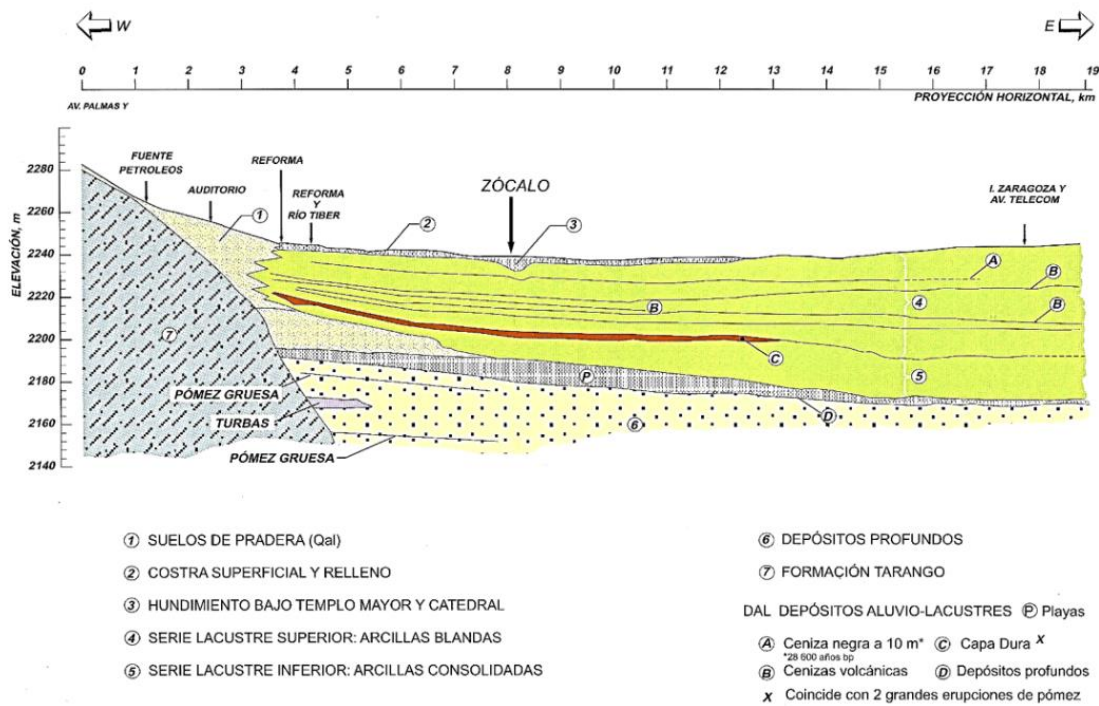


Figura 2.4 Estratigrafía de los primeros 150 m debajo de la Ciudad de México. (Tomada de Santoyo et al., 2005).

Zona de transición

Estos depósitos forman una franja entre los suelos lacustres y las sierras que rodean al valle o los aparatos volcánicos que sobresalen en la zona de lago. Los arroyos que bajaban de las barrancas y desembocaban en la planicie formaban deltas poco extensos, los sedimentos clásticos fluviales y aluviales se acumularon en el quiebre morfológico, intercalándose con las arcillas lacustres (Santoyo et al., 2005).

La formación Aluvial que pertenece al período del Cuaternario, se encuentran en al pie de la Sierras de las Cruces, de la Sierra de Chichinautzin y de las Sierras Nevadas. Estos depósitos se caracterizan por la alternancia de capas correspondientes a fases de acumulación de piroclastos,



residuos rocosos, material arenoso y limos; en ocasiones interestratificadas con lavas (Auvinet et al., 2017).

Esta transición se puede dar de dos formas:

- a) Transición interestratificada. Es característica de los suelos que se originaron en las barrancas (acumulación de acarreos fluviales descendentes de Las Lomas a la planicie), estos depósitos se encuentran en la orilla del antiguo lago de Texcoco, formando intercalaciones de arcilla lacustre con arenas y gravas de río. También se pueden encontrar al pie de Las Lomas, donde en sus partes más profundas contiene la capa dura, depósitos glaciares, laháricos, fluvio-glaciales y también depósitos aluviales recientes.
- b) Transición abrupta. Es una transición de las arcillas lacustres con rocas volcánicas, se encuentra en el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués, el cerro de la Estrella y el cerro del Tepeyac.

Zona de Lomas

En lo general esta zona se localiza al poniente de la Ciudad de México, hasta los límites del Estado de México. En la parte sur abarca las faldas de la Sierra Chichinautzin hasta el valle de Chalco y en el norte el Peñón de los baños, la Sierra de Guadalupe, los cerros de Chiquihuite y del Tigre, el cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina. La formación de Lomas del Poniente se caracteriza por materiales volcánicos andesíticos estratificados, los depósitos más antiguos presentan fracturamientos y fallamientos tectónicos. Los materiales naturales que se encuentran en la zona de Las Lomas al poniente son: Tobas y lahares fracturados, depósitos de arenas pumíticas y lahares de arenas azules, lahares poco compactados y depósitos glaciales y fluvio-glaciales.

2.1.1 Zonificación geotécnica de la Cuenca del Valle de México (VM)

El plano geotécnico de la Ciudad de México tiene sus bases en los trabajos realizados por Marsal y Mazari. La última versión del mapa se incorporó a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 2017. De acuerdo con el Manual de Diseño Geotécnico del Metro (COVITUR) se tiene la siguiente zonificación, (Tamez et al., 1987). En la Figura 2.5 se muestra la zonificación geotécnica modificada por Santoyo et al. (2005).

- a) Zona de lago. Las arcillas blandas que la constituyen tienen grandes espesores, su clasificación depende del espesor y de las propiedades de la costra superficial, así como de la consolidación inducida. Se divide en Lago Virgen (LV); Lago centro I (LCI), en general está sometido a sobrecargas por construcciones pequeñas; Lago Centro II (LCII), donde existen



arcillas fuertemente consolidadas por rellenos y grandes construcciones, arcillas blandas y arcillas muy blandas.

- b) Zona de transición. Según Marsal & Mazari (1959) la frontera entre la Zona de transición y la del lago es donde desaparece la serie arcillosa inferior y donde la primera Capa Dura está en los primeros 20 m de profundidad. Esta zona se divide en tres subzonas:
- Transición Alta (TAL). Está más cerca de la Zona de Lomas, tiene presencia de depósitos aluviales cruzados.
 - Transición Baja (TBA). Es esta zona la FAS, presenta intercalaciones de estratos limo-arenosos de origen aluvial, que se originaron durante las regresiones del antiguo lago.
 - Transición abrupta (TAB). Es el cambio entre la zona de lagos y los cerros aislados, presenta intercalaciones de las arcillas con lentes de minerales erosionados de los cerros, incluso hasta de travertino silicificado.
- c) Zona de Lomas (LOM). Estos suelos presentan condiciones de cementación y compactación irregulares.

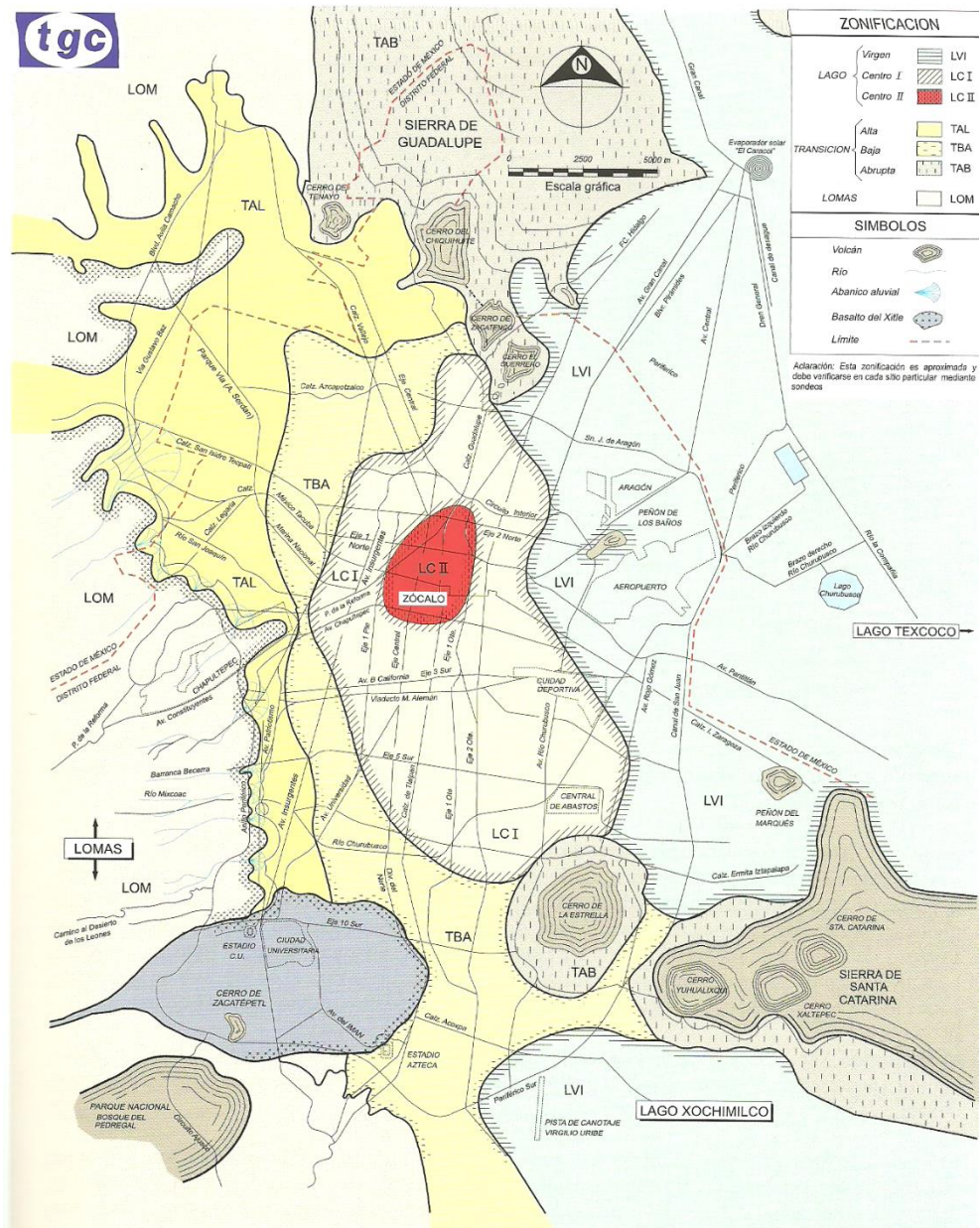


Figura 2.5 Zonificación geotécnica de la Cuenca de México (Tamez et al., 1987. Modificada por Santoyo et al., 2005).

2.2 Mineralogía de los suelos del Valle de México

La formación y características de los suelos del VM tienen que ver con los diferentes eventos climáticos que vivió la cuenca. Desde que la cuenca se cerró con los basaltos de la Sierra de Chichinautzin, existe evidencia de dos períodos interglaciales (calientes) y dos períodos de glaciación. Aproximadamente hace 400 000 a 600 000 años se originó el interglacial Yarmouth,



seguido de por el glacial Illinois, el tercer evento fue el interglacial Sangamon, terminando con la glaciación Wisconsin que termino hace 10 000 años. Por lo que los suelos se originaron durante el Pleistoceno y el Holoceno.

Como se sabe las arcillas blandas se originan por la depositación y alteración fisicoquímica de los materiales aluviales y de las cenizas volcánicas en ambientes lacustres (abundantes microorganismos y vegetación acuática). La cuenca de México se vio afectada por algunos períodos de intensa sequía, como consecuencia se formaron costras endurecidas por deshidratación (secado solar) al disminuir el nivel de agua del lago y si a esto le agregamos actividad volcánica se formaban costras duras cubiertas por arenas volcánicas; otra interrupción de los depósitos de la CM se vio afectada por actividad volcánica, cubriendo toda la cuenca con mantos de arenas volcánicas. Con pruebas de carbono 14 se sabe que los sedimentos de la CM se depositaron con una velocidad de un metro por cada cuatro mil años (Santoyo et al., 2005).

En algunas partes del valle se formaron manchas delgadas de sedimentos hidrotermales (rocas calizas), formadas por la precipitación de carbonatos y solidos del escurrimiento de aguas calientes. Estos sedimentos aparecen como lentes de gran dureza intercalados con arcillas, este tipo de depósitos se han encontrado en el cerro de la Estrella (a 20 m de profundidad y hasta 2 m de espesor), en El Pocito de la Villa de Guadalupe, el Peñón de los Baños, al pie del volcán San Nicolás, entre otros (Santoyo et al., 2005).

El comportamiento mecánico heterogéneo y complejo (fallamiento frágil en materiales plásticos, compresibles y con altos porcentajes de humedad) de las arcillas mexicanas, ha obligado a tener una amplia investigación sobre ellas desde mediados del siglo pasado, la composición mineralogía de las arcillas de la cuenca se ha estudiado por diferentes investigadores y como resultado se tiene un contraste entre cada uno de ellos. Peralta & Fabi (1989) determinaron que la diferencia mineralógica está relacionada con la profundidad de la muestra a analizar y concluye que las arcillas de la CM son materiales amorfos (Carreón-Freyre et al., 2006). En la Tabla 2.1 se resume la composición mineralógica de la fracción arcillosa por diferentes autores.



Tabla 2.1 Composición mineralógica de las arcillas de la Cuenca de México. (Modificada de Carreón-Freyre et al., 2006).

Autor	Composición mineralógica de la fracción arcillosa (%)
Zeevaert, 1953	Montmorillonita (20 %), cenizas, diatomeas y conchas microscópicas (65 %), feldespatos, cuarzo y ferromagnesianos (15 %). Prof: 0-25 m.
Marsal y Mazari, 1959	Montmorillonita (13 %), Illitas (54 %), caolinita (4 %), dickita (2 %), halloysita (1 %), nontronita (3 %), fosiles (3%), CaCO ₃ (3-21 %), materia orgánica (1-7 %) y material no determinado (20 %).
Lo, 1962	Amorfos- fragmentados de diatomeas, geles de silicoaluminato, material volcánico alterado, montmorillonita de pobre cristalización, calcita (10 %), materia orgánica (4 %). Prof. 8 m, centro de la Ciudad de México.
Leonards y Girault, 1961; Girault, 1964	Alófanos (amorfos) en su mayoría, poca calcita, materia orgánica (8-10).
Peralta y Fabi, 1989	Fracción arcillosa fina: montmorillonita, calcita, plagioclasas, probable cuarzo-alfa, cristobalita, probable caolinita y/o clorita. Arcillas (2-0.08 micras): esmectita (a veces Montmorillonita), clorita y/o caolinita mal cristalizada, mica y nontronita. Prof. 3.1 a 31.5 m. Centro de la Ciudad de México.
Warren y Rudolph, 1997	Alófano rico en sílice, montmorillonita (30 %), halloysita (solo a 1.5 m), kaolinita e illita (no se encontró imogolita, pH>5). Prof: 0-10 m, Norte de la Cd. De México.
Díaz-Rodríguez et al., 1998	La fracción arcillosa corresponde entre 20 a 55 %, constituida de Montmorillonita, illita y cristobalita. Con polimorfos de sílice (ópalo biogénico, ópalo C-T, cristobalita y cuarzo polimorfo. Prof. 0-40 m, Centro de la Ciudad de México.
Mazari-Hiriart et al., 2000	Corrensita (interestratificada clorita-esmectita) (>90 %), trazas de cristobalita, material amorfo, halloysita (5-10 %).
Almanza-Hernández et al., 2013	Las series arcillosas son materiales heterogéneos formados principalmente por limos y arcillas de alta plasticidad con microorganismos (frústulas de diatomeas, valvas de ostrácodos, conchas de gasterópodos, etc.) y varios minerales (micas, silicio, ópalo, ferromagnesianos, etc.).

De acuerdo con Díaz-Rodríguez et al. (1998), los sedimentos lacustres de la Cuenca de México se pueden clasificar respecto a su origen en:



- Componentes alóctonos. Son minerales detríticos (originados por la meteorización y/o erosión de la cuenca), como plagioclasas, hornblenda, hiperstena, cristobalita, vidrio volcánico, minerales de arcillas, ceniza volcánica y materia orgánica.
- Componentes autóctonos. Entre los que encontramos precipitado de calcita bioquímica (valvas de ostrácodos y conchas de gasterópodo), sílice biogénica (frústulas de diatomeas), oolitos y materia orgánica.
- Componente diagenética. Como el ópalo-CT (cristobalita y/o tridimita), goetita, cristobalita, calcita y piritita; los cuales se forman por la alteración del vidrio volcánico o de la inestabilidad de sílice, ópalo, minerales ferromagnesianos, entre otros, después de ser depositados.

2.3 Suelos diatomáceos del Valle de México

2.3.1 Diatomeas

Las diatomeas son organismos eucariontes (presentan un núcleo), unicelulares, y su tamaño puede variar de 10 a 200 μm . Dado que son organismos acuáticos (ya sea de agua dulce o salada) y fotosintéticos por lo que no sobrepasan los 200 m de profundidad, son generalmente considerados algas. Una de las características principales de las diatomeas es que presentan una cubierta de sílice resistente a la degradación llamada frústulo; originada por la segregación de sílice, en formas de capas, ya que las diatomeas crecen en ambientes ricos en sílice (un factor importante para la presencia de sílice disuelta en cuerpos de agua es la existencia de actividad volcánica en el área); este esqueleto está constituida por dos mitades llamadas theca, en las diatomeas siempre existe una theca más grande que otra, a la de mayor tamaño se le denomina epitheca y a la menor hipoteca; la pieza principal de cada una se le denomina valva y al conjunto de las bandas que sirve para unir a las dos valvas que forma el frústulo se le llama cíngulo. La frústula de las diatomeas tiene forma simétrica y contienen una gran cantidad de vacíos. Losic et al. (2007) indican que un gran porcentaje ($\approx 60 - 70 \%$) del esqueleto de la diatomea es poroso.

Las diatomeas tienen un amplio registro fósil, se tienen registros desde el Cretácico (Harwood & Gersonde, 1990) hasta la actualidad. Pero probablemente su origen se remonta al Jurásico, aunque sin esqueleto silíceo (Meléndez, 1998). De acuerdo con Medln (1997) se estima un máximo probable de 240 Ma del origen de este grupo. Las primeras diatomeas fósiles son marinas y las formas dulceacuícolas aparecen durante el Cretácico Superior.

Las valvas de las diatomeas presentan ornamentaciones muy peculiares, de las cuales podemos distinguir a más de 10 000 especies diferentes, cada una con una morfología de sílice única que varía desde nanómetros hasta micrómetros (Losic et al., 2007). Dependiendo de la morfología de sus



frústula se clasifican en dos principales grupos, las diatomeas céntricas (son radialmente simétricas) y las pinnadas (son alargadas y presenta estrías al eje más largo de simetría). Independientemente de su geometría, el caparazón de las diatomeas puede tener diferentes formas.

Las diatomeas viven en casi todos los tipos de ambientes acuáticos y semi-acuáticos y las diferentes especies presentan ciertas características de acuerdo a las condiciones de su hábitat, donde influye la salinidad, el pH, la alcalinidad, nivel de nutrientes, la temperatura, luminosidad, turbulencia, cantidad de materia orgánica. Las diatomeas céntricas se desarrollan más en aguas marinas, específicamente en latitudes subpolares y templadas, mientras que las diatomeas pinnadas se encuentran más en agua dulce y en ambientes marinos profundos (López-Molina, 2009).

A la acumulación y compactación de restos de diatomeas en una escala de tiempo geológico se le denomina diatomita o tierra de diatomitas, la cual es una roca sílicea de origen sedimentario ligera y porosa. Está compuesta por 90 % de sílice y el resto consiste de elementos como el aluminio y óxidos de hierro. Este tipo de roca presenta una alta capacidad de absorción, gran superficie específica, poco volumen y densidad (Díaz-Rodríguez, 2011).

En diferentes partes del mundo existe un gran número de depósitos naturales de suelos con presencia de microfósiles (diatomeas); como es el caso de la Bahía de Osaka en Japón, en California (USA) y en la Ciudad de México, que gracias a las características geológicas y geomorfológicas de la FVTM, existen varios depósitos lacustres con sedimentos diatomáceos, relacionados con la actividad volcánica de la zona (López-Molina, 2009). En los lagos de Xochimilco y Chalco de la Cuenca de México; aún se pueden encontrar ejemplares de diatomeas vivas (Auvinet et al., 2017). También se han encontrado en los estados de Jalisco, Michoacán, Colima, Nayarit y el Estado de México.

De acuerdo con Mesri et al. (1975), al investigar muestras de suelo del VM con contenidos de agua entre 421-574 %, determinaron que entre un 55-65 % de la muestra total está constituida por microfósiles síliceos principalmente diatomeas de tamaño limo, Figura 2.6.

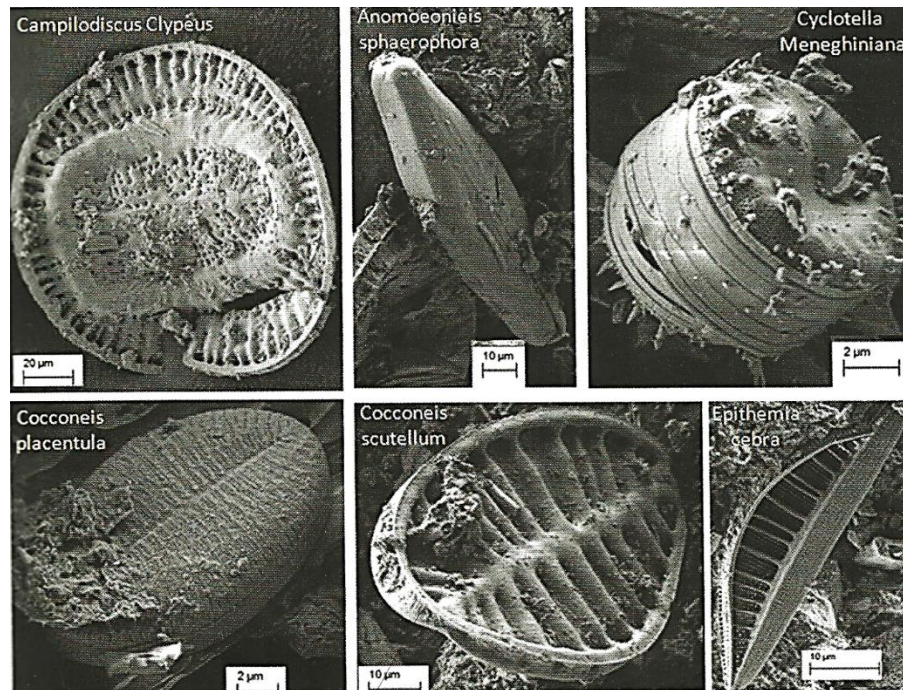


Figura 2.6 Principales tipos de diatomeas de los sedimentos de la Cuenca de México. (Tomada de Almanza et al., 2013).

2.3.2 Características geotécnicas de los suelos diatomáceos del Valle de México

Cuando los sedimentos tienen un alto contenido de esqueletos de diatomeas, producen depósitos de diatomitas. Mientras que, si el depósito presenta un contenido relativamente bajo de diatomeas sedimentadas, se le denomina suelos diatomáceos, sin embargo, el contenido de diatomeas es suficiente para influir en su comportamiento ingenieril (Shiwakoti et al., 2002). En general los suelos diatomáceos, están caracterizados por la mezcla de minerales arcillosos, compuesto orgánico o materiales granulares de diferente naturaleza.

Los suelos del VM son extremadamente complejos y son estudio de varios investigadores alrededor del mundo, ya que tienen un inusual comportamiento. Presentan una superficie específica muy alta ($S_s = 40-350 \text{ m}^2/\text{g}$); relación de vacíos ($e = 3-9$), esta relación no solo se debe por la presencia de diatomeas con alta porosidad interna, sino también, por la existencia de agregados formados por placas minerales delgadas, además de que está ligada con la baja velocidad de sedimentación y al rápido desarrollo de enlaces entre partículas. Los límites de Atterberg se caracterizan por ser valores altos: $LL = 110-4 \%$, $LP = 37-116 \%$ y el $IP =$ entre 73 y 342 %. Con una actividad (A) entre 1 y 8, y ángulo de fricción efectivo (ϕ) que varía entre 43° y 47° , además la velocidad de propagación de ondas de cortante es constante con la profundidad en los primeros 40 m ($V_s = 70-90 \text{ m/s}$) (Díaz-Rodríguez, 2011).



Superficie específica

Díaz-Rodríguez & Santamarina (2001) obtuvieron la superficie específica (S_s) del suelo del Valle de México. Midieron un valor de $S_s = 39.8 \text{ m}^2/\text{g}$ en condiciones secas mediante adsorción de N_2 y un valor de $S_s = 187 \text{ m}^2/\text{g}$ en condiciones húmedas mediante azul de metileno. De estos resultados se concluyó que la diferencia entre la superficie específica de ambos métodos de investigación se debe a la presencia de minerales expansivos; como la superficie específica se determina en la fracción fina del suelo, la cual corresponde a un 30 % del total, se calculó que la superficie específica de esta porción es de $540 \text{ m}^2/\text{g}$, el cual es característico de minerales expansivos. Además de que los altos porcentajes en los límites líquidos de los suelos del VM, reflejan su alta superficie específica de la fracción fina.

Límites de consistencia

Díaz-Rodríguez (2011), demostró que, a mayor proporción en el contenido de diatomeas en la composición de un suelo, los límites de consistencia aumentan. En los suelos del VM el índice de plasticidad (IP) a menudo supera el 300 %. La razón para el incremento en el límite líquido y el límite plástico de una mezcla suelo-diatomita se atribuye a la enorme capacidad de retención de agua de los esqueletos de las diatomeas. Sin embargo, en los suelos del VM, el índice de plasticidad disminuye ligeramente. El ángulo de fricción de los suelos disminuye a medida que aumenta el índice de plasticidad, la alta plasticidad de las arcillas de la Ciudad de México tiene como consecuencia un ángulo de fricción interno en función de los esfuerzos efectivos comparable en magnitud con el ángulo de fricción de las arenas (Díaz-Rodríguez et al., 1992).

De acuerdo con Díaz-Rodríguez & Santamarina (2001), la estructura de los sedimentos de las arcillas mexicanas está constituida por un esqueleto granular y por partículas finas con una alta superficie específica, por lo que es una de las principales razones del alto valor del límite líquido de estos suelos.

Se ha observado que las arcillas volcánicas de la Ciudad de México tienen un límite líquido un poco semejante al contenido de agua natural Tabla 2.2. Como es de esperarse el límite líquido varía notablemente con el contenido de agua y como se sabe el proceso de consolidación que han sufrido los estratos arcillosos de algunas zonas del Valle de México, ya sea por sobrecargas aplicadas al terreno o por el bombeo de agua subterránea. Por tal motivo el valor del límite líquido cambia, sin



embargo, el límite plástico no se modifica por los efectos de la consolidación de acuerdo con los resultados obtenidos por Marsal & Mazari (1959).

Tabla 2.2 Sondeos de la zona de lago, la cual no presenta sobrecargas en la superficie y ni sobreexplotación de los acuíferos (Tomada de Marsal & Mazari, 1959).

Sondeo	Profundidad m	Formación Arcillosa Superior					Profundidad m	Formación Arcillosa Inferior				
		wi %	ei	Ss	LL %	LP %		wi %	ei	Ss	LL %	LP %
PC 61	4.3-41.9	328.3	8.1	2.4	344.5	109.4	—	—	—	—	—	—
PC 66	5.1-33.4	338.4	8.07	2.39	325	81.1	—	—	—	—	—	—
PC 68	5.4-37.4	330.4	7.91	2.41	312	84.3	—	—	—	—	—	—
PC 70	4.3-37.3	350.6	8.75	2.47	336.4	86.2	—	—	—	—	—	—
PC 106	2.9-39.6	328.4	8.33	2.52	333	92.9	41.6-44.8	353.4	9.01	2.49	350.2	84.5
PC 143	4.0-36.8	378.2	9.18	2.42	333.4	90.6	39.8-55	204.9	5.38	2.48	202.4	64.4
PC 200	5.2-41.8	343.7	7.86	2.31	302.1	90.8	54-61.7	223.1	5.75	2.48	203.1	75.1

Contenido de agua

Los suelos lacustres de VM pueden presentar contenidos de agua que superaran el 500 % y el peso de los sólidos presenta menos del 17 % del total, estos suelos al tacto tienen características elásticas muy marcadas y con frecuencia son quebradizos, su comportamiento plástico solo se observa al manipularlos y en algunos casos cuando se amasan enérgicamente se adquieren la consistencia de un líquido viscoso (Marsal & Mazari, 1959). En particular estos suelos presentan una variación en el contenido de agua, no solo con el aumento de la profundidad en un determinado sondeo, sino también en muestras más pequeñas (Díaz-Rodríguez & Santamarina, 2001).

Los contenidos de humedad más altos en la zona del lago de la Ciudad de México se encuentran en los depósitos de arcilla en una profundidad de aproximadamente 20 m; pero como se mencionó la humedad varía de acuerdo a la ubicación; en el centro de la Ciudad de México (catedral) tienen un contenido de humedad entre 150 a 250 %, en la colonia Roma en los primeros 20 m presenta porcentajes de 200 a 300, en el lecho lacustre del lago de Texcoco los contenidos de humedad son de 400 a 600 %. Una de las razones del porqué de la variación del contenido de humedad en los suelos lacustres del Valle de México es porque en la zona de transición existen arenas y limos arenosos intercalados con las arcillas superiores, por lo que los suelos hacia el borde del antiguo lago son menos húmedos que en la parte central. Además de que el área urbanizada está sujeta a sobrecargas externas y también se ve afectada por los efectos de consolidación regional, por lo que presenta menos agua de poro, en comparación con las arcillas vírgenes, encontradas en el antiguo lago de Texcoco (área con menos o recientemente urbanizadas) (Ovando, 2011).

De acuerdo con el análisis de los suelos arcillosos y limosos de la Cuenca de México se ha podido determinar que los suelos con mayor humedad son arcillas del tipo montmorillonita cálcica, mientras que los suelos con menores contenidos de agua se caracterizan por ser arcillas montmorillonitas sódicas, el caolín plástico, la illita, la sepiolita y la atalpulgita. Con respecto a la microestructura se ha determinado que los suelos con microestructura dispersa, floculada (cara a cara y/o cara-borde) e irregular presentan un contenido de humedad alto (Auvinet et al., 2017).

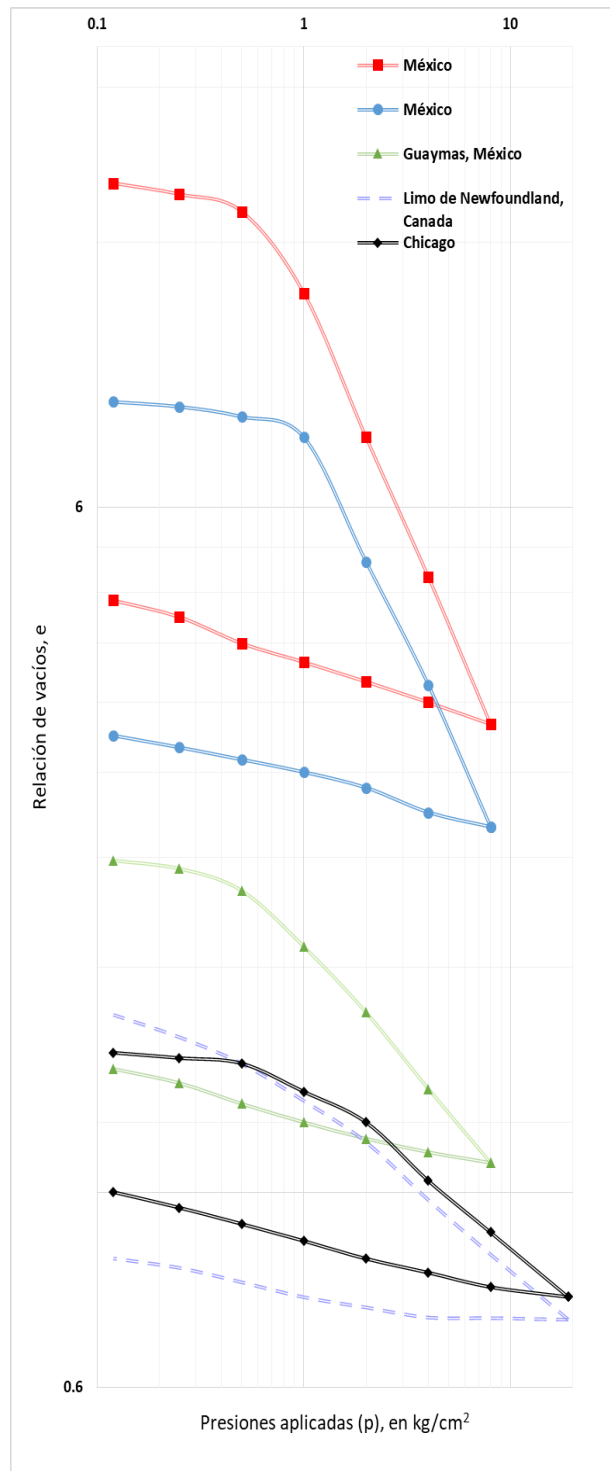


Figura 2.7 Módulo de compresibilidad volumétrica para varias arcillas, donde p_c es la carga de preconsolidación (Tomada Marsal & Mazari, 1959).

Así como se han producido cambios en el contenido de humedad y de la relación de vacíos de muchas partes de la zona lacustre, se ha desarrollado un incremento del peso volumétrico de los materiales arcillosos como consecuencia de los cambios efectivos de estrés provocados por la aplicación de cargas superficiales y por el bombeo para extracción de agua, provocando la consolidación inducida de la cuenca, por lo tanto, las arcillas ganan fuerza y se vuelven más rígidas. También se han modificado la compresibilidad la cual ha ido disminuyendo y la resistencia al corte de los suelos del VM.

Compresibilidad

Las arcillas del valle presentan un índice de compresión (C_c) que puede llegar a un valor de 10, cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1. Por lo que los suelos del VM son altamente compresibles (Díaz-Rodríguez, 2006). Si tomamos en cuenta que estos suelos son poco permeables y con una relación de vacíos alta. Por tanto, se esperaría que la consolidación primaria fuera lenta, sin embargo, no ocurre de esta manera, ya que los sedimentos del Valle de México tienen capas delgadas de vidrio volcánico, arenas y fósiles.

El coeficiente de compresibilidad (a_v) de los suelos del VM es comparable con las arcillas compresibles de origen lacustre o glacial. En la Figura 2.7 se observa algunos ejemplos de la curva de compresibilidad de diferentes suelos.

La compresión de la formación arcillosa superior es responsable del 50 y 60 % de los asentamientos de la zona centro de la Ciudad de México. El hundimiento regional aumenta las tensiones efectivas del suelo arcilloso. Y conforme se desarrolla la consolidación las propiedades dinámicas y estáticas cambian (Ovando-Shelley, et al., 2013).



Díaz-Rodríguez et al. (1992), determinaron el comportamiento elástico de los suelos lacustres del VM, estableciendo que si se somete a esfuerzos inferiores al esfuerzo de fluencia (σ'_Y), el esqueleto del suelo tiene un comportamiento elástico, cuando se supera esa fuerza, las fuerzas entre partículas se pierden y el suelo tiende a deformarse y cambiar su volumen con una predominante consolidación secundaria.

Resistencia al corte

Los suelos lacustres del Valle de México presentan una resistencia al corte muy baja, Díaz-Rodríguez (1989) dio a conocer un parámetro importante en el comportamiento dinámico de los suelos el VM, al realizar una serie de ensayos triaxiales consolidados-no drenados en muestras inalteradas de la Ciudad de México. Este parámetro se conoce como relación umbral de esfuerzos cíclicos (R_D) el cual es aproximadamente igual a 83 %; el cual determina dos parámetros, si $R_D > 83$ % existe una reducción notable de la resistencia al corte y si $R_D < 83$ % no existe ningún cambio en la resistencia al corte. También determinó que el efecto de la carga repetida aumenta al aumentar el nivel de tensión cíclica de corte. Además, los suelos de la Ciudad de México no muestran una pérdida de resistencia incluso cuando el ciclo dinámico es de 80 % de la fuerza cuasi-estática comparada después de 100 ciclos.

Los suelos del VM tienen un módulo de rigidez casi constante para las deformaciones hasta de 0.1 %, por lo que es un comportamiento lineal grande en comparación con otros suelos arcillosos, también se tiene una relación de amortiguamiento muy baja entre 4 y 5 % para deformaciones de corte del 1.5 % (Díaz-Rodríguez, 2006).

Díaz-Rodríguez & Santamarina (2001) definieron dos umbrales de deformación para los suelos lacustres del Valle de México.

- a) Umbral de deformación lineal (γ_{tl}), que separa la región de pequeñas deformaciones (la rigidez y amortiguamiento dependen del estado de esfuerzos y las características físico-químicas del suelo) de la región de deformaciones medias.
Los suelos con un alto IP presentan una menor degradación durante la carga cíclica, por lo que los suelos del VM sufren poca degradación para deformaciones de 3 %.
- b) El umbral de deformación de degradación (γ_{td}), el cual separa las regiones de deformaciones medias de la región de grandes deformaciones (los suelos tienen una gran degradación durante la carga cíclica, por lo que se llega a la falla) (Díaz-Rodríguez, 2006).

3 PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

Para los geólogos el suelo es el resultado de procesos de intemperismo físicos, químicos o biológicos del material presente en la corteza terrestre (roca), es un depósito de material originado por la exposición continua de los agentes atmosféricos como el agua, viento, hielo, temperatura y de la actividad de organismos y/o plantas. Para fines de este trabajo, se entenderá como al agregado de partículas de dimensiones variadas, desde micras hasta centímetros, que está constituido por una fase sólida (puede ser orgánica e inorgánica), líquida y gaseosa, Figura 3.1. Generalmente la fase líquida es agua y la fase gaseosa, aire. Pero los espacios vacíos pueden contener otras sustancias.

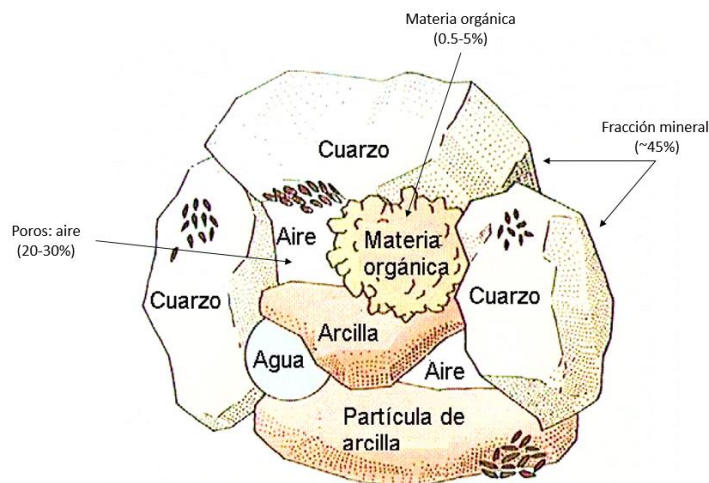


Figura 3.1 Fracciones constituyentes del suelo (Dominio público de internet).

3.1 Clasificación de los suelos

En general la naturaleza de los suelos es muy compleja, ya sea por su granulometría o por la interacción de las partículas sólidas con diferentes fluidos que puede contener el suelo; como agua, sales, contaminantes orgánicos e inorgánicos, gases tal como aire o metano, entre otros. Para clasificarlos se atiende principalmente el uso que se dará como materia prima. A continuación, algunas de las más útiles descripciones para la ingeniería.

1) El Sistema de la America Association of State Highway & Transportation Officials (AASHTO)

Este sistema es el más utilizado en carreteras. Con él se puede determinar la calidad relativa del suelo. Se divide en siete grupos, del A-1 al A-7, y cada uno depende de las características que tengan los suelos en sus límites de consistencia y su granulometría, Figura 3.2. Los grupos A-1 a A-3, son suelos granulares o de grano gruesos, mientras que de los grupos A-4 a A-7, son suelos de grano fino (limo-arcilla). De acuerdo a la norma AASHTO M 145-82, las partículas del suelo se dividen por su tamaño en: gravas, fracción del suelo que pasa la malla de 75 mm, pero es retenido en la malla menor a 2 mm; arena, aquellos suelos que pasan la malla N°10 (2 mm) y en la malla N°200 se mantienen; y los suelos más finos (limo y arcillas), aquellos suelos que si pasan la malla N°200. AASHTO determina que los suelos granulares contienen menos del 35 % de partículas finas o partículas que pasan el tamiz N°200. Y los suelos arcillo-limosos son suelos que contienen más del 35 % de partículas que pasan el tamiz N°200. Además de que para los limos considera un índice de plasticidad (Plastic Index PI) menor del 10 % y la para las arcillas un índice de plasticidad mayor (PI) de 11 %.

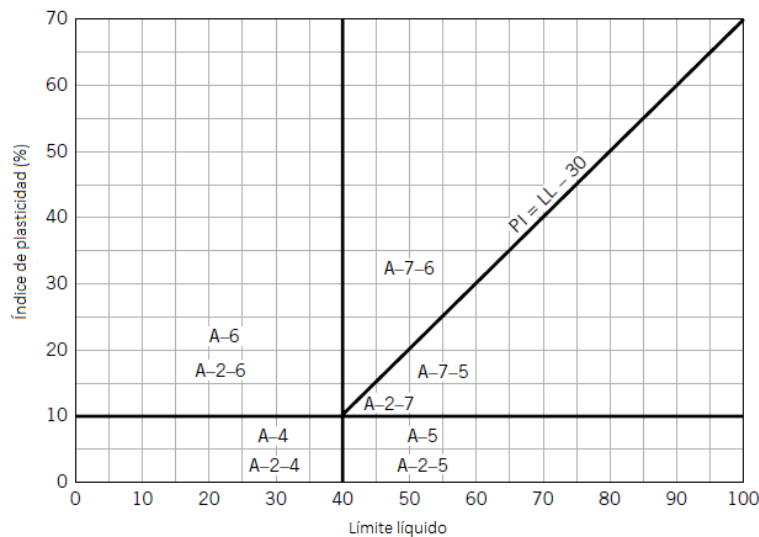


Figura 3.2 Clasificación de suelos de acuerdo a AASHTO. (Tomada de AASHTO, 1987).

2) El Sistema de clasificación USDA

Para la clasificación de los suelos de acuerdo a este sistema, es necesario considerar la textura del suelo, esto se refiere a la distribución de las partículas minerales en el suelo. El USDA determina que los fragmentos gruesos son aquellos suelos con partículas mayores a 2 mm, se considera una arena si el tamaño de sus partículas corresponde de 0.05 a 2 mm, limos si las partículas están comprendidas entre 0.002 a 0.05 mm y por último arcillas cuando sus partículas son menores a 0.002 mm, Figura 3.3.

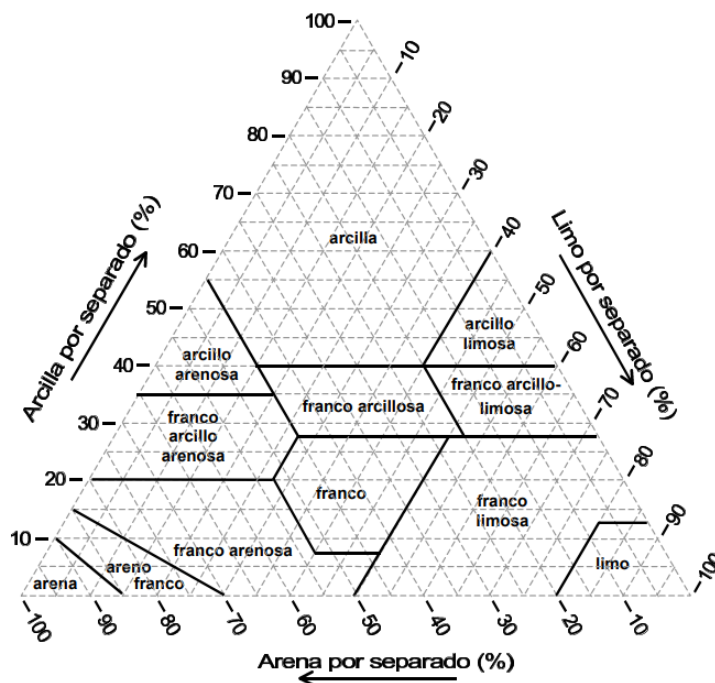


Figura 3.3 Diagrama ternario para clasificar suelos de acuerdo al USDA. (Tomada de USDA, 1999).

3) El sistema unificado de clasificación de suelos

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS es el más utilizado en la ingeniería geotécnica y se basa en el comportamiento mecánico de los suelos finos de acuerdo a su plasticidad y de los suelos gruesos de acuerdo a su granulometría. La norma ASTM D 2487, Standard Classification of Soils for Engineering Purposes y la norma D 2488, son las que describen en detalle esta clasificación.

Se entiende por suelo fino, cuando más del 50 % del contenido de las partículas del suelo pasa la malla N°200 (tamaño menor a 0.075 mm) y cuando pasa menos del 50 % de las partículas se le denomina suelo grueso. Ambos tipos de suelos tienen una subclasificación.

A los suelos gruesos se dividen en:

Gravas (G): Aquellos suelos que pasan la malla N°3 (76.2 mm), pero que es retenida en la malla N°4 (4.75 mm).

Cuando las partículas pasan el tamiz N°4 y son retenidos en el tamiz N°200, se clasifican como:

Arenas (S): A los suelos gruesos los podemos caracterizar por la fábrica que tenga, dicho de otra manera, nos referimos a la variedad de tamaños de las partículas que pueda presentar el suelo. Si el suelo grueso está compuesto por partículas de diferentes tamaños se dice que está bien graduado y se denota con la letra W (well). Por el contrario, si el suelo presenta un tamaño de



partículas homogéneo o uniforme, lo que significa que está mal graduado; se denota con la letra P (poorly).

Tanto las arenas como las gravas son fáciles de compactar y no se ven afectadas a las heladas, las gravas por lo general suelen ser más estables a los flujos de agua y más resistentes a la erosión en comparación con las arenas. Las arenas y gravas bien graduadas son menos permeables, a aquellas que tienen un tamaño uniforme de partículas.

A las partículas que pasan el tamiz N°200 (menores 0.075 mm), se les denomina suelos finos y los podemos dividir en:

Limos inorgánicos (M): Cuando estos suelos se encuentran saturados o sea que cuando tienen un alto contenido de humedad, tienden a fluir. Se caracterizan por ser difíciles de compactar, son relativamente impermeables, y se ven afectados por la erosión.

Y cuando las partículas del suelo son de tamaño de $2\ \mu\text{m}$ o 0.002 mm o menor, se clasifican como arcillas.

Arcillas inorgánicas (C): Su clasificación se establece de acuerdo a la plasticidad que presente el suelo. Si se determina en el laboratorio un límite líquido (LL) $< 50\%$ se dice que tiene baja compresibilidad (L) y si es mayor a 50 % tiene una alta compresibilidad (H).

Es importante mencionar que si existe la presencia de limo o arcilla orgánica se denotan con la letra O, por lo que se tiene MO y CO; y si tenemos Turba y otros suelos orgánicos se usa el símbolo Pt. Las arcillas se caracterizan por ser cohesivas al disminuir su humedad, además de que presenta una muy baja permeabilidad, tiene poca compactación en estado húmedo, pero es resistente a la erosión si llegara a estar compacta.

Los suelos finos y gruesos pueden tener varias clasificaciones como se muestra a continuación en la Tabla 3.1.



Tabla 3.1 Clasificación de suelos de acuerdo al SUCS (Tomada de Tamez, 2001).

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)					
Suelos gruesos (más de 50% retenido en la malla #200)			Suelos finos (más de 50% pasa la malla #200)		
Gravas: más de 50% de gruesos retenidos en la malla #4 (menos del 5% de finos). Arenas: más de 50% de gruesos pasa la malla #4 (menos de 5% de finos).	GW	Grava limpia, bien graduada	LL < 50 % Arcilla: IP arriba de la línea A. Suelo Orgánico y limo: IP bajo la línea A.	ML	Limo de baja plasticidad
	GP	Grava limpia, mal graduada		CL	Arcilla de baja plasticidad
	SW	Arena limpia, bien graduada		OL	Orgánico de baja plasticidad
	SP	Arena limpia, mal graduada	LL > 50 % Arcilla: IP arriba de la línea A.	MH	Limo de alta plasticidad
Gravas y arenas con más de 12% de finos. Limosa= finos de baja plasticidad. Arcillosa = finos de alta plasticidad.	GM	Grava limosa	Suelo Orgánico y limo: IP bajo la línea A.	CH	Arcilla de alta plasticidad
	GC	Grava arcillosa		OH	Orgánico de alta plasticidad
	SM	Arena limosa	Turba y suelos orgánicos con más de 50 % de materia orgánica.		
	SC	Arena arcillosa			

3.2 Minerales constitutivos de las arcillas

Como se mencionó en el apartado anterior las partículas de los suelos arcillosos son aproximadamente menores a 0.002 mm (2 μm), en lo general para poder obtener ese tamaño es necesario que los agentes formadores del suelo sean de acción química. Estas partículas de arcillas presentan un contenido químico similar a la roca formadora, pero con una estructura cristalina diferente, en contraste con las partículas de tamaño de 0.002 mm que tienen un contenido mineral similar a la roca original (Smith & Smith, 1998). Gracias al tamaño de las partículas, las fuerzas de gravedad son insignificantes en comparación con las fuerzas eléctricas desbalanceadas que actúan en la superficie del grano, por lo que se puede decir que son partículas coloidales (Terzaghi K. et al., 1996).

En los suelos no arcillosos la relación entre el área superficial o superficie específica (se determina como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas

de un suelo por unidad de masa, expresada en m^2/g y el volumen de las partículas es pequeño, las propiedades comunes de las masas de suelo no dependen de sus minerales constituyentes, ya que en estos suelos, las partículas son tan grandes que las fuerzas intermoleculares entre granos son insignificantes con respecto a las fuerzas debidas a las cargas externas o a la gravedad.

Los minerales de arcilla están constituidos principalmente por silicoaluminatos hidratados, pero también pueden estar constituidos por silicatos de magnesio, hierro u otros metales, de igual modo hidratados, que al combinarse forman una estructura cristalina, donde sus átomos se organizan en forma de lámina (naípe). Estos minerales están constituidos por dos tipos de láminas y unidades. La unidad tetraédrica de sílice y la unidad octaédrica de hidróxido de aluminio, hierro o magnesio (Smith & Smith, 1998).

Lámina tetraédrica: Constituida por un átomo central de sílice (ion con carga positiva), rodeado por cuatro aniones de oxígeno (carga negativa), para formar un tetraedro con carga negativa y con un oxígeno en cada esquina (Figura 3.4.A), para poder tener una carga neutra es necesario más cationes o tetraedros individuales, que al agruparse compartirán un átomo de oxígeno entre cada uno, formando así unidades hexagonales (Figura 3.4.B). A la repetición indefinida de unidades hexagonales formaran una lámina silícica, con un espesor de 4.93 Å.

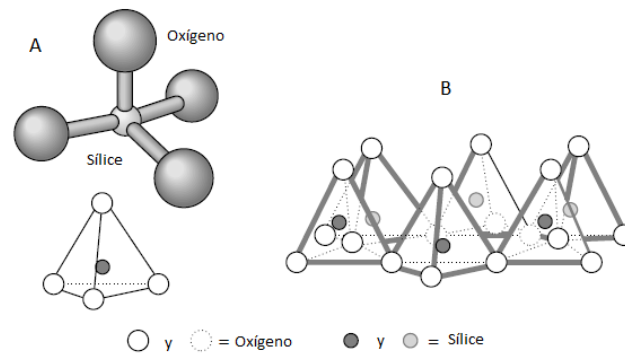


Figura 3.4 A) Unidad y B) lámina silícica de las arcillas (Tomada de Budhu, 2010).

Lámina octaédrica: Las láminas de silicatos pueden estar formadas por láminas de alúmina $[Al_2(OH)_6]$, los cuales consisten en un ion de aluminio acotado por seis átomos de oxígeno o hidróxidos. Los iones de aluminio al presentar una disposición octaédrica, comparten átomos de oxígeno para formar una capa continua llamada lamina aluminica (Figura 3.5). Cuando la unidad octaédrica está conformada solo por hidroxilos y por un átomo de magnesio se le conoce como brucita $[Mg_3(OH)_6]$ y gibbsita $[Al_2(OH)_6]$ cuando el catión es aluminio (Mitchell & Soga, 2005).

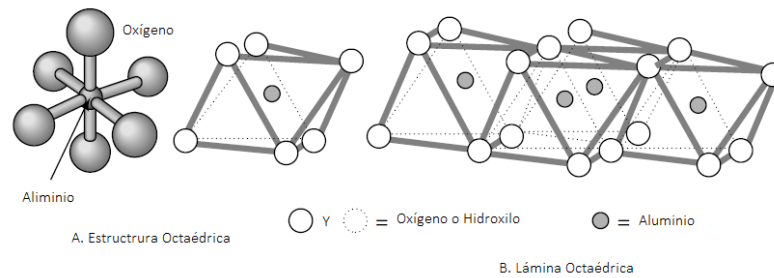


Figura 3.5 Unidad y B) Lámina aluminica (Tomada de Budhu, 2010).

Existen tres principales grupos de minerales de arcilla y cada uno de ellos dependerá de la forma en que estas estructuras (láminas) se organizan.

1 Caolinita (kaolinites)

La estructura principal de la caolinita consiste en una lámina de sílice tetraédrica y una lámina aluminica octaédrica de aproximadamente 7.2 Å o 0.72 nm de espesor, las cuales se mantienen unidas por enlaces primarios, intercaladas entre sí (estructura 1:1) indefinidamente, hasta formar una red, estas capas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno (enlace secundario), como se observa en la Figura 3.7.a. La composición química de las caolinitas se expresa $(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$.

Su estructura 1:1, influye en su formación ya que la caolinita tiene mayor probabilidad de génesis cuando es más abundante la alúmina y la sílice es escasa. Para la formación de la caolinita es necesario que exista un bajo contenido de electrolitos, un pH bajo y la eliminación de iones que tienden a flocular la sílice (Mg, Ca, Fe) por lixiviación (Mitchell & Soga, 2005). Por lo general este tipo de arcilla se forma a partir de feldespatos y micas por lixiviación ácida de rocas graníticas ácidas (ricas en SiO_2).

La caolinita es el mineral más abundante en los depósitos de arcilla residual y es común en regiones tropicales húmedas o semitropicales, donde existe una precipitación alta, además de que debe de existir un buen drenaje para la lixiviación de cationes y hierro (Mitchell & Soga, 2005).

Una de las principales características de estos minerales es que presenta una resistencia alta a la penetración de moléculas de agua, lo que significa que las arcillas caolínicas son estables (no son expansivas) a la presencia de agua.

La Halosita es un mineral que pertenece a la familia de las caolinitas, se forma por la lixiviación de feldespatos por H_2SO_4 , que se produce por la oxidación de la pirita.

2 Montmorillonitas (montmorillonites)

La montmorillonita se le conoce también como arcilla hinchada o expansiva, forma parte de la familia de arcilla esmectita. En las montmorillonitas, en la unidad tetraédrica (Lámina silícica), existe la sustitución de átomos de silicio (tetraivalentes) por átomos de aluminio (trivalentes), mientras que en la estructura octaédrica existe sustitución de aluminio trivalente por magnesio, hierro, etc. (bivalentes). Por lo que existe una deficiencia de cargas positivas en la estructura, la cual es balanceada por medio de la absorción de cationes de las soluciones, los cuales son llamados cationes de intercambio, ya que pueden ser sustituidos con facilidad por otros.

Se le llama esmectita de calcio cuando el catión predominante intercambiable es Ca^{2+} , por lo que las partículas presentan dos capas de agua, mientras tanto se le llamara esmectita de sodio cuando más cationes intercambiables son de Na^+ y generalmente solo tiene una capa de agua, este tipo de esmectita puede absorber mayor cantidad de agua para separar las partículas, a diferencia de la esmectita de calcio, ya que sus cationes son bivalentes (Budhu, 2010).

La montmorillonita presenta una estructura 2:1, compuesta por un lámina octaédrica entre dos láminas tetraédricas (capa), con un espesor correspondiente a 1 nm (Varadan et al., 2010), como se observa en la Figura 3.6, este tipo de minerales presentan enlaces de Van der Waals débiles, por lo que permiten el paso de moléculas de agua en su estructura, dando como resultado un material inestable, con características de contracción e hinchamiento, donde existe un aumento del volumen de los cristales. La composición química de las montmorillonitas se expresa: $(\text{OH})_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{NH}_2\text{O}$.

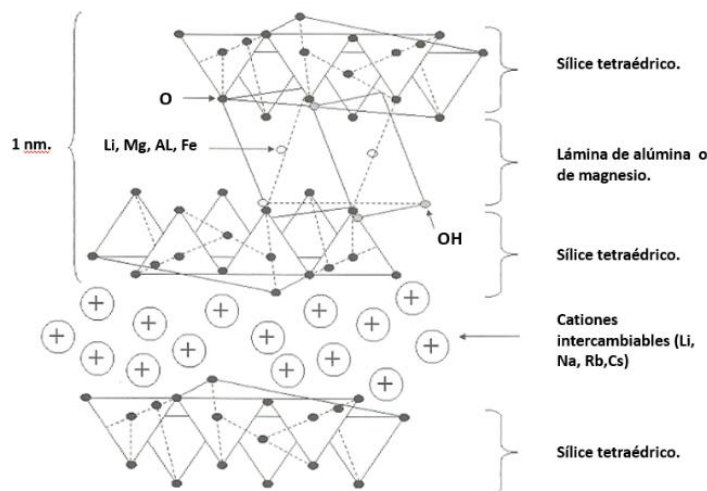


Figura 3.6 Montmorillonita (Tomada de Varadan et al., 2010).

Este tipo de minerales se forman donde hay mayor presencia de sílice. Las características para su formación dependen de un pH alto, alto contenido electrolítico y la presencia de más Mg^{+2} y Ca^{2+}



que de Na^+ y K^+ . Se derivan de rocas ígneas básicas e intermedias, cenizas volcánicas y de rocas que contengan ferromagnesianos y plagioclasas cálcica (Mitchell & Soga, 2005).

Algo importante para la formación de este tipo de minerales, es que la evaporación exceda las precipitaciones, además de que se tenga una lixiviación y drenaje deficiente. Esto por lo general se da en zonas áridas y semiáridas con pocas o moderadas lluvias. En estas condiciones existe el agua necesaria para que los procesos de alteración tengan lugar, sin embargo, no la suficiente para que los cationes aglomerados sean transportados por el agua de lluvia.

La bentonita es una mineral que pertenece a la familia de las montmorillonitas, se forma por la intemperización química de las cenizas volcánicas, una de sus características más importantes es que tiene una alta expansión (Hinchamiento), adquiriendo un comportamiento muy complicado en la industria de la construcción. Pero en ciertas ramas ingenieriles presenta una aplicación muy práctica y eficiente, por ejemplo, como lechada, que se ocupa para tapar fugaz en depósitos o en túneles. También se usa como lodo de perforación en pozos.

3 Illitas (illites)

Este tipo de minerales presenta una estructura 2:1 como las montmorillonitas, por lo que consiste en una lámina octaédrica intercalada entre dos láminas tetraédricas, estas capas presentan un espesor de 0.96 nm y se mantienen unidas por iones de potasio (Figura 3.7.b). En las láminas octaédricas una porción del aluminio es sustituido por hierro y magnesio. Mientras que en las láminas tetraédricas hay un remplazamiento parcial de silicio por aluminio. A pesar de que su estructura es similar a la estructura de las montmorillonitas, presentan composición química diferente: $(\text{OH})_4\text{k}_y(\text{Al}_4\text{Fe}_4\text{Mg}_4\text{Si}_{8-y})\text{O}_{20}$.

La illita presenta características de hinchamiento y contracción mayores a la caolinita, ya que tienden a absorber más agua que la caolinita, pero tienen una expansión menor a las montmorillonitas.

Una fuente importante del desarrollo de la illita es la meteorización del feldespato en climas fríos. Otra fuente importante es la alteración de la moscovita a la illita y la botita a la vermiculita cuando se exponen agentes de intemperismo (Mitchell & Soga, 2005). La illita es el mineral de arcilla más abundante en el mundo.

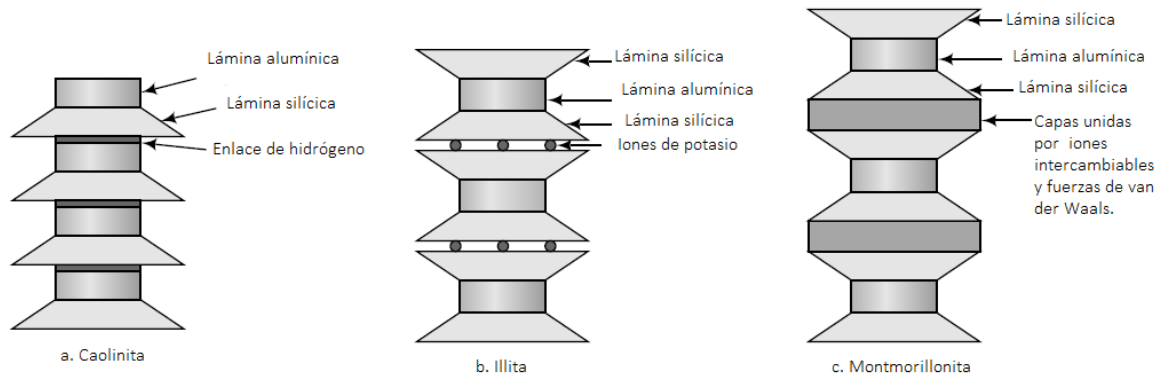


Figura 3.7 Representación estructural de los diferentes minerales constitutivos de las arcillas (Tomada de Budhu, 2010).

3.2.1 Tipos de enlaces atómicos

Como se mencionó en la sección anterior los diferentes minerales de arcilla están constituidos por un arreglo determinado de las láminas tetraédricas y octaédricas y a su vez están constituidas por unidades. Este arreglo de capas, láminas y unidades, no sería posible si entre ellas no existirán enlaces químicos. Existen dos tipos de enlaces químicos en las arcillas, los enlaces entre láminas y los enlaces entre capas.

Enlaces entre láminas, también llamados primarios o intramoleculares: son aquellos enlaces que están presentes en la interacción o unión entre las láminas tetraédricas y octaédricas, ocurren a nivel atómico de un cristal de arcilla. Principalmente se mencionan a:

-*Enlaces iónicos:* El cual corresponde a la atracción electrostática de un ion no metálico con uno metálico, donde uno de ellos tiene mayor o menor número de valencia, lo que ocurre que el átomo con menor número de valencia pierde sus electrones cediéndolos al que tiene mayor y así el átomo completa su último nivel de energía.

-*Enlaces covalentes:* En este tipo de enlace en vez de perder o ganar electrones, los átomos comparten sus electrones. Los enlaces covalentes se dan de la unión de dos no metales. Existen dos tipos de enlaces covalentes polares y no polares.

Los enlaces primarios son muy fuertes y estables, pero el que presenta mayor energía de unión atómica es el iónico.

Enlaces entre capas, conocidos como secundarios o fuerzas intermoleculares. Este tipo de enlaces son propios del acoplamiento entre las capas de los minerales de arcilla, se desarrollan a nivel molecular y la energía de la unión no es tan grande como en los enlaces primarios. De este tipo de enlaces se mencionan:

-*Enlace de hidrógeno:* Es el resultado de la atracción electrostática entre los extremos opuestos de dos dipolos permanentes formados por iones de hidrógeno H^+ e iones con carga electronegativa muy fuerte como el oxígeno y el flúor.



-*Fuerzas de Van der Waals*: Son enlaces dipolo fluctuante, se caracterizan por que pueden existir más electrones en un lado del núcleo atómico que en el otro. Lo que desarrolla dipolos instantáneos débiles donde sus extremos opuestos se atraen entre sí. Estos enlaces son débiles a comparación del enlace de hidrógeno (Mitchell & Soga, 2005).

La magnitud de los enlaces generados en la estructura del suelo esta relaciona con el tamaño de las partículas. Si se presenta un enlace fuerte se tendrá un suelo con partículas grandes y viceversa.

3.3 Propiedades físico-químicas de las arcillas

El comportamiento de las arcillas va a depender en gran medida de las propiedades físico-químicas que tengan, por lo que las propiedades índice y mecánicas también dependerán de ellas.

Esto se debe al tamaño tan pequeño de las partículas que constituyen a los suelos arcillosos, ya que como se mencionó predominan las fuerzas relacionadas a las cargas eléctricas de sus moléculas, en contraste con los suelos de grano grueso donde predominan las fuerzas gravitacionales. Otros factores importantes son la carga eléctrica de una partícula de suelo, la capacidad de intercambio catiónico y principalmente la correlación que existe entre una partícula de arcilla y el agua.

Todas las partículas de suelo presentan una carga eléctrica, y puede ser tanto positiva como negativa, pero solo se consideran las cargas negativas (Lambe & Whitman, 1969), la cual es el resultado de uno o la combinación de los siguientes factores:

- Sustitución isomorfa.
- Disociación superficial de los iones de hidroxilo.
- Ausencia de cationes en la estructura cristalina.
- Absorción de aniones.
- Presencia de materia orgánica.

La sustitución isomorfa es uno de los factores más importantes, se desarrolla cuando un catión diferente sustituye a un catión que normalmente se encuentra en la unidad tetraédrica u octaédrica del suelo, sin cambiar su estructura cristalina. Como por ejemplo aluminio en vez de silicio, magnesio (Mg^{2+}) en lugar de aluminio (Al^{3+}) o hierro ferroso en lugar de magnesio. Por lo que se observa que existe un remplazamiento de cationes por cationes de baja valencia. Al ocurrir la sustitución isomórfica se transfiere a las arcillas una carga neta negativa, a excepción de los minerales del grupo de la caolinita. Este déficit de carga se refleja en la superficie de la estructura y como resultado puede atraer a un catión monovalente como el potasio (K^+), manteniéndose entre las capas y sobre la superficie y bordes de la partícula. Por lo general los cationes pueden ser intercambiados por



cationes diferentes (cationes intercambiables). A la cantidad de cationes intercambiables se le conoce como capacidad de *intercambio catiónico (CEC)* (Mitchell & Soga, 2005).

La magnitud de la carga eléctrica tiene una relación directa con el área superficial que tenga la partícula de arcilla, la influencia de esta carga está relacionada con el área superficial por unidad de masa de la partícula llamada *superficie específica*. Entre más pequeña sea una partícula mayor será su superficie específica. La montmorilonita tiene una superficie específica de 800 m²/g, mientras que la caolinita varía de 10 a 20 m²/g (Lambe & Whitman, 1969). Esta diferencia tan grande entre los minerales de arcilla se debe al tipo de enlace que presenta entre sus capas, entre más fuerte sea un enlace, mayor será su capacidad de atracción de otras capas de minerales, como se mencionó la caolinita presenta enlaces de hidrógeno que son más fuertes que los enlaces de Van der Waals presentes en las montmorilonitas; por lo que las caolinitas tienen partículas de mayor tamaño y por ende una menor superficie específica.

Se ha demostrado que algunas de las propiedades de las arcillas están directamente relacionadas con la superficie específica como: la plasticidad, el potencial de expansión y dispersión. En la Tabla 3.2 se observa la correspondencia que existe entre la capacidad de intercambio catiónico de una arcilla y sus propiedades con respecto a su humedad, medida con los límites de Atterberg (Peck et al., 2001).

Tabla 3.2 Relación de los límites de Atterberg con el tipo de catión absorbido (Tomada de Lambe & Whitman, 1969). Datos de (Cornell, 1951).

	CEC (meq/100 g)	Catión							
		Na ⁺		K ⁺		Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺	
<i>w_L</i> = Límite líquido <i>I_p</i> = Índice de p.		<i>w_L</i>	<i>I_p</i>	<i>w_L</i>	<i>I_p</i>	<i>w_L</i>	<i>I_p</i>	<i>w_L</i>	<i>I_p</i>
Mineral de Arcilla									
Caolinita	3-15	53	21	49	20	38	11	54	23
Ilita	10-40	120	67	120	60	100	55	95	49
Montmorillonita	70-100	710	656	660	562	510	429	410	350

Como ya se mencionó anteriormente que las partículas presentan cargas eléctricas negativas, las cuales son capaces de atraer a las moléculas bipolares de agua y a los cationes de algunos elementos como Na⁺, K⁺, Ca⁺, Mg⁺⁺, Al⁺⁺, Fe⁺⁺, etc. que se encuentran en el agua. Por lo que todas las partículas de suelo están rodeadas por una capa de moléculas de agua, orientadas y ligadas a su estructura llamada *agua absorbida*, Figura 3.8. Las moléculas de agua absorbidas más cercanas a la superficie de la capa de arcilla son atraídas con más fuerza y esta disminuye mientras estén más alejadas. La interacción entre capas de las arcillas está determinada por el agua absorbida y por los enlaces químicos formados por iones positivos de elementos presentes en el agua de los suelos.

Cuando el contenido de agua de una arcilla de alta plasticidad es igual o mayor que su límite líquido, las capas de arcilla se encuentran separadas por varias capas de moléculas de agua, a una distancia donde las fuerzas de atracción molecular son muy débiles, por lo que el suelo tiende a comportarse como un líquido. Si el contenido de agua disminuye, el espesor de la capa de agua absorbida también disminuye, por lo que aumentan las fuerzas de atracción entre sus partículas y por ende la consistencia del suelo (Tamez, 2001). El espesor de la capa de agua absorbida no solo está en fusión de las características de las partículas, si no también dependen de los tipos de cationes atraídos. De lo anterior se puede mencionar que las arcillas tienen una capa de agua absorbida por tres principales razones:

-La molécula de agua tiene dos centros de cargas separados, uno positivo y otro negativo, por lo que la molécula de agua se atrae electrostáticamente a la superficie del cristal de arcilla.

-El agua se mantiene en la superficie de la arcilla por enlaces secundarios.

-Y por último como las partículas de arcilla están cargadas negativamente atrae los cationes presentes en el agua del suelo.

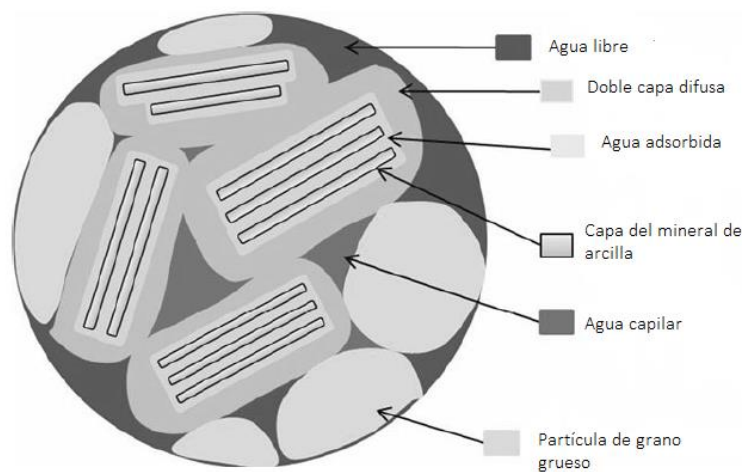


Figura 3.8 Sistema agua-arcilla (Tomada de Le et al., 2012).

Debido a que los cationes en las capas de agua adsorbidas están más concentrados cerca de las superficies de cristales de arcilla, se difunden térmicamente lejos de las superficies en un intento de igualar las concentraciones de catión dentro del agua adsorbida. Pero esta difusión se ve contrarrestada por la atracción eléctrica de los cationes cargados positivamente a las superficies de cristal de arcilla con carga negativa. Estos dos componentes: la superficie de la partícula de arcilla y la capa difusa de cationes juntos forman la *doble capa difusa* (Holtz et al., 2011). En otras palabras, la distancia entre la superficie y las moléculas de agua y de los iones disueltos en ella va aumentando y como consecuencia la fuerza de atracción va disminuyendo hasta llegar a una distancia donde el

agua tiene propiedades de agua normal, Figura 3.9. A la distancia entre la superficie de la partícula de arcilla y el agua normal se le denomina doble capa difusa (Díaz-Rodríguez, 2014).

Si tenemos dos partículas arcillosas separadas entre sí, en un medio acuoso, al aproximarlas entre ellas existirá una distancia en donde empiezan a interactuar, por lo que la doble capa difusa de ambas partículas al entrar en contacto generan fuerzas de repulsión, cuya magnitud depende de la concentración de electrolitos. Así como hay una fuerza de repulsión, también se puede generar una componente de atracción entre las partículas, la cual corresponde a la fuerza de Van der Waals que actúa entre moléculas adyacentes (Lambe & Whitman, 1969).

Si la fuerza resultante generada entre dos partículas es de atracción, ambas partículas tenderán a juntarse, entrando en contacto, a esta fuerza se le conoce como floculación. Y si la fuerza resultante tiende a separar las partículas, se le llama dispersión. Si se llegaran a modificar las características de la doble capa difusa, si disminuyera su espesor se tendría como resultado la reducción de la repulsión eléctrica y causa floculación; mientras si aumenta, disminuye la atracción eléctrica y provoca dispersión.

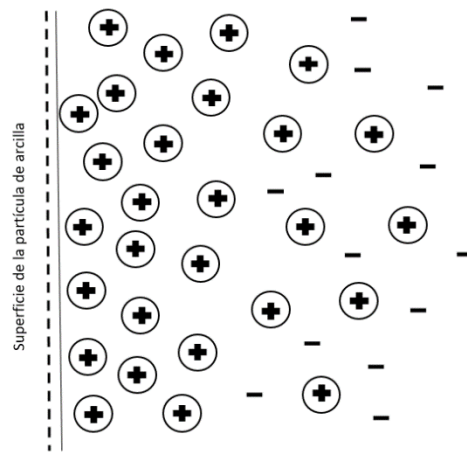


Figura 3.9 Doble capa difusa en un sistema arcilla-agua (Tomada de Mitchell & Soga, 2005).

3.4 Propiedades índice de los suelos

A los procedimientos necesarios para la caracterización de los suelos de forma cuantitativa que puedan relacionarse con las propiedades físicas del suelo se conocen como pruebas de clasificación y los resultados como propiedades índice.

Las propiedades índice se pueden dividir de forma general de dos maneras, en propiedades de los granos de los suelos y como propiedades del agregado o conjunto.

Las propiedades de los granos son aquellas que consideran las partículas individuales de los que está constituido el suelo, sin tomar en cuenta la forma en que estas partículas están orientadas o

acomodadas en un depósito. Mientras que las propiedades del suelo en conjunto dependen de la estructura y disposición de las partículas (Peck et al., 2001).

El suelo está constituido de una parte sólida, una líquida y una gaseosa. Como se mencionó anteriormente la parte sólida puede estar compuesta de minerales, materia orgánica, o de ambas; aunque en general el porcentaje de materia orgánica en un suelo es bajo, su presencia tiene un gran impacto en el comportamiento del suelo, ya que puede generar cementación entre las partículas e incrementar la retención de agua; la parte líquida por lo general predomina el agua y el gas predominante es el aire. Tanto la fase líquida y gaseosa del suelo constituyen el volumen de vacíos, se consideran vacíos a aquellos espacios que están entre las partículas de la parte sólida del suelo, esta fase sólida constituye el volumen de los sólidos.

Cuando hablamos de un suelo saturado, nos referimos a que la porción del volumen de vacíos se encuentra totalmente llena de agua; en este caso, el suelo solo está constituido de dos fases, la sólida y la líquida. Si los vacíos del suelo están saturados de aire, se dice que el suelo está seco. La proporción relativa de cada una de las fases en los suelos es importante, ya que sus propiedades físicas se ven afectadas por ellas. El volumen total del suelo (V) es la suma del volumen de sólidos (V_s), del volumen del agua (V_w) y más el volumen del aire (V_a); esta relación la podemos expresar de la siguiente manera:

$$V = V_v + V_s = V_a + V_w + V_s \quad (1)$$

Por lo que

$$V_v = V_a + V_w \quad (2)$$

En el siguiente esquema se muestra la forma idealizada de la constitución del suelo, con sus diferentes fases (Figura 3.10).

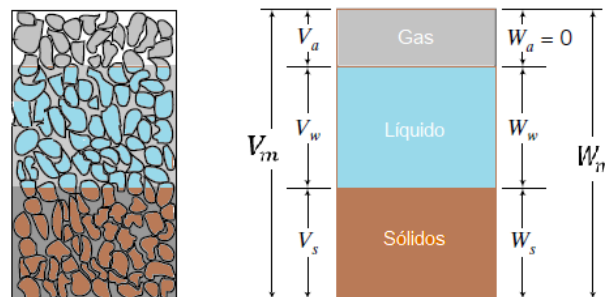


Figura 3.10 Constitución del suelo (Tomada de Díaz-Rodríguez, 2014).

El peso del suelo (W) es igual a la suma de los pesos de las diferentes componentes que forman el suelo.

$$W_m = W_a + W_w + W_s \quad (3)$$



En mecánica de suelos se considera W_a como nulo, por lo que el peso del suelo es:

$$W_m = W_w + W_s \quad (4)$$

Donde

W_m = Peso total de la muestra del suelo.

W_s = Peso de la fase sólida de la muestra (Peso de los sólidos).

W_w = Peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua).

W_a = Peso de la fase gaseosa de la muestra.

V_m = Volumen total de la muestra.

V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra.

V_w = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra de suelo (volumen del agua).

V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra de suelo.

V_v = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo.

Es importante mencionar que existe relación entre los pesos de las distintas fases del suelo con los volúmenes de cada una de ellas, a esta relación se conoce como peso específico. Existen diferentes pesos específicos:

γ_o = Peso específico del agua destilada, es necesario que tenga las siguientes condiciones: una temperatura de 4°C y 1 atm de presión. Si cumple con estos rubros se considera que el peso específico del agua destilada, tiene un valor de 1.

γ_w = Peso específico del agua en condiciones de laboratorio, por practicidad, se le da el mismo valor que a γ_o , pero γ_w varía en función de la temperatura.

γ_m = Peso específico de la masa del suelo, se expresa en kilonewton por metro cúbico (kN/m^3); se determina por medio de:

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_w + W_s}{V_m} \quad (5)$$

γ_s = Peso específico de la fase sólida del suelo

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (6)$$

γ_d = Peso seco unitario de un suelo seco, se determina:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_m} \quad (7)$$

La relación que existe entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua destilada con las condiciones descritas anteriormente, se le conoce como el peso específico relativo.



- Peso específico relativo de la masa del suelo

$$s_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_o} \quad (8)$$

Además de que existen relaciones volumétricas entre las fases que constituyen el suelo. De las cuales podemos mencionar:

- Relación de vacíos (e), también llamado oquedad o índice de poros; es la relación que existe entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos. El valor de e puede variar de 0 a ∞ , y en este caso se considera como un espacio vacío.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (9)$$

- Porosidad (n), es aquella relación que existe entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra del suelo. La porosidad se expresa en porcentaje, si existe un valor del 0 % nos indica que no existen vacíos, por el contrario, cuando la porosidad es del 100 % nos indica que existe solamente espacios vacíos.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_m} \quad (10)$$

Ambos términos nos indican el porcentaje relativo del volumen de poros en una muestra de suelo. Existen algunas relaciones entre la porosidad y la relación de vacíos.

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad y \quad e = \frac{n}{1 - n} \quad (11)$$

- Volumen específico (v), es la relación del volumen de suelo y el volumen de sólidos.

$$v = \frac{V_m}{V_s} = 1 + e \quad (12)$$

- Contenido de humedad o agua (w), es la relación que se da entre el peso del agua y el peso de los sólidos que tiene una muestra de suelo.

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (13)$$

- Grado de saturación (S), es el cociente entre el volumen del agua y el volumen de los vacíos. Se expresa en porcentaje, cuando se tiene un grado de saturación de 0 % se dice que el suelo está seco, por el contrario, si se tiene una saturación del 100 %, nos indica que el suelo está totalmente saturado.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (14)$$



- Densidad de sólidos (G_s), es la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua a una temperatura de 4°C o bien es el peso específico de los sólidos entre el peso específico del agua.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s/V_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (15)$$

3.4.1 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica es una propiedad que se ha vuelto importante y casi obligatoria para el estudio de un suelo, antes se pensaba que los tamaños de las partículas tenían una relación directa con el comportamiento mecánico del suelo, no obstante, en suelos granulares, la distribución granulométrica se puede determinar por el método de tamizado en seco y en particular en este tipo de suelos su granulometría tiene una relación con las propiedades físicas del suelo. Un suelo bien graduado o sea con diferente tamaño de partículas presenta una práctica ingenieril más oportuna.

Para un análisis granulométrico, es necesario tener una porción medida de suelo seco y pulverizado. De acuerdo a la norma ASTM C 117-03, se puede realizar la prueba con un mínimo de 300 g para aquellos suelos cuyas partículas tengan un tamaño menor o igual a 4.75 mm; en caso de partículas de mayor tamaño se necesitará una muestra representativa mayor. La granulometría por tamizado, de acuerdo con la norma ASTM D 422, consiste en inducir el paso de las partículas a través de diferentes medidas de mallas, siendo la más pequeña la No.200 (0.075 mm), seguida de una charola para aquellas partículas finas (limos o arcillas) que no queden retenidas en la última malla. Con este procedimiento se calcula el porcentaje en peso del suelo retenido en cada malla, para posterior determinar los porcentajes acumulados del suelo que pasa por cada una. Por lo que se resta del 100 % el porcentaje retenido en la primera malla y a este valor se le resta el porcentaje parcial retenido en la segunda malla y así subsecuentemente, como resultado se tendrá una gráfica semilogarítmica de distribución

Tabla 3.3 Número de mallas y su respectiva abertura en mm, para un análisis granulométrico (Tomada de Díaz-Rodríguez, 2014).

Malla Nº	Abertura en mm
2"	50.80
1 ½"	36.10
1"	25.40
¾"	19.05
½"	12.70
3/8"	9.52
Nº 4	4.75
10	2
20	0.84
40	0.42
60	0.25
80	0.177
100	0.149
200	0.074

granulométrica donde el eje de las abscisas representa el tamaño de las partículas en forma logarítmica y en el eje vertical el porcentaje del suelo que pasa por cada malla (Figura 3.11), la Tabla 3.3 muestra las diferentes mallas que se utilizan en el laboratorio para el análisis granulométrico, así como también las medidas de la abertura del enrejado de cada una.

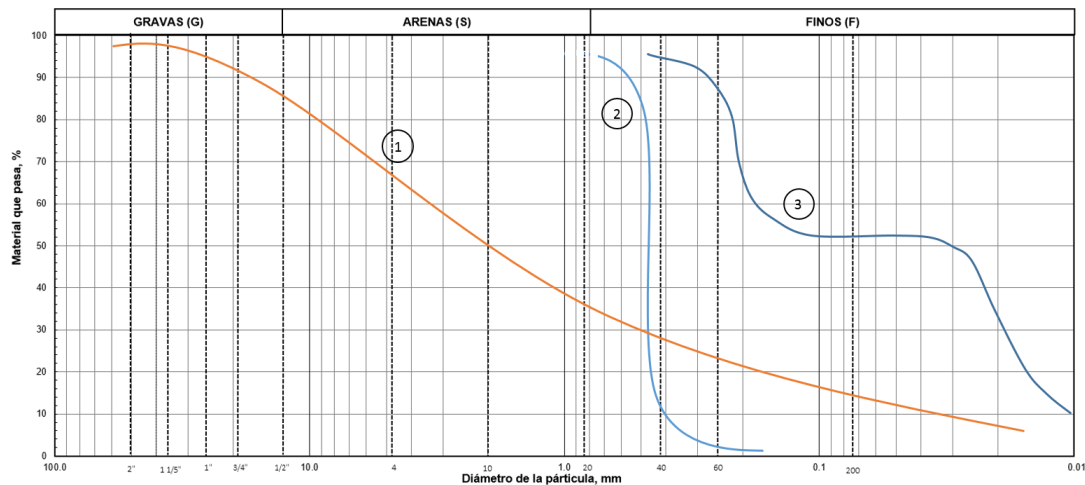


Figura 3.11 Gráfica semilogarítmica de distribución granulométrica. 1. Suelo bien graduado. 2. Suelo uniforme. 3. Suelo mal graduado (Modificada de Díaz-Rodríguez, 2014).

La curva granulométrica es importante ya que nos permite identificar dos parámetros: el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c); los cuales son fundamentales para la clasificación de la muestra de suelo.

La pendiente de la curva de distribución granulométrica se caracteriza por el coeficiente de uniformidad, el cual nos indica la uniformidad del suelo, es decir la uniformidad que presentan las partículas del suelo; si la curva tiende a ser vertical, significa que las partículas tienden a ser del mismo tamaño. Este parámetro se determina mediante:

$$C_u = D_{60} / D_{10} \tag{16}$$

Si tenemos un $C_u > 4$ se habla gravas bien graduadas y si el $C_u > 6$ corresponde arenas bien graduadas.

El coeficiente de curvatura se expresa como:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}} * D_{10} \tag{17}$$

Si el $1 < C_c < 3$ nos indica que pueden ser gravas o arenas bien graduadas.

El diámetro efectivo (D_{10}) es el diámetro donde el 10 % de la muestra de suelo pasó, el D_{60} y D_{30} es el diámetro donde el 60 % y 30 % de la muestra pasó respectivamente.

Para suelos finos con partículas menores a 0.075 mm, el análisis granulométrico se realiza por lavado de la muestra (tamizado en húmedo) o por medio de un hidrómetro basado en la ley de Stokes.



Este procedimiento es de gran utilidad para poder medir la cantidad de material de la muestra de suelo con mayor precisión ya que en ocasiones cuando se realiza un procedimiento en seco, muchas veces las partículas finas de arcilla o limo pueden quedar adheridas a las partículas de mayor tamaño como la arena. Además de que la vía húmeda ayuda a la reducción de grumos a partículas elementales, en caso de que la muestra representativa para el análisis, contenga gran cantidad de grumos, será necesario dejar remojando la muestra en agua en un período de 24 horas.

Para la ejecución del análisis granulométrico es importante contar con una muestra de suelo en estado seco y que además se tenga conocimiento de su peso. Para posteriormente dejar remojando la muestra y pasarla por el tamiz No.200, la muestra se lavará con la suficiente agua hasta que el agua de lavado este limpia. El material retenido en la malla No.200 se meterá al horno en una charola con peso conocido, y el material que si pasó la malla No. 200 también se meterá al horno en una charola diferente, de igual manera se debe conocer su peso.

Para calcular el porcentaje del suelo que pasó la malla No.200, se utiliza la siguiente expresión:

$$A = [(B - C)/B] \times 100 \quad (18)$$

Donde

B = masa total de la muestra de suelo seco.

C = masa del suelo seco que pasó la malla No.200.

4 ÍNDICE DE PLASTICIDAD

La plasticidad es una propiedad de los suelos que permite que se deforme repetidamente sin romperse, agrietarse ni desmoronarse, sin rebote elástico y sin variación volumétrica apreciable; cuando actúa una fuerza sobre él, suficiente para causar deformación y que le permite mantener su forma incluso después de ser retirada la fuerza. Un suelo de alta plasticidad requiere más fuerza para ser deformado y se deforma en mayor medida sin agrietarse, que a uno de baja plasticidad el cual se rompe más fácilmente.

Para conocer la plasticidad de un suelo es indispensable caracterizar los límites de Atterberg, los cuales no están estrictamente delimitados, si no, que sus fronteras son aproximadas, de ellos va a depender la clasificación de los suelos cohesivos y son de gran utilidad en la mecánica de suelos para identificar a las arcillas de acuerdo a su consistencia y comportamiento.

4.1 Límites de consistencia

Los límites de consistencia es una propiedad índice y como se mencionó está relacionada con la caracterización de los suelos. Cuando se habla de la consistencia de un suelo, se refiere a la condición física que puede tener la interacción o mezcla entre la fase sólida y la fase líquida de una muestra de suelo de grano fino. Esto se refiere a la capacidad que presenta el suelo para cambiar de volumen y por consiguiente de forma, lo cual depende directamente de la humedad del suelo, así como de su composición mineralógica y de la concentración de sales, ya que se relaciona con la fuerza de atracción que presentan las partículas entre ellas o como agregados. Por lo que es indispensable darles importancia a los suelos de origen marino o de otros lugares donde pueden existir altas concentraciones de sales solubles.

El contenido de agua en el que los suelos cohesivos pasan de un estado a otro, son muy diferentes, por lo que el contenido de agua en estas transiciones se usa para la identificación y clasificación de los diferentes suelos. Si el suelo se encuentra saturado o con un alto contenido de humedad tiende a comportarse como un líquido, es decir adquiere propiedades de un líquido, ya que las partículas del suelo presentan una menor interacción entre ellas; conforme disminuye el contenido de humedad el suelo pasa de un estado plástico a un semisólido (el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero su volumen puede cambiar si se somete a secado); hasta adquirir propiedades de un sólido, donde el suelo presenta un bajo contenido de humedad y su volumen no cambia si se expone a secado. Los límites entre los diferentes estados de consistencia, expresados en términos del contenido de humedad del suelo, se conocen como límites de Atterberg (AYSEN, 2002).

Estos límites fueron propuestos inicialmente por Terzaghi & Peck (1967), quienes observaron que los límites de consistencia dependen directamente de la forma, del tamaño efectivo y la uniformidad de las partículas de un suelo (Mitchell & Soga, 2005).



Atterberg propuso de manera convencional las fronteras entre cada uno de los estados que puede tener el suelo al ir perdiendo humedad. Al límite entre el estado semilíquido y estado plástico Atterberg lo llamo límite líquido, la frontera entre el estado plástico y el semisólido lo llamo límite plástico, Figura 4.1. En total propuso 6 límites, pero los más utilizados en mecánica de suelos son los mencionados anteriormente y en ocasiones se utiliza el límite de contracción, el cual corresponde a la transición entre el estado semisólido y sólido (W_s) (Juárez & Rico, 2005).

El *límite líquido* (LL o W_L), es el límite donde el contenido de agua es la necesaria para que el suelo pase de un estado plástico a un estado líquido. También se puede decir que el límite líquido es cuando el suelo deja de comportarse como un líquido al perder humedad y pasa a un estado plástico.

Cuando el suelo tiene el contenido de agua ideal para ser moldeado de diferentes formas sin llegar a la ruptura o fallamiento, se dice que el suelo tiene un comportamiento plástico, a esto se le llamo *índice de plasticidad (IP)*; si el suelo pierde humedad cambiara de un estado plástico a un estado semisólido, donde el suelo al ser moldeado se romperá o agrietara. A la frontera entre estos dos estados se le conoce como *límite plástico* (P_L o W_P).

El índice de plasticidad se obtiene con la diferencia del límite líquido con el límite plástico:

$$IP = LL - PL \quad (19)$$

De acuerdo con Terzaghi (1995) el límite plástico es el contenido de agua debajo del cual las propiedades físicas del agua ya no corresponden a las del agua libre. Yong & Warkentin (1966) se refieren al límite plástico como el contenido de agua más bajo en el que la cohesión entre partículas o grupos de partículas es suficientemente baja para permitir el movimiento, pero lo suficientemente alta para permitir que las partículas mantengas su posición moldeada.

De acuerdo con Mitchell & Soga (2005); el límite líquido, independientemente del estado estructural del agua y de la naturaleza de las fuerzas entre las partículas, es el límite inferior del contenido de agua, en el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, por lo que por encima del límite plástico el suelo puede deformarse sin cambios de volumen o grietas, conservando su forma modificada y por debajo de este límite no puede.

El límite líquido y el índice de plasticidad constituyen unidos una medida de la plasticidad de un suelo, los suelos que tienen un límite líquido y un índice de plasticidad grande, se dice que son suelos muy plásticos; por lo que suelos con valores bajos se les llama ligeramente plásticos (Peck et al., 2001).

Entre más finas sean las partículas del suelo, el índice de plasticidad será mayor. La plasticidad de un suelo se debe a la presencia significativa de partículas minerales de arcilla o materia orgánica. Los poros presentes entre cada partícula son muy pequeños, por lo que el agua se mantiene en ellos a presión negativa por tensión capilar. Dando como resultado cohesión entre las partículas, lo que permite que el suelo se deforme o moldee. Otro factor que contribuye a la plasticidad de un suelo es la absorción de agua debido a las fuerzas de la superficie en las partículas minerales de arcilla (Craig, 2004). Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcillas del suelo, mientras que el índice de plasticidad depende la cantidad de arcilla presente.

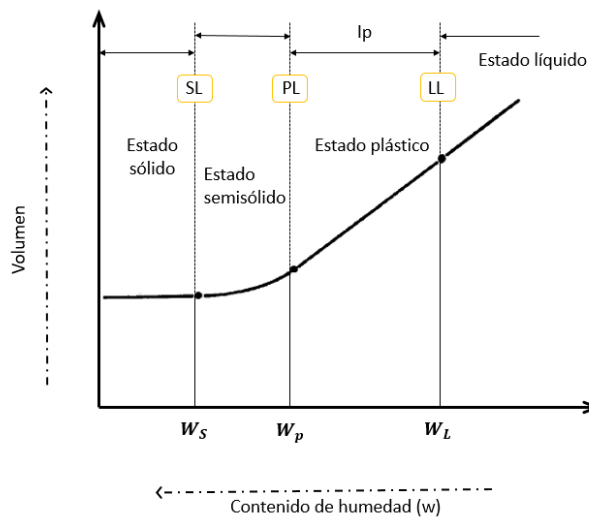


Figura 4.1 Estados y límites de consistencia del suelo
(Tomada de Smith & Smith, 1998).

De acuerdo con Casagrande, si se comparan suelos con mismo valor de límite líquido con índice de plasticidad que aumenta, la compresibilidad es la misma, la permeabilidad disminuye, la tenacidad cerca del límite plástico aumenta y también aumenta su resistencia en seco. Mientras que si se compara suelos de igual índice plástico con límite líquido que aumenta, se tiene que la compresibilidad aumenta, la constante de permeabilidad aumenta, y la tenacidad cerca del límite plástico como la resistencia en seco disminuyen (Crespo, 2004).

4.1.1 Índice de liquidez y actividad

La humedad del suelo es una propiedad importante que se relaciona con el límite líquido y plástico, los depósitos de suelos que presenta humedades cercanas al límite líquido por lo general son suelos más blandos que aquellos suelos que tienen humedades cercanas al límite plástico. Esta relación se puede expresar con el índice de liquidez (I_L), el cual se expresa de la siguiente manera:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (20)$$

Cuando I_L es negativo cuando los suelos tienen humedades menores al límite plástico, si al aumentar el contenido de agua el suelo pasa del estado plástico al líquido, el índice de liquidez pasa de 0 a 1, en cambio si la humedad natural del suelo es mayor que el límite líquido el índice es mayor que 1.

El índice de liquidez sirve para expresar y comparar la consistencia de los suelos cohesivos, este índice indica la proximidad del suelo natural al límite líquido.

Skempton (1953) observó que el índice de plasticidad crece linealmente con el contenido en porcentaje de la fracción fina (arcilla). A la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas de arcilla en el suelo Skempton le denomina *actividad*. Esta relación es importante ya que,



como se ha venido mencionando, tanto el tipo como la cantidad de arcilla influyen en las propiedades del suelo y por ende en los límites de Atterberg. La actividad se usa como un índice para identificar el potencial de expansión de los suelos cohesivos. Representada por la ecuación:

$$A = \frac{W_p}{\% \text{ de arcilla } (\leq 2\mu\text{m})} \quad (21)$$

4.1.2 Generalidades de los límites de Atterberg

- Los valores del límite líquido y plástico para cualquier especie mineral de arcilla pueden variar en un amplio rango.
- Para cualquier mineral de arcilla, el rango en los valores del límite del líquido es mayor que el rango en los valores límite de plástico.
- La variación en los valores del límite líquido entre los diferentes grupos minerales arcillosos es mucho mayor que la variación en los límites plásticos.
- El tipo de catión adsorbido tiene una mayor influencia en los minerales de alta plasticidad como en la montmorillonita, que en los minerales de baja plasticidad (caolinita).
- El aumento de la valencia del catión disminuye el valor del límite líquido de las arcillas expansivas, pero tiende a aumentar el límite líquido de los minerales no expansivos.
- La halloysita hidratada tiene un límite de plástico inusualmente alto y un bajo índice de plasticidad.
- Cuanto mayor es la plasticidad, mayor es la contracción al secarse (menor es el límite de contracción).
- Para evaluar las características de resistencia a la intemperie de las arcillas y pizarras, se utiliza el valor del LL. Si estos materiales se someten a procesos repetidos de humedad y secado, su límite líquido tiende a aumentar, a este aumento se le considera una medida para la susceptibilidad de las lutitas a la intemperie.
- Para determinar una medida cualitativa del contenido de materia orgánica de un suelo, se considera la comparación del límite líquido antes y después del secado en horno de la muestra, ya que este límite disminuye drásticamente en suelos que contienen gran cantidad de materia orgánica (ASTM, 2000).
- Conforme el contenido de agua de un suelo cohesivo se acerca al límite plástico, la rigidez y el grado de compactación aumentan (Terzaghi et al., 1996).

Los límites de Atterberg son importantes ya que se usan para la identificación, descripción y clasificación de los suelos cohesivos y para especificar la fracción de grano fino de los materiales de construcción, además de que constituyen la base para determinar las propiedades mecánicas fundamentales de los suelos que son de utilidad en la ingeniería, como por ejemplo la

compresibilidad, la conductividad hidráulica (permeabilidad), compactabilidad, contracción y resistencia al corte (ASTM, 2000).

4.2 Determinación de los límites de Atterberg

Cuando la mezcla de suelo y agua pasa de un estado a otro, no produce un cambio brusco en las propiedades físicas, por lo que las pruebas para su determinación son empíricas, las cuales definen los valores de los límites (Peck et al., 2001). De acuerdo al método de prueba estándar ASTM D 4318-00 para determinar el límite líquido, plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo, se obtiene de la siguiente forma.

Para el límite líquido se necesita un instrumento mecánico desarrollado por Arthur Casagrande (1932), consiste en una copa semiesférica de latón (Figura 4.2), la cual se tiene que dejar caer de una altura de 10 mm sobre una base de goma dura, el cual tiene un rebote elástico de aproximadamente 77 %; con una frecuencia de dos caídas cada segundo. Antes de iniciar la prueba es necesario calibrar la copa de Casagrande, para que la caída sea la indicada anteriormente, para esto se hace con un prisma metálico de 1 cm por lado, el cual se coloca en la parte inferior de la copa, logrando que la copa tenga una separación de menos de 1 mm del prisma.

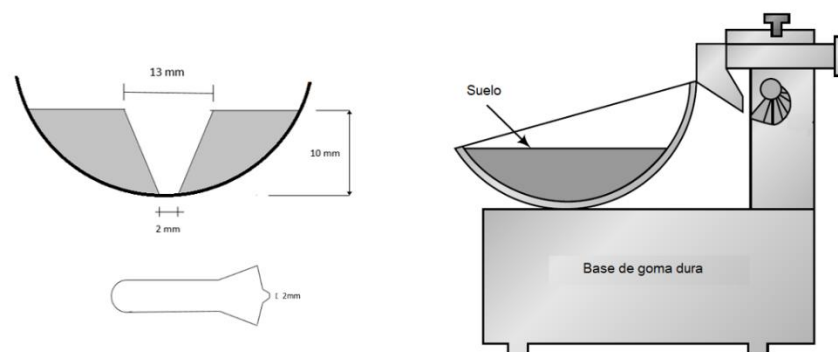


Figura 4.2 Copa de Casagrande y ranurador estándar (Tomada de Budhu, 2010).

Para obtener este límite es necesario remoldear (homogenizar) la muestra de suelo y colocar el suelo en la copa con una espátula apretando el suelo hacia abajo y expandiéndolo a lo largo de un plano vertical normal al eje de rotación de la taza, con una profundidad aproximada de 10 mm en su punto más profundo, llenándola al 60 % de su capacidad. Una vez confirmado que el suelo en la copa no presenta burbujas de aire, se utilizara el ranurador estándar, para realizar una ranura en el suelo con el borde biselado hacia adelante. Las dos mitades del suelo en la copa fluyen gradualmente a medida que se deja caer la copa sobre la base. Se realizará el procedimiento de tres a cuatro veces y entre cada uno se le agregará agua destilada al suelo, para poder cerrar la ranura en su parte inferior con una longitud de 13 mm (1/2 in) con diferente número de golpes y con diferente contenido de agua (Figura 4.3). Entre cada procedimiento se registrará el número de golpes con los que cerro el surco y con la espátula se tomará una muestra de suelo dentro de la

porción cerrada de la ranura del ancho de la espátula y después se pesará; para posteriormente introducirla al horno con una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, en un período de 12 horas mínimas. A la muestra de suelo que se queda en la copa entre cada prueba se volverá a homogenizar con toda la muestra de suelo y se le agregara agua destilada para aumentar el contenido de agua y disminuir el número de golpes; tanto la copa como el ranurador se lavan y secan entre cada prueba.

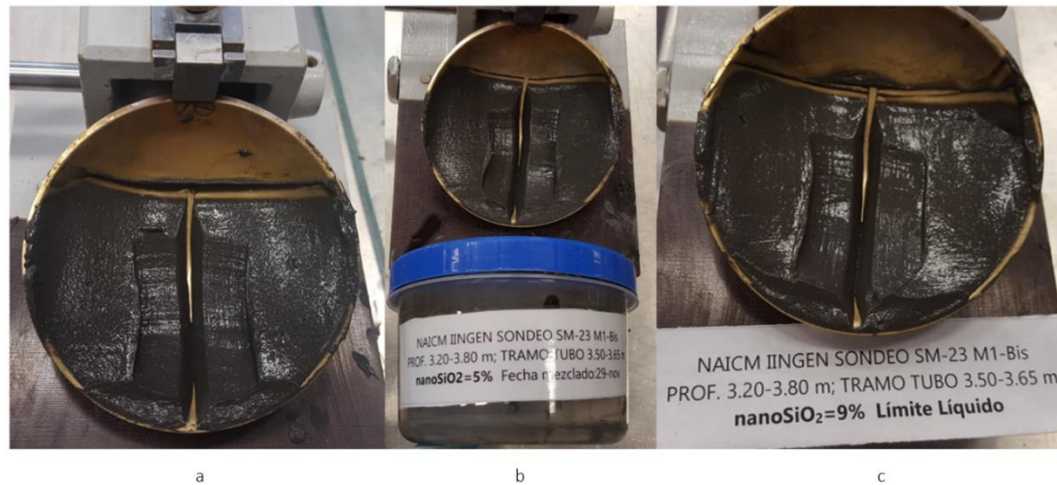


Figura 4.3 Obtención del límite líquido con la copa de Casagrande.

Los resultados se registrarán en una gráfica semilogarítmica (Figura 4.4), en el eje de las abscisas se colocará el número de golpes y el eje de las ordenadas el contenido de humedad en porcentaje. El límite líquido de la muestra de suelo se tomará, como el contenido de agua en la intersección entre la línea de tendencia de los resultados (curva de flujo o como línea de estado líquido), la cual es una recta cerca del límite líquido, a los 25 golpes, o sea es el contenido de agua que presenta el suelo cuando la ranura se cierra con una distancia de 13 mm o $\frac{1}{2}$ pulgada a 25 golpes. La pendiente de la línea de flujo se define como el índice de flujo (I_F). La cual queda definida de la siguiente manera (Das, 2008):

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log \frac{N_2}{N_1}} \quad (22)$$

Donde

I_F = Índice de flujo

w_1 = Contenido de humedad del suelo, en porcentaje, correspondiente a N_1 golpes.

w_2 = contenido de humedad del suelo, en porcentaje, correspondiente a N_2 golpes.

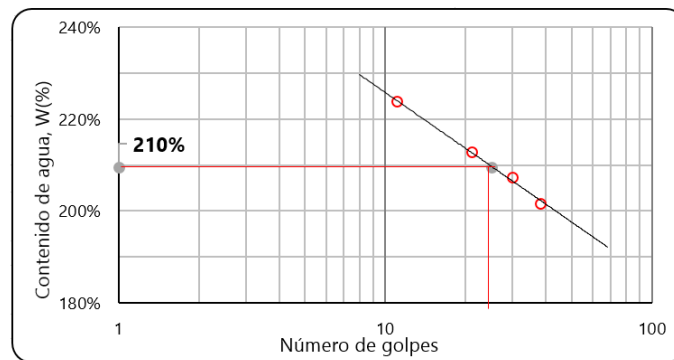


Figura 4.4 Gráfica semilogarítmica para determinar el límite líquido.

Para determinar el límite plástico, se tomará una porción de 20 g o más del mismo suelo del que se realizó la prueba para determinar el límite líquido. Es necesario que esta porción de suelo tenga poca humedad, de tal forma que al ser manipulado con las manos no se quede adherido en ellas, se le puede disminuir su humedad con ayuda de un ventilador eléctrico y extendiéndolo en una placa de vidrio.

Con la palma de la mano se realizarán simultáneamente dos rollitos de 3 mm de espesor por 15 cm de largo sobre una placa de vidrio, Figura 4.5. En el momento que los rollitos de suelo tengan estas dimensiones, es importante mencionar, que no se pueden dejar de manipular con la palma de la mano y es necesario estar observándolos por si se llegan a romper a presentar grietas, las cuales significan que el suelo está en su límite plástico. Al llegar a este límite, se colocan los rollitos en un contenedor de masa conocido, se pesan y se meten al horno con un mínimo de 12 horas.



Figura 4.5 Rollitos de 3 mm, para determinar el límite plástico del suelo.

Tanto para determinar el límite líquido como el límite plástico es indispensable que se realicen con la porción de suelo que pasa el tamiz de 425 μm (No. 40).

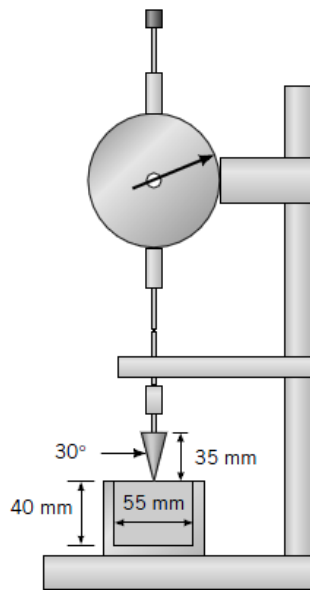


Figura 4.6 Cono de penetración para la obtención del límite líquido. (Tomada de Smith & Smith, 1998).

Algunas de las deficiencias para obtención del límite líquido en el método de Casagrande es la tendencia que tienen algunos suelos de baja plasticidad a deslizarse y licuarse con un golpe en la copa en vez de fluir plásticamente. Por lo que existe otro método para determinar el límite líquido y plástico de un suelo conocido como método del cono de caída el cual tiene mayor precisión; se dará una descripción poco detallada ya que para el desarrollo de este trabajo se usó el primer método descrito.

Este método consiste en un cono mecánico con un ángulo de 30° y un peso de 80 g (Figura 4.6), para determinar el límite líquido se deja caer el cono por un período de cinco segundos y se mide la penetración del cono en la muestra de suelo en milímetros. La muestra se coloca en un contenedor de 40 mm de profundidad y 55 mm de diámetro. Para determinar el límite líquido se desarrollan varias pruebas con diferentes contenidos de agua en la muestra de suelo y con el mismo período en la penetración del cono; para medir que tanto penetra en el suelo a diferente humedad.

Los resultados se trazan en una gráfica logarítmica, en el eje de las ordenadas se representa por el contenido de humedad versus penetración en las abscisas. Se traza la línea de tendencia a los datos y el contenido de agua correspondiente a una penetración de 20 mm del cono en la muestra de suelo, define el límite líquido.

Para la obtención del límite plástico se determina repitiendo la prueba con un cono de la misma geometría, pero con un peso de 240 g y se obtiene con la siguiente expresión (Díaz-Rodríguez, 2014):

$$W_p = W_L 4.24 \Delta w \quad (23)$$

Donde Δw es la separación en términos de contenido de agua, entre la recta para obtención del límite líquido y la recta obtenida en la prueba para el límite plástico.

De acuerdo con Budhu (2010) citando a Feng (2000), el límite plástico se puede determinar mediante la prolongación de la línea de tendencia de los datos para la obtención del límite líquido, hasta la intersección con eje del contenido de agua a una profundidad de penetración del cono de un 1 mm (C), expresado en la siguiente relación:

$$W_p = C(2)^m \quad (24)$$

Donde m representa la pendiente positiva de la línea de tendencia.

La prueba para la obtención del límite líquido es una forma de prueba dinámica de corte, por lo que Casagrande (1932) establece que el W_L corresponde al contenido de agua en el que el suelo tiene una resistencia al corte no drenado de 2.5 KPa, y el límite plástico es cerca de 200 KPa. Por lo que el índice de plasticidad es el incremento del contenido de agua necesario para reducir la resistencia del suelo cien veces (Mitchell & Soga, 2005).

4.3 Carta de plasticidad

Entre el límite líquido y el índice de plasticidad existe una relación, la cual se representa en un gráfico llamado carta de plasticidad (Figura 4.7), desarrollado por Casagrande (1932). En donde las ordenadas están representadas por valores de índice de plasticidad y las abscisas por valores del límite líquido.

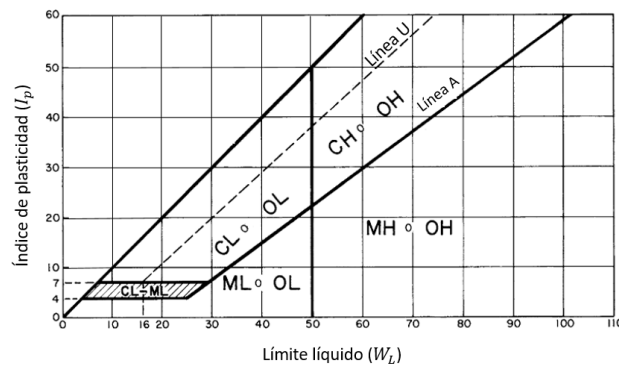


Figura 4.7 Carta de plasticidad (Tomada de ASTM D-2487).

En la carta de plasticidad está dividida en seis regiones por la línea A (representada por la ecuación $I_p = 0.73 (w_L - 20) \%$), la cual representa una frontera empírica entre las arcillas inorgánicas, que por lo general siempre están arriba de esta línea y entre los suelos orgánicos (pueden ser limos orgánicos o arcillas orgánicas), los cuales siempre estarán debajo de ella.

Todos los suelos que queden representados arriba de la línea A, como se mencionó son arcillas inorgánicas, su plasticidad varía de baja ($w_L < 30$) a alta ($w_L > 50$) con valores crecientes del límite líquido. Los suelos que se encuentren por debajo de la línea A pueden ser limos inorgánicos, limos orgánicos, o arcillas orgánicas. Si son inorgánicos presentan una compresibilidad baja (límite líquido inferior a 30), media (su límite líquido está comprendido entre 30 y 50) o alta (presenta un límite líquido mayor a 50). Si son limos orgánicos tienen como característica un límite líquido entre 30 y 50; y si son arcillas orgánicas su límite líquido es mayor a 50.

Para poder determinar entre un suelo orgánico y uno inorgánico, se puede realizar ejecutando dos pruebas para la obtención del límite líquido con un mismo material, una prueba se pondrá a secar en el horno y la otra prueba al aire libre. Si se trata de un material orgánico, el secado en horno produce cambios irreversibles en el suelo, y el límite líquido disminuye. Se considera un suelo orgánico cuando la muestra que se secó al horno es 0.75 veces inferior a la muestra que se secó al aire libre.



La línea U, expresa un límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación para la línea U se expresa como (Budhu, 2010):

$$PI = 0.9 (LL - 8) \quad (25)$$

La información que proporciona la carta de plasticidad se usa como base para la clasificación de los suelos en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

4.4 Límites de Atterberg en suelos contaminados

Los suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo representan un gran riesgo para el ecosistema en general, en México la intensa explotación de ese recurso sin las precauciones ambientales necesarias, han provocado la contaminación de suelos y de los sistemas de agua. Y si a esto le agregamos la falta de mantenimiento a las instalaciones, fugas o derrames y además el robo de combustible, se vuelve un problema cada vez mayor. Los suelos contaminados son alterados en sus propiedades físico-químicas como biológicas y por lo tanto se modifica su comportamiento ingenieril; debido al cambio en las características del fluido en los poros del suelo. Lo que podría generar problemas geotécnicos relacionados con la construcción o en la estructura de cimentación en el sitio contaminado, ya sea que ocasione una falla estructural o funcional de las estructuras, especialmente cuando la contaminación causa un aumento significativo de la plasticidad del suelo, pérdida de su capacidad de carga, incremento en el asentamiento. En esta apartado se hablará específicamente como cambian los límites de Atterberg en suelos contaminados, pero en general es de gran importancia entender el comportamiento geotécnico de estos suelos, ya que son ampliamente utilizados en obras de ingeniería, como por ejemplo se usan para revestimiento de vertedero, como terraplén, material de base y relleno por mencionar algunos (Rahman et al., 2010). El uso de suelo contaminado sin ninguna estabilización o remediación no es recomendado (Ibukun et al., 2014).

Galindo Ortiz (2012) estudió las propiedades de una arcilla inorgánica contaminada con hidrocarburo en diferentes porcentajes (5, 10, 15 y 30 %), a 15 y 55 días después de la contaminación. En general se observó una tendencia en la variación de las propiedades dependiendo de la concentración del contaminante. En particular en los límites de Atterberg se observan variaciones evidentes en los resultados, estas variaciones no solo dependen del porcentaje de contaminante sino también del tiempo a la exposición del mismo. Una de las explicaciones para tales variaciones se debe a que la arcilla presenta una capacidad de absorción alta, por lo que pueden absorber agua u otras moléculas, mientras que los hidrocarburos tienden a formar aglomerados de partículas y repeler partículas de agua. Por lo que se pudo llegar a la conclusión de que los porcentajes de variación del LL, tienden a disminuir a concentraciones



mayores de 15 % de hidrocarburo conforme pasa el tiempo de exposición, mientras que a concentraciones menores de 10 % se observa un aumento (Tabla 4.1).

Con respecto a la determinación del límite plástico en los mismos suelos se tiene un rango aproximado entre 18.7 % y 24.59 %. Se determinó que el LP de la muestra sin contaminar es menor a los suelos que presentan hidrocarburo. En general el porcentaje de variación del límite plástico disminuye cuando se tienen concentraciones por debajo del 10 % de hidrocarburo, mientras que aumenta con concentraciones mayores. Los suelos que presentan mayor concentración de hidrocarburos en porcentaje y peso, se clasificaron como suelos arcillosos de alta compresibilidad (Galindo, 2012).

Tabla 4.1 Límites de consistencia en suelos contaminados. Modificada de (Tomada de Galindo, 2012).

Tipo de suelo	% de hidrocarburo	% LL	% Variación del tiempo respecto a los 15 días	% LP	% Variación del tiempo respecto a los 15 días	IP %	Clasificación	LC %
No contaminado	0%	35		18.78		16.22	CL	14.85
Contaminado	5% a los 15 días	46.5	4.3	24.11	9.87	22.39	CL	15.41
	5% a los 55 días	48.5		21.73		26.77	CL	12.55
	10% a los 15 días	29	18.97	20.75	4.67	8.25	CL	10.76
	10% a los 55 días	34.5		19.78		14.72	CL	10.82
	15% a los 15 días	54.5	17.43	22.47	1.91	32.03	CH	15.83
	15% a los 55 días	45		22.9		22.1	CL	11.09
	30% a los 15 días	55	9.09	21.11	16.49	33.89	CH	18.87
	30% a los 55 días	50		24.59		25.41	CH	16.94

Rahman et al. (2010) demostraron la variación de los límites de Atterberg en suelos contaminados artificialmente con 4, 8, 12, y 16 % de aceite del peso seco de los suelos sin contaminar. Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron suelos originados a partir de rocas basálticas erosionadas de grado V (marga arenosa) y VI (marga limosa). De acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos ambas muestras se clasificaron como MH.

Los resultados mostraron que la contaminación del aceite disminuyó el límite líquido y los valores límite de plástico para ambos grados de suelos erosionados como se observa en la Figura 4.8. Para el grado V del suelo, la disminución en el límite de plástico y el límite líquido estuvieron representados por 21 y 39 %, respectivamente. Mientras tanto, para el grado VI del suelo, para límite líquido (39 %) y para límite plástico (19 %). Por lo que la presencia de aceite ha disminuido el contenido de humedad de los límites del suelo contaminado. Rahman et al. (2010) determinó que esta disminución podría deberse a que la presencia de agua alrededor de las partículas de arcilla cargadas disminuye a medida que el líquido no polarizado de petróleo ocupa el suelo. El agua en suelo sin contaminar actúa como un agente aglutinante entre las partículas de arcillas, lo cual contribuye a la característica de plasticidad en los suelos, lo que ocasiona el aceite es falta de interacción entre las partículas y el agua, por lo que se provoca una disminución el contenido de humedad. Khomehchian et al. (2007), observó un comportamiento similar para suelos SM Y CL. Mientras tanto Shah et al. (2003) determinó que para suelos contaminados se tenía un aumento en

el límite líquido y plástico con respecto al suelo sin contaminar, pero el índice de plasticidad disminuía (Rahman et al., 2010).

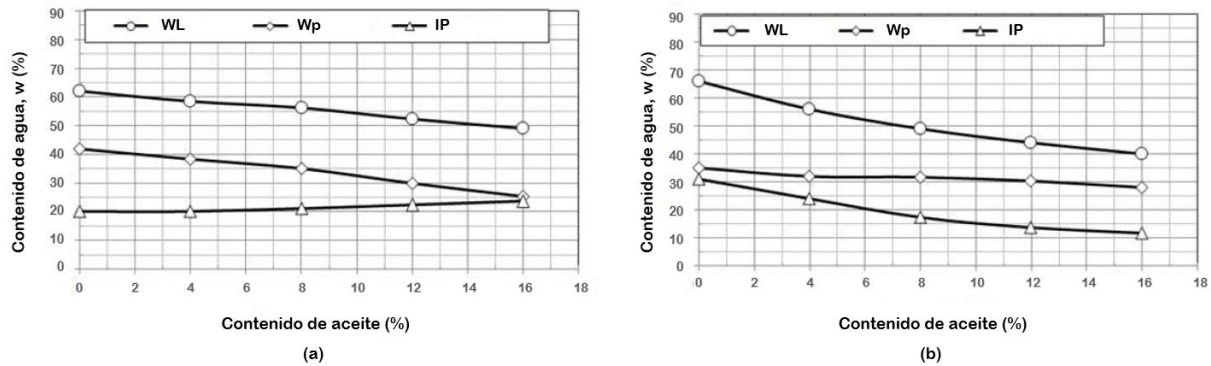


Figura 4.8 Variación en los límites de Atterberg en el suelo contaminado (Tomada de Rahman et al., 2010).

Ibukun et al. (2014), determinaron el impacto de petróleo crudo sobre la plasticidad, la resistencia y la permeabilidad de un suelo arcilloso laterítico, de acuerdo con USC el suelo se clasifica como arcilla arenosa (CL); y también estudiaron el comportamiento del suelo sin contaminar. Para la preparación de la muestra se añadió 2, 4, 6, 8, y 10 % (de peso seco del suelo) de petróleo crudo, con un curado de 24 horas para su homogenización.

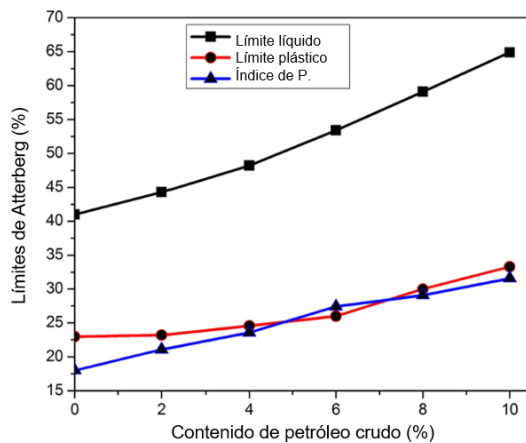


Figura 4.9 Impacto en los límites de Atterberg en suelos contaminados con petróleo crudo. (Tomada de Ibukun et al., 2014).

Como resultado de la prueba para la obtención de los límites, se obtuvo que tanto el límite líquido como el plástico y el índice de plasticidad aumentaron con el aumento en el contenido de petróleo crudo, como se observa en la Figura 4.9. Por lo que se determinó que la adición de petróleo al suelo causa una expansión de las capas de minerales que constituyen al suelo, el petróleo puede haber envuelto a los minerales de arcilla como el agua absorbida adherida a la superficie (doble capa difusa), por lo que crea un aumento en el grosor de la doble capa, dando como resultado un aumento en los límites y en la plasticidad. Como el petróleo crudo es hidrofóbico y, al cubrirse con partículas de arcilla

individuales, no permite que el agua libre (agua que no sea el agua adsorbida) interactúe con las partículas de arcilla.



El suelo con la adición del 10 % de petróleo crudo se clasifico como un suelo orgánico de lata plasticidad (OH), y como se mencionó antes de su contaminación el suelo se clasifico como arcilla arenosa (Ibukun et al., 2014).

5 NANOTECNOLOGÍA

5.1 Nanociencia

Las primeras ideas de la nanociencia y nanotecnología fueron introducidas en 1959 por el físico Richard Feynman en una reunión de la Sociedad Americana de Física en el Instituto de Tecnología de California (CalTech). Feynman durante su discurso mencionó que:

Los principios de la física, hasta donde podemos saber, no descartan la posibilidad de que se puedan manipular las cosas átomo a átomo.

Pero no fue hasta una década después, cuando el profesor Norio Taniguchi, de la Universidad de Ciencias de Tokio, estableció el término *nanotecnología*, al presentar su trabajo titulado *On the basic concept of nanotechnology*. Sin embargo la era moderna de la nanotecnología nació hasta después de 1981 con el desarrollo del microscopio de efecto túnel (STM) y en 1986 con el microscopio de fuerza atómica (AFM) (National Nanotechnology Initiative); en este mismo año Eric Drexler con su libro *Engines of creation* presentó las visiones más radicales de la nanotecnología.

La *nanociencia* es la ciencia de la nanoescala que se encarga del estudio de fenómenos y la manipulación de materiales a una escala atómica y molecular, donde las propiedades de la materia son diferentes de la escala macro aun siendo el mismo material (Clement et al., 2012). Donde la física, la química, la biología, la ciencia de los materiales y la ingeniería comparten los mismos objetivos para el desarrollo de la nanociencia.

5.2 Nanotecnología

La nanotecnología converge y unifica los principios de la ciencia, la ingeniería y la tecnología para la comprensión, la caracterización, el diseño, el control, la producción y la aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas de la materia a escala nanométrica en dimensiones comprendidas entre 1 y 100 nanómetros (Díaz del Castillo, 2012).

El nanómetro (nm) es una unidad de longitud, la cual corresponde a la milmillonésima parte del metro (10^{-9}), es complicado imaginar una escala tan pequeña, así que pensemos en una hoja de papel la cual tiene unos 100 000 nanómetros de espesor o en un cabello humano que tiene alrededor de 80 000 nanómetros de ancho. En la Figura 5.1 se muestran algunas relaciones de objetos en la nanoescala, para tener un mayor entendimiento acerca de las dimensiones de los nanobjetos. El nanómetro es el diminuto territorio donde existen los átomos y las moléculas, por lo



que la nanotecnología (la ingeniería a escala atómica) es la disciplina que controla y reestructura la materia a nivel atómico y molecular (Menéndez, 2011). El principal objetivo de la nanotecnología es crear materiales con nuevas propiedades y funciones fundamentales (Clement et al., 2012).

A pesar de que la nanociencia y la nanotecnología moderna son bastante nuevas, se utilizaron materiales a nanoescala durante siglos. Las partículas de oro y plata de pequeño tamaño crearon colores en las vidrieras de las iglesias medievales hace cientos de años. El proceso que utilizaron los artistas modificó la composición de los materiales, incluso crearon un nuevo material. En el siglo IX en Mesopotamia se utilizaban nanopartículas metálicas para darle un efecto brillante a la alfarería.

La nanotecnología tiene un gran impacto en la vida de los humanos y en el ecosistema en general, pero aún faltan muchos estudios de cómo estos materiales con propiedades diferentes repercuten en cada uno de ellos. Específicamente la nanotecnología tiene un gran impacto en muchos sectores de la economía. Lo que se busca es mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, además de proporcionar capacidades de auto reparación, auto limpieza; sin dejar de lado que sean materiales más económicos, sustentables y resilientes. Como por ejemplo, materiales fuertes y livianos para la industria aeroespacial; agua potable limpia y accesible en todo el mundo; computadoras súper rápidas con grandes cantidades de almacenamiento; superficies autolimpiantes; sensores portátiles y monitores de salud; alimentos más seguros mediante el envasado y el control; recrecimiento de la piel, los huesos y las células nerviosas para obtener mejores resultados médicos; ventanas inteligentes que se iluminan u oscurecen para conservar energía; y concreto habilitado para la nanotecnología que se seca más rápido y tiene sensores para detectar el estrés o la corrosión en carreteras, puentes y edificios; entre otros. La investigación y el desarrollo en nanotecnología que se están llevando a cabo en la actualidad proporcionarán la base para futuras aplicaciones que permitan capacidades y productos completamente nuevos. (Whitman et al., 2017).

5.3 Escala nanoscópica

También llamada escala nanométrica o nanoescala, la cual hace referencia a las estructuras con longitud aplicable a la nanotecnología en un rango de 1 a 100 nanómetros (nm); es la escala donde los llamados efectos cuánticos rigen el comportamiento y las propiedades de las partículas. Las propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas o mecánicas de las nanopartículas son muy sensibles a su tamaño y se pueden modificar variando su forma y dimensiones (Elices, 2003). La nanotecnología y nanociencia considera como tamaño mínimo de las estructuras de 1 nm, para evitar que átomos individuales o grupos muy pequeños de átomos se les denomine como nanobjetos (Cornejo, 2015).

La escala nanométrica está casi en el límite inferior de la escala mesoscópica, utilizada en la mayor parte de los sólidos, en algunas ocasiones se considera como la escala donde cambian las propiedades de los materiales. Cuando una partícula disminuye su tamaño, la proporción de número de átomos que se encuentran en la superficie con respecto al número total de átomos en el interior de la partícula aumenta significativamente, en contraste con las mismas partículas a una escala mayor (Menéndez, 2011).

El mundo nano es donde se permite a los científicos utilizar las propiedades físicas, químicas, mecánicas y ópticas únicas de los materiales que se producen de forma natural a esa escala (National Nanotechnology Initiative), representa el umbral natural donde todos los sistemas vivos y artificiales trabajan.



Figura 5.1 Escala nanométrica (Tomada de National Nanotechnology Initiative).



5.4 Nanomateriales

Como se mencionó; las partículas de los nanomateriales poseen una gran cantidad de átomos en la superficie, en contraste con materiales de mayor escala que se ubican en su masa. Existen dos factores que hacen que las propiedades de los nanomateriales cambien: área de la superficie aumentada y efectos cuánticos. Los nanomateriales tienen una superficie mucho mayor por unidad de masa en comparación con los materiales convencionales, y los efectos cuánticos tienen que ver con el pequeño tamaño que tienen, lo que a su vez afecta el comportamiento óptico, eléctrico y magnético de los materiales (Clement et al., 2012).

De acuerdo con European Commission, un nanomaterial, se entiende como un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre un nm y 100 nm. En casos específicos y cuando se justifique por preocupaciones de medio ambiente, salud, seguridad o competitividad, el umbral de la granulometría numérica del 50 % puede sustituirse por un umbral comprendido entre el 1 % y el 50 % (European Commission, 2011).

Podemos clasificar a los nanomateriales en tres categorías:

1. *Nanomateriales naturales*: Aquellos materiales pertenecientes a la escala nanométrica que fueron creados por la naturaleza sin ninguna intervención humana, como por ejemplo las proteínas, los virus y bacterias, polvos lunares y volcánicos, así como las partículas nanométricas de magnetita fabricadas por la bacteria *Magnetospirillum magnetotacticum*, el magnetismo de las partículas les ayuda para encontrar una dirección favorable para su crecimiento.
2. *Nanomateriales antropogénicos o accidentales*: Son materiales creados involuntariamente por el hombre, en procesos industriales o en procesos de combustión de combustibles fósiles como el hollín. Otros ejemplos son las partículas producto de la oxidación de gases como los sulfatos o los nitratos.
3. *Nanomateriales manufacturados*: Son diseñados y fabricados intencionalmente, los cuales tienen un propósito específico.

También podemos clasificar a los materiales de acuerdo a sus dimensiones, Figura 5.2. Un nanomaterial n -dimensional es aquel material que tiene n dimensiones fuera de la nanoescala, es decir, n dimensiones mayores de 100 nanómetros. Esta clasificación se basa en el número de dimensiones, que no están limitadas al rango de la nanoescala (< 100 nm) (Ashby et al., 2009). Por lo que tenemos nanomateriales:

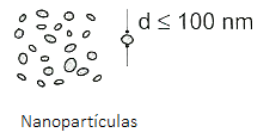
1. Cero-dimensionales (0-D): Son materiales en las que todas sus dimensiones están dentro de la escala nanométrica, o sea que ninguna mide más de 100 nm.
 - Nanopartículas: existen muchas clases, incluyendo las obtenidas a partir de oro, plata, dióxido de titanio, óxido de zinc, silicio, etc.
 - Negro de carbono.
 - Fullerenos.

2. Monodimensionales (1-D): Dos dimensiones < 100 nm, o sea en la nanoescala y una más grande.
 - Nanotubos de carbono.
 - Nanofibras.
 - Nanocables.

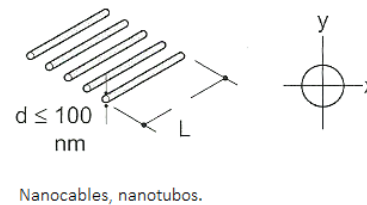
3. Bidimensionales (2-D): Una dimensión < 100 nm y dos dimensiones más grandes, por lo que presentan forma de placas.
 - Grafeno.
 - Nanocapas.
 - Nanoredes de carbono.

4. Tridimensionales (3-D) o materiales nanoestructurados: Ninguna de sus dimensiones están dentro de la nanoescala. A pesar de esto, poseen una estructura nanocristalina (se pueden componer de una disposición múltiple de cristales a nanoescala) o tienen presencia de características a nanoescala (tienen disposición de nanopartículas) (Ashby et al., 2009).

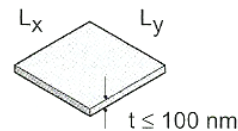
0-D Todas las dimensiones (x,y,z) en la nanoescala



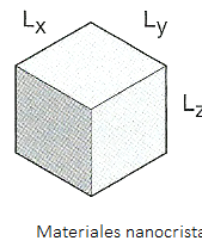
1-D Dos dimensiones (x,y) en la nanoescala, la otra dimensión (L) no.



2-D Una dimensión (t) en la nanoescala, L_x y L_y no están en la nanoescala.



3-D Sin dimensiones en la nanoescala.



Materiales nanocristalinos y nanocompuestos.

Figura 5.2 Nanomateriales. (Tomada de Ashby et al., 2009).



- Agregados o aglomerados de nanobjetos.
- Materiales nanoporosos.
- Nanocompuestos.
- Polvo nanoestructurado.
- Nanoespuma sólida.
- Nanodispersión fluida.

5.5 NanoSiO₂

La nanoSiO₂ es un material nanoestructurado y se encuentra dentro de la clasificación de materiales nanoporosos. Existe una gran variedad de nanomateriales porosos, entre ellos podemos encontrar con diferentes tipos de estructuras ya sean orgánicas (carbón vegetal), inorgánicas (sílice, nitruro, etc.) o metal-orgánicas; con diferentes formas de poro como desordenada, esférica, cilíndrica o laminar; con tamaños de 0.5 nm hasta varias décimas de nanómetros, así como con diferentes propiedades de la superficie de los poros. Estos nanomateriales tienen tamaños de poro entre 2 nm y 50 nm, y entre mayor sea su porosidad tendrán una mayor área de superficie (Varadan et al., 2010).

De acuerdo a la Comisión Europea (2012), la sílice amorfa es un nanomaterial inorgánico no metálico, existen varias formas de sílice amorfa sintética (sus partículas primarias tienen un rango de tamaño de 1-100 nm), entre ellas la sílice precipitada, geles de sílice, sílice coloidal o sales de sílice y sílice ahumada o pirogénica. La mayoría de las formas se usan como dispersiones estables de partículas de SiO₂ no aglomeradas (sílice coloidal) o como partículas aglomeradas o agregadas (otras formas de sílice).

La sílice coloidal es una dispersión acuosa e insoluble en agua, de partículas de sílice microscópicas producidas a partir de soluciones saturadas de ácido silícico, son dispersiones estabilizadas de partículas de SiO₂ no aglomeradas, en su mayoría esféricas. Por lo general presentan partículas con un tamaño entre 7 y 22 nm (Huang & Wang, 2016). Este tipo de sílice no es tóxica, es biológica y químicamente inerte y tiene excelentes características de durabilidad (Song-Yuan et al., 1994).

Los principales usos se encuentran en la industria del papel ayuda a mejorar el manejo del papel reciclado; en revestimientos, pinturas, tintas y adhesivos, aumentando la resistencia, resistencia al rayado y a la abrasión; en la industria alimentaria ayuda a clarificar vino, cerveza, zumos de frutas, entre otros; para plásticos y compuestos a granel; para fotografía, tratamiento de superficie de



metal; como catalizador; para la industria textil; cuero; y la industria de la construcción para aislamiento térmico y acústico.

La sílice pirogénica (ahumada) se fabrica utilizando el proceso de hidrólisis a alta temperatura. Se utiliza para mejorar la elasticidad y durabilidad en plásticos, cementos, gomas de silicona, en revestimientos y tintas de impresión, cosméticos y cremas dentales. También se utiliza como agente antiespumante en la fabricación de papel, café y té (European Commission, 2012).

Los materiales a escala nanométrica, debido a sus propiedades físico-químicas, trae peligros y riesgos, que no son fácilmente vistos por los ojos humanos ni capturados a una escala mensurable. Tales propiedades los convierten en una preocupación principal por su uso rutinario y su entrada al ecosistema a través de aguas residuales industriales o municipales (Brar et al., 2015). Por esta razón, es indispensable estar familiarizado con los cuidados necesarios en el manejo de los nanomateriales, la cual se enfrenta con una gran problemática, porque a pesar de que existe un gran avance en la nanotecnología, actualmente no se cuenta con suficiente información acerca de la toxicología, sobre los efectos en la salud, ni sobre la eficacia de los sistemas de ventilación y de los equipos de protección; y de la métrica adecuada para determinar la exposición. Por ello, es necesario contar con un adecuado equipo de protección personal, como protección respiratoria, ocular, ropa protectora ligera, guantes protectores. Y además de tomar con las medidas necesarias al momento de manipular cualquier tipo de sustancia, como NO inhalar gases/vapores, evitar el contacto directo. Así como no ingerir alimentos ni bebidas al momento de utilizar el nanosustancia. Y por supuesto lavar cara y manos al terminar de utilizarlo (INSHT, 2015).

5.6 Mejoramiento del suelo a través de la nanotecnología

Como las arcillas tienen tamaños inferiores a $2 \mu\text{m}$, tienden a comportarse nanomecánicamente, como vimos en el capítulo anterior, el tamaño de las arcillas les confiere propiedades y comportamiento diferente a los suelos granulares. Por lo que una manipulación controlada de las propiedades como tamaño, superficie específica e interacciones entre partículas, además de la química y de la composición a nanoescala pueden servir como bloques para la construcción de materiales mejorados (Khitab & Anwar, 2016).

Uno de los materiales naturales más abundantes en la industria de la construcción es el suelo, el cual por ser muy abundante y de bajo costo es ampliamente utilizado. Con el acelerado desarrollo de la nanotecnología, las nanosustancias tienen cada vez mayor intervención en la nanomodificación de las propiedades de materiales naturales. Esta sección incluye algunas recopilaciones de algunos trabajos que han tenido éxito en la nanomodificación de suelos.

- Changizi y Haddad investigaron los efectos de la fibra de poliéster reciclada (botellas de polietileno), más conocida como PET, en combinación con nanoSiO₂. Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos, específicamente la resistencia al corte, la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y los efectos en el módulo elástico. En este estudio se realizaron diferentes tipos de pruebas entre ellas se nanomodificó el suelo con diferentes porcentajes de SiO₂ (0.5, 0.7 y 1 % del peso seco del suelo). Dando como resultado, que al incremento del contenido de nanoSiO₂ conduce a un aumento en el esfuerzo cortante del suelo nanomodificado. Por lo que el aumento en el estrés normal contribuye al aumento en la resistencia al corte de la arcilla. Los resultados de la prueba de compresión no confinada de arcilla con nanoSiO₂, muestran que con el aumento en el contenido de nanoSiO₂, aumenta el UCS máximo, pero el UCS residual disminuye. El módulo de elasticidad también tiende a aumentar con el contenido de nanoSiO₂ (Changizi & Haddad, 2015). En la Figura 5.3 se observa el comportamiento del suelo en la adición de nanoSiO₂.

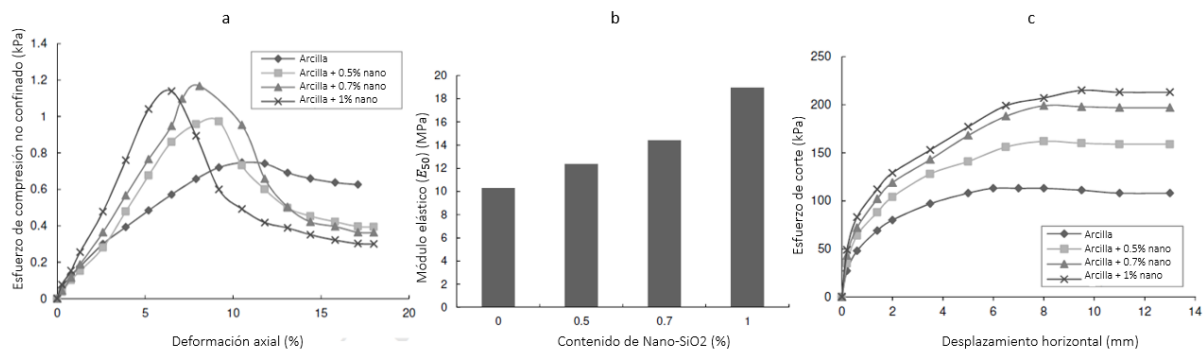


Figura 5.3 Comportamiento del suelo con la adición de diferentes contenidos de nanoSiO₂. (a) Curvas tensión-deformación (UCS). (b) Módulo elástico. (c) curva de esfuerzo desplazamiento a $\sigma_n = 300$ KPa (Resistencia al corte). (Tomada de Changizi & Haddad, 2015).

- Taha y Taha realizaron un estudio experimental sobre suelo residual, el cual se mezcló con diferentes proporciones de bentonita (S1 = 0 % de bentonita, S2 = 5 % de bentonita, S3 = 10 % de bentonita y S4 = 20 % de bentonita) para producir cuatro tipos de muestras de suelo con diferentes índices de plasticidad. A estas muestras se le agregaron tres nanomateriales: nanoarcilla, nanoaluminio y nanocobre, en diferentes contenidos de porcentajes con respecto al peso seco del suelo. Para las muestras con nanoarcilla se obtuvo una reducción en el contenido de humedad óptimo y un ligero incremento del peso volumétrico seco, además de un incremento en el índice de plasticidad y la contracción lineal. Para las muestras preparadas con nanoaluminio y nanocobre se observó un efecto positivo en el



índice de plasticidad, siendo mayor en las muestras con nanocobre. También se observó cambio en la deformación total dada por la expansión y contracción de las muestras.

La nanoarcilla solo se usó en S1 y los resultados indican que se obtuvo una reducción en el contenido de humedad óptimo y un ligero incremento del peso volumétrico seco, además de que el aumento en nanoarcilla provoca un aumento en el índice de plasticidad y contracción lineal. Cuando el contenido de nanopartículas de arcilla aumenta, la tensión expansiva y de contracción aumenta. Para las muestras preparadas con nanoaluminio y nanocobre se observó un efecto positivo en el índice de plasticidad, la adición de nanoalúmina causa una pequeña disminución en el índice de plasticidad, pero esta disminución es mayor en las muestras con nanocobre. También se observó cambio en la deformación total dada por la expansión y contracción de las muestras, dando mejores resultados la nanomodificación del suelo con nanocobre, que con la modificación de la nanoalúmina (Taha & Taha, 2012).

- Mohammadi y Niazián realizaron pruebas experimentales en un suelo arcilloso, al cual nanomodificaron con nanoarcilla (Montmorillonita Na^+). Se estudiaron los efectos del nanomaterial en el suelo en diferentes propiedades. Para obtener la influencia en los límites de Atterberg se utilizó 0 %, 1 % y 2 % de nanoarcilla del peso seco del suelo. Para la prueba de presión no confinada, de cizallamiento directo y la prueba de CBR se utilizaron cuatro diferentes porcentajes de Nanoarcilla (0, 0.5, 1, 1.5, 2 %). Los resultados en la adición de nanoarcilla tuvo un efecto en el aumento del límite líquido, así como un aumento en el límite plástico, por consiguiente, el índice de plasticidad disminuye. Además de tener un incremento de la resistencia al corte directo, resistencia a la compresión no confinada y el índice CBR. Es necesario mencionar que en la adición de 1.5 % de nanoarcilla, el suelo alcanza el máximo en las pruebas. Y si la nanoarcilla aumenta al 2 % se observa un decremento, Figura 5.4.

Al nanomodificar un suelo con nanoarcilla además de mejorar las características del suelo, se radica un gran reto en la contaminación ambiental, ya que el origen de este nanomaterial es natural (suelo natural) (Mohammadi & Niazián, 2013).

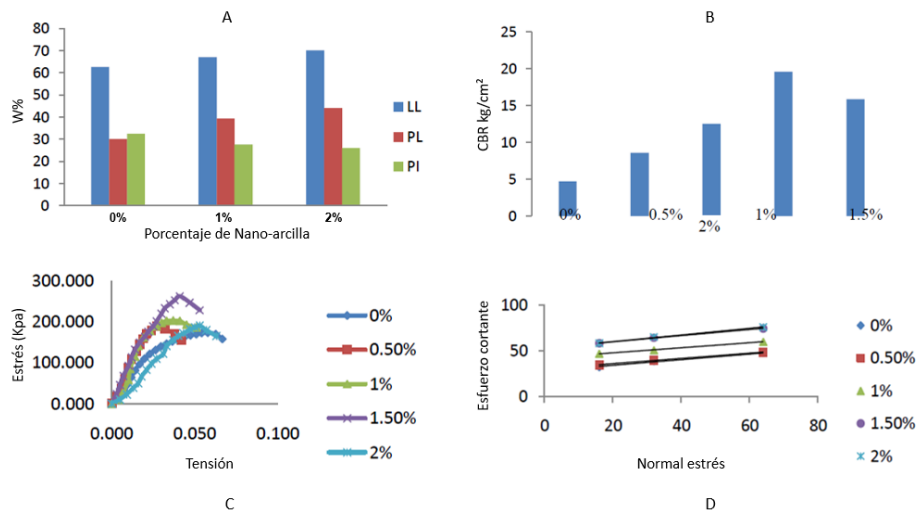


Figura 5.4 Comportamiento del suelo en la adición de nanoarcilla. A) Efecto en los límites de Atterberg. B) Prueba CBR para muestras que contienen nanoarcilla. C) Prueba de compresión no confinada para muestras con nanoarcilla. D) El proceso de resistencia al corte en prueba de corte directo. (Tomada de Mohammadi & Niazian, 2013).

- Niroumand et al, realizaron una investigación acerca de ladrillos de tierra con la adición de nanoarcilla (nanocaolín) en la resistencia a la compresión. Actualmente los ladrillos de tierra convencionales no presentan una buena resistencia a la compresión y se ha demostrado que los ladrillos con nanoarcilla son 4.8 veces más resistentes a los ladrillos normales. Para este estudio se realizaron ladrillos de caolín con dimensiones de 10 cm × 10 cm × 10 cm y con 5 % de nanoarcilla, y ladrillos de caolín con las mismas dimensiones, pero sin nanoarcilla. La resistencia a la compresión se registró a los 3, 7, 14 y 21 días de prueba.

Las condiciones climáticas afectaron la resistencia a la compresión de los ladrillos después de los 14 días, por lo que la resistencia disminuyó, como se muestra en la Tabla 5.1 (Niroumand et al., 2013).

Tabla 5.1 Resistencia a la compresión de ladrillos con nanoarcilla y ladrillos normales. (Tomada de Niroumand et al., 2013).

Tipo de ladrillo	Resistencia a la compresión (N/mm ²)			
	3 días	7 días	14 días	21 días
De tierra normal	1.9	2.94	2.52	1.49
De tierra con nanoarcilla	8.14	11.17	12.07	6.97

- García et al, estudiaron la estabilización de arcillas lacustres del ex Lago de Texcoco utilizando nanoSiO₂, una de las principales características que presentan las arcillas es que tienen una alta plasticidad. En esta investigación se analiza la resistencia a la compresión no confinada (UCS), en tres suelos con propiedades índice diferentes. El suelo uno es un MH (limo de alta plasticidad) con un LL de 232 %, LP de 86 %, w 185 %; el suelo dos es un CH (arcilla de alta plasticidad), con un LL de 205 y un LP de 68 %, w de 90 %; el suelo tres se clasifica como CH con un LL de 207, LP de 70 % y un w de 245 %. A cada suelo se le agrega un porcentaje de nanosustancia de 0.5, 0.7, 1 y 3 del peso del suelo seco, Figura 5.5. Como resultado se obtuvo que a la adición de nanoSiO₂, la UCS de las muestras aumenta con el aumento de los contenidos de la nanosustancia. Con un 3 % de nanoSiO₂, se observa un aumento del 100 % de la resistencia para las mezclas con un mayor contenido de agua (w ~ 200 %) (García et al., 2017).

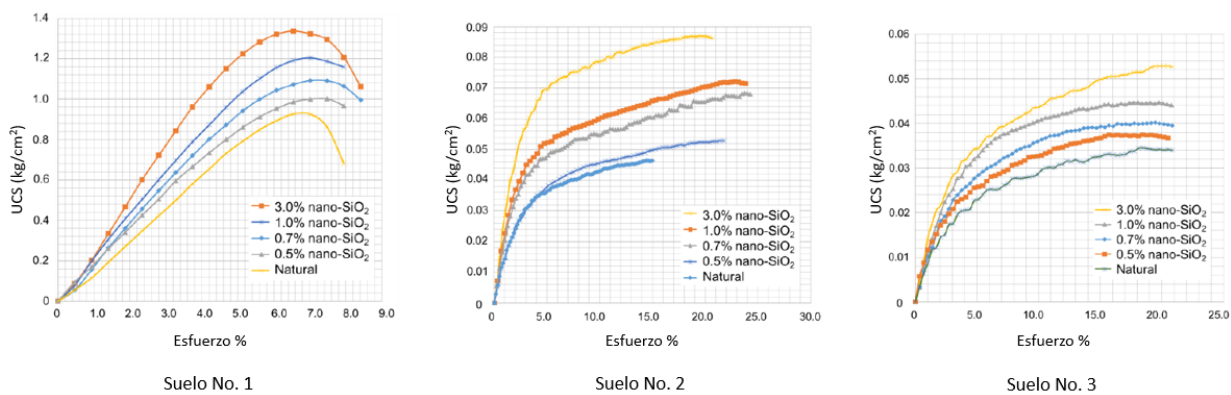


Figura 5.5 Comportamiento de un suelo lacustre, blando y de alta plasticidad a la adición de nanoSiO₂. (Tomado de García et al., 2017).

- Huan-Lin et al, utilizaron nanoalúmina para tratar una mezcla de suelo arcilloso estabilizado con cemento y ceniza de lodo residual, a una proporción 3:1. Lo que se propuso fue que un 15 % de la cantidad total de la arcilla fuera reemplazada con la mezcla ceniza/cemento, y además se le agregue diferentes porcentajes de nanoAl₂O₃ (0, 1, 2, 3 %).

De los resultados obtenidos, se concluyó que la adición de la nanoalúmina al suelo tratado con ceniza/cemento, disminuye el LL conforme aumenta el tiempo de curado, incluso sin nanoAl₂O₃, por lo que el índice de plasticidad del suelo disminuye conforme aumenta el contenido de nanosustancia y curado, Figura 5.6.b. El contenido de humedad óptimo incrementa conforme aumenta el contenido de nanoalúmina. La resistencia a la compresión y el CBR fueron mejorados por la adición de nanosustancia, debido a que el nanoAl₂O₃ sirve

para acelerar la reacción de hidratación y actúa como relleno de los poros en el suelo tratado, pero esto solo puede ser posible a un cierto nivel, por lo que se sugiere que la cantidad óptima del nanomaterial es del 1 %, como se observa en la Figura 5.6.a. No se observó mejora en la permeabilidad (Huan-Lin et al., 2012).

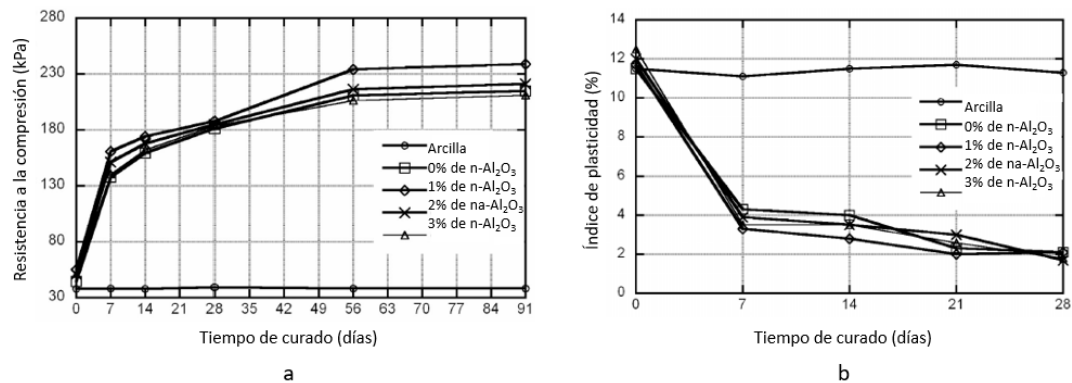


Figura 5.6 Comportamiento en la adición de nanoalúmina al suelo estabilizado con cemento/cenizas. a. En la resistencia a la compresión. b. Resultados en el índice de plasticidad. (Tomada de Huan-Lin et al., 2012).

- Pham y Nguyen, estudiaron la habilidad de nanopartículas de sílice recubiertas con polietileno glycol (PEG) de 5 nm para inhibir la expansión de montmorilonita en soluciones acuosas con presencia de NaCl y KCl, los resultados fueron cuantificados en términos del índice de expansión. Las soluciones que contenían KCl resultaron ser más efectivas para reducir la expansión de montmorilonita que aquellas que contenían NaCl, esto puede ser posible gracias a la capacidad del KCl para comprimir la doble capa eléctrica y disminuir la repulsión electrostática entre las partículas de arcilla, sin embargo en ambos casos se lograba reducir el índice de expansión del suelo, Figura 5.7. Se observó que las muestras que solo tenían concentraciones de electrolitos presentan menor reducción en el hinchamiento del suelo en comparación con la adición de nanopartículas, dando como resultado una mayor reducción en el índice de hinchamiento, por lo que disminuye a medida que aumentaba la concentración de electrolitos y de nanopartículas (Pham & Nguyen, 2014).

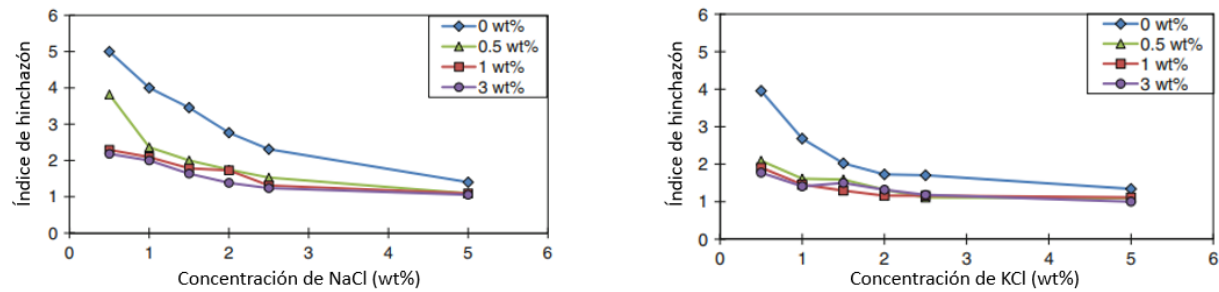


Figura 5.7 Índice de hinchazón de montmorillonita con concentraciones variables de nanopartículas en función de la concentración de NaCl y KCl. (Tomada de Pham & Nguyen, 2014).

- Gallagher et al., investigaron el efecto del tratamiento con sílice coloidal sobre arenas sueltas con la finalidad de mejorar la resistencia a la deformación ante movimientos sísmicos. La investigación se desarrolló mediante un modelo de centrifugado, el cual sirvió para ver las propiedades de licuefacción y deformación de las arenas sueltas al ser tratada con una lechada de sílice coloidal al 6 % en peso, sometida a movimientos parecidos a un sismo. Por lo que se sometió a dos movimientos de sacudimiento. Los resultados fueron favorables, ya que el suelo tratado experimento 30 mm de sedimentación (0.3 % de deformación) en el primer evento con una aceleración máxima uniforme de 0.2 g y en el segundo evento con una aceleración máxima uniforme de 0.25 g presento una deformación de 0.1 % (menos de 10 mm). Por lo que la capa de arena tratada no se licúa durante ninguno de los dos eventos de movimiento. La forma en la que actúa la sílice coloidal en los suelos licuables es mediante la cementación de los granos individuales, y también reduce la conductividad hidráulica del suelo.

Además en esta investigación se desarrolló un modelo de caja, el cual fue útil para investigar la capacidad de administración de la lechada de sílice coloidal al suelo licuable bajo un gradiente pequeño, mediante pozos de inyección y extracción. Al terminar de suministrar la nanosustancia se realizaron 21 pruebas de compresión no confinada del suelo con 5 % en peso de sílice coloidal, y los resultados demostraron una resistencia promedio de 32 kPa, concluyendo que la distribución de la lechada fue uniforme con estabilizadores de bajo gradiente. Con el material modificado se obtuvieron asentamientos menores a los obtenidos en arenas sin tratamiento, durante y después de sujetarlo a vibración. Se hizo evidente que el tratamiento redujo el potencial de licuefacción (Gallagher et al., 2007).

6 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Las arcillas plásticas del Valle de México, con compresibilidad de alta a muy alta, de muy baja permeabilidad y con capacidades de carga y de resistencia al esfuerzo cortante mínimas (comparadas con arcillas lacustres de otros sitios en el mundo), son materiales susceptibles a toda clase de mejoras que intentan modificar estas propiedades o por lo menos confinarlas entre límites manejables de acuerdo con cada obra civil.

A continuación se presenta cómo se mejora una masa de suelo arcilloso con nanoSiO₂. Con la determinación de los límites de Atterberg se indaga sobre el efecto que la nanosustancia tiene en la proporción sólidos-agua que conduce a la arcilla del ex-Lago de Texcoco hacia estados líquidos y plásticos.

Hipótesis

- En la nanoescala, la transmutación de la estructura de los suelos arcillosos del ex-Lago de Texcoco impacta en la interacción agua-sólidos.
- Con la adición de nanoSiO₂ los Límites de Atterberg de las arcillas del ex-Lago de Texcoco son afectados.
- Si la perturbación de los Límites de Atterberg de las arcillas del ex-Lago de Texcoco con nanoSiO₂ es sustancial, entonces sus valores de resistencia y compresibilidad cambian.

6.1 Descripción del sujeto de estudio

Los suelos que se utilizaron en esta investigación se obtuvieron del ex-Lago de Texcoco. Este ex-Lago pertenece al Estado de México y se ubica en la porción centro-oriental de la FVTM (Ferrari et al., 2012). La zona de la que se extrajeron las muestras está limitada por el Lago Nabor Carrillo y por el depósito de evaporación solar “El caracol de Texcoco”. Las arcillas de esta zona son sedimentos de origen volcánico depositados en el valle durante el final del Pleistoceno (Terzagui et al., 1996 3ª ed.), esto sumado al alto contenido de sílice, de diatomeas, de valvas de ostrácodos y de sales, las califican como un material extraordinario (Figura 6.1).

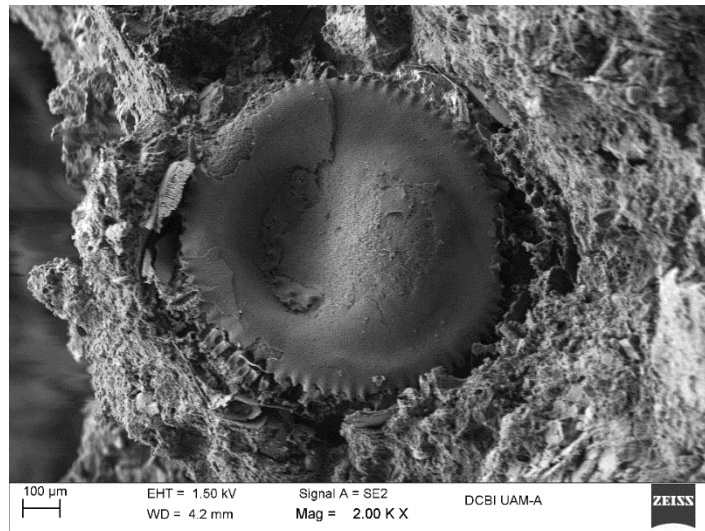


Figura 6.1 Fotografía SEM a 100 micrómetros, se observa una diatomea céntrica características de los sedimentos del ex-Lago de Texcoco.

En la campaña de exploración geotécnica de la que se extrajeron las muestras para esta investigación se realizaron una gran cantidad de pruebas por lo que se pudo seleccionar material específico para ratificar o descartar las hipótesis expuestas. De acuerdo con la disposición de materiales se decidió separar las muestras en dos partes. Con la primera de ellas (Muestras A) se calibran los procesos de mezclado y curado mientras que con la segunda (Muestras B) se ejecutan el mayor número de ensayos de límites de Atterberg.

6.1.1 Conjunto de Muestras A

El material de este conjunto (sondeo con identificador SS-01-M3) se tomó a una profundidad de 10.40 m. El cilindro de arcilla (de 60 cm de largo) se fraccionó en seis porciones, cada una con un promedio de 10 a 15 cm. Para cada tramo se determinó su contenido de humedad natural, Límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico, índice plástico) y densidad de sólidos. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) estas muestras corresponden a suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) (Figura 6.2) con contenidos de humedad como se indica en la Tabla 6.1.

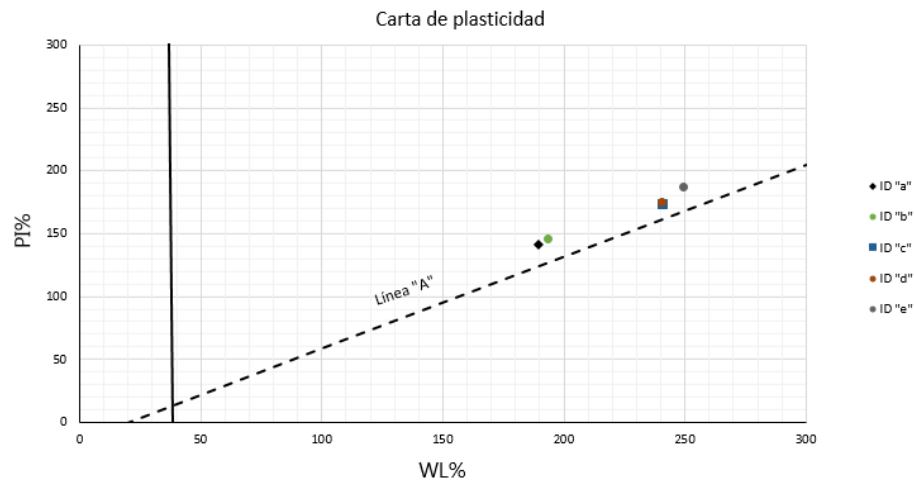


Figura 6.2 Ubicación en la carta de plasticidad de las Muestras A.

Importante es señalar que el material, de color pardo-rojizo, presentó algunas vetas jabonosas grises verdosas (Figura 6.3).



Figura 6.3 Muestra A, suelo de 0 a 20 cm de TOP a BOTTOM de tubo.

En la parte media del cilindro de arcilla se reconocieron granos de arena (Figura 6.4) pero al someter estas muestras a clasificación SUCS el porcentaje fue tan bajo que no alteró la clasificación de arcilla de alta plasticidad (CH) (Figura 6.2).



Figura 6.4 Muestra A, suelo a la mitad de tubo.

La porción más baja (entre los 36.5 y 60 cm del cilindro, hacia los 11 m de profundidad) se caracterizó como suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) (Figura 6.2) con contenidos de humedad notablemente más altos que los del resto del cilindro (Figura 6.5, Tabla 6.1).



Figura 6.5 Muestra A, suelo de 37 a 60 cm de TOP a BOTTOM de tubo.

En la Tabla 6.1 se observa un resumen de las características geotécnicas del cilindro de las Muestras A.

Tabla 6.1 Características de las Muestras A.

Prueba	ID	Porción de tubo (cm)	W%	G_s	γ_d (g/cm ³)	γ_m (g/cm ³)
SS-01-M3	ID "a"	0-10.5	191%	3.07	0.45	1.3
SS-01-M3	ID "b"	10.5-21	191%	3.07	0.45	1.3
SS-01-M3	ID "c"	21.5-29.5	225%	3.07	0.39	1.26
SS-01-M3	ID "d"	29.5-36.5	250%	3.07	0.35	1.23
SS-01-M3	ID "e"	36.5-47.5	300%	3.07	0.3	1.2
SS-01-M3	ID "f"	47.5-60	233%	3.07	0.38	1.25

El ID "a" y "b" corresponden a la porción inicial del cilindro, "c" y "d" pertenece a la porción media del cilindro y por consiguiente "e" y "f" pertenecen a la porción final.

6.1.2 Conjunto de Muestras B

Lo que a partir de este momento será llamado "Conjunto de Muestras B" se conformó con suelos de tres sondeos (Tabla 6.2) suficientemente cercanos y a profundidades de interés para cierta obra civil (superficial \approx 3 m, media \approx 8 m y profunda \approx 16 m). El primer subconjunto se extrajo a 3.50 m (sondeo SM-23) y se clasificó como un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) (Figura 6.9). El color del suelo, en general, gris con tonalidades marrón, como se observa en la Figura 6.6.

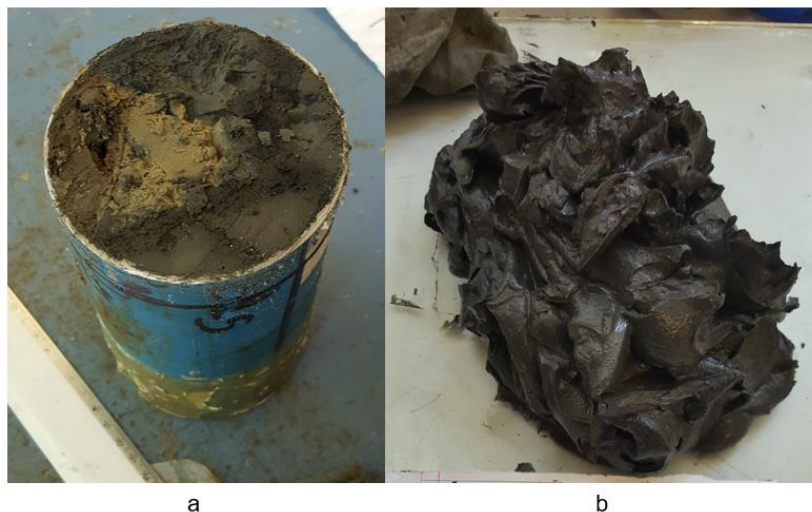


Figura 6.6 Primer subconjunto de las Muestras B. a) Shelby. b) suelo remoldeado.

El segundo subconjunto se recuperó a una profundidad de 16.40 m y de acuerdo con el SUCS se trata de un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) con un contenido de agua muy cercano al de la muestra superficial. Su peso específico fue de $\gamma_m = 1.31$ g/cm³, color marrón oscuro, sin vetas, como se puede apreciar en la Figura 6.7.



Figura 6.7 Segundo subconjunto. a) Muestra extraída. b) suelo remoldeado.

La tercera muestra de suelo fue tomada una profundidad de 8.30 m. Se caracteriza por un alto contenido de humedad (> a 300 %, muy por encima de lo establecido para las muestras superficiales y profundas). Es una arcilla de alta plasticidad (CH) (Figura 6.9), color marrón oscuro (Figura 6.8) y un peso específico de (γ_m) 1.2 g/cm³.



Figura 6.8 Tercer subconjunto. a) Muestra extraída. b) suelo remoldeado.

En la Tabla 6.2 se presenta un resumen las características generales de las Muestras B.



Tabla 6.2 Características de las Muestras B.

Subconjunto de Muestras B	Primero	Segundo	Tercero	
Procedencia	ExLago de Texcoco	ExLago de Texcoco	ExLago de Texcoco	
Sondeo	SM-23	SS-02	TBH-217	
Muestra	M1-Bis	M-4	16 UNAM	
Profundidad	3.50 - 3.65	16.40 - 16.55	8.30 - 8.45	m
γ_m	1.281	1.31	1.2	g/cm^3
γ_d	0.436	0.447	0.29	g/cm^3
w	194	193	314	%
Gs	2.82	3.26	3.25	
LL	202	249	348	%
LP	50	48	69	%
IP	152	201	279	%
SUCS	CH	CH	CH	

En la Figura 6.9 se observa el comportamiento de las Muestras B en la carta de plasticidad.

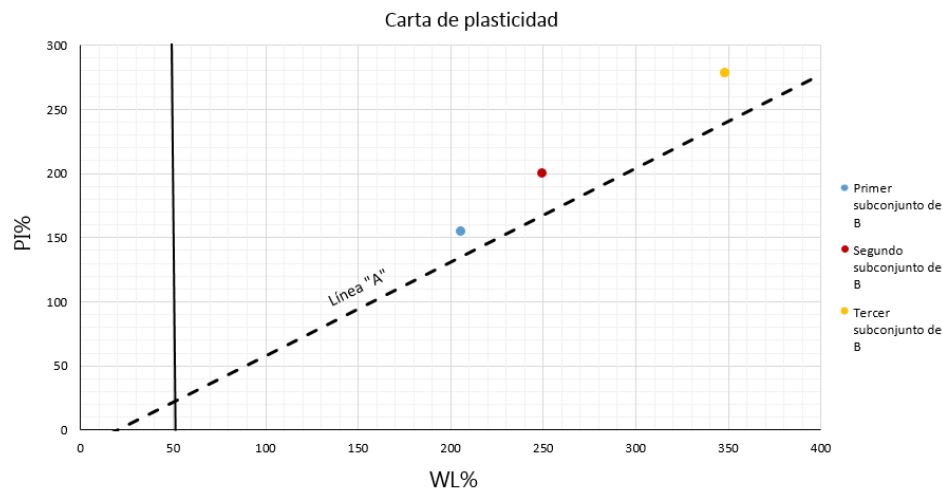


Figura 6.9 Ubicación en la carta de plasticidad de Casagrande de las Muestras B.

6.2 Desarrollo de las pruebas de laboratorio

Para corroborar o descartar las hipótesis de esta investigación es necesario asegurar la consistencia de los ensayos. Así, se desarrolló una secuencia estricta de trabajo (Figura 6.10) con la que se intenta minimizar: i) las variaciones de resultados por remoldeo-mezclado-curado, ii) la subjetividad en la determinación de los límites y iii) cualquier componente de error humano que se adhiere a actividades no controladas – batido, aireado, etc.

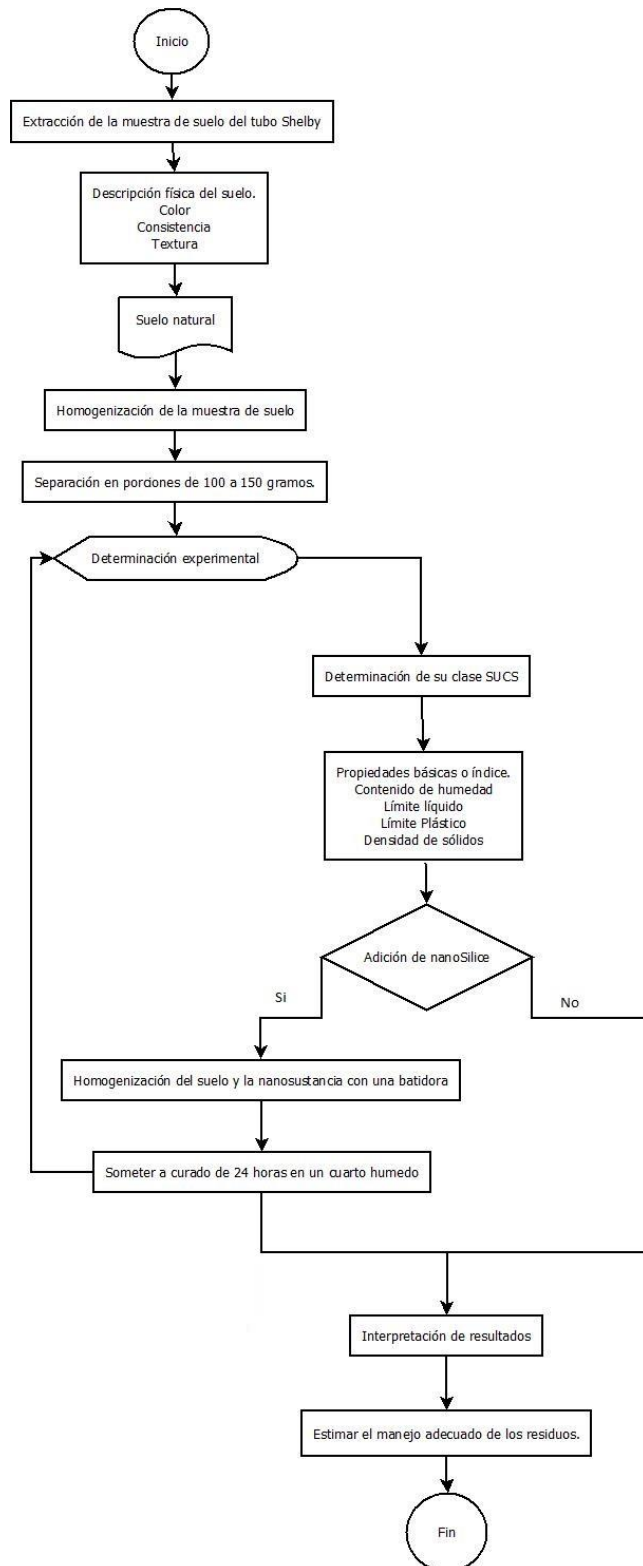


Figura 6.10 Secuencia de actividades.

6.2.1 Contenido de Agua W%

- La primera actividad que necesariamente debe realizarse bajo método es la extracción de las muestras. Usando el mismo equipo de laboratorio se extrajeron las muestras de suelo, se protegieron, seccionaron y organizaron en recipientes.
- Cada muestra se homogeniza con una espátula metálica (Figura 6.11) y de la masa homogenizada se obtiene el contenido de humedad de cuatro porciones para asegurar que los resultados sean consistentes y el valor obtenido pueda ser calificado como “correcto”. Si las diferencias son importantes entre estos 4 resultados, se repite la homogenización de toda la muestra y se vuelve a determinar los contenidos de humedad.



Figura 6.11 Momento de extracción de las muestras para los fines especificados en este trabajo.

En la Figura 6.12 se observa la variación en el contenido de agua natural para cada muestra.

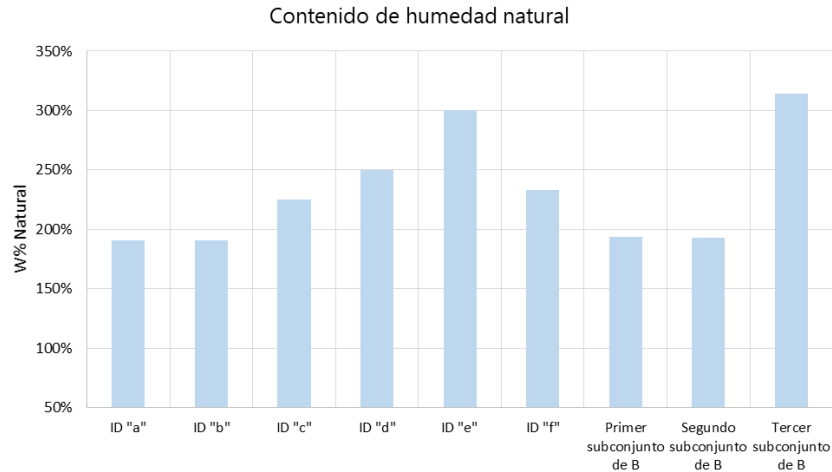


Figura 6.12 Variación en el contenido de agua natural para las Muestras A y B.

6.2.2 Densidad de sólidos

Como se explicó en el capítulo 3, los suelos presentan variación en su composición dependiendo de la roca parental y de las condiciones en la que se formó el suelo, por lo que la densidad entre suelos de una misma región puede ser sustancialmente distinta. El peso específico relativo de los sólidos o la densidad de sólidos es una propiedad índice que se define como la relación entre el peso de los sólidos del suelo y el peso del volumen de agua que desalojan.

Los valores típicos de la densidad de sólidos para un suelo arcilloso varía de 2.72 a 2.80, para limos de 2.67 a 2.70, una arcilla limosa puede tener valores de 2.75, mientras que una arcilla arenosa puede alcanzar 2.7 (Domínguez et al., 2001). Se han registrado algunas excepciones donde se han reportan valores de 1.5 (o menos) en turbas donde existe un alto contenido de materia orgánica y mayores a 3 en materiales con alto contenido de minerales de hierro (Domínguez et al., 2001). De acuerdo con las investigaciones que realizaron Marsal & Mazari (1959) las arcillas del centro de la Ciudad de México, en promedio, presentan un peso específico relativo de los sólidos de 2.00 y 2.70 con variación dependiente, principalmente, de la composición mineralógica del suelo.

Para obtener las densidades de los materiales de esta investigación se siguió lo establecido en la norma ASTM D 854 – 02 (para suelos que pasen la malla No.4), Figura 6.15.b:

- En un matraz Erlenmeyer calentar aproximadamente 1.5 litros de agua destilada en la estufa de gas, cuidando que el agua no hierva, este procedimiento es para sacar el aire que presenta el agua.
- Cuando el agua ya este caliente, se conectará a una bomba de vacío para terminar de sacar completamente el aire del agua.
- Es indispensable purgar la bomba antes de utilizarla y de cuidar que todas las válvulas estén cerradas antes de prenderla.



- Tomar una porción de la muestra del suelo y homogenizar agregando agua destilada, posteriormente terminar el proceso en una batidora para esquimos por un período de 2 o 3 minutos.
- Vaciar el suelo en dos matraces aforados distintos, previamente calibrados, este procedimiento se realiza con la ayuda de un embudo, cuidando que el suelo no se quede pegado en el cuello del matraz.
- Es necesario limpiar todos los utensilios con agua destilada para evitar perder suelo en la medida menos posible.
- En un recipiente de metal calentar agua corriente con una parrilla eléctrica, el nivel del agua en el recipiente tiene que ser el necesario para tapar el suelo que está en los dos matraces aforados (Figura 6.13).
- Al momento de contar con los dos matraces, conectar ambos a la bomba de vacío para desairar.
- Una vez desairado el suelo, el matraz se llenará con el agua destilada previamente desairada.
- Después de un período de 12 horas como mínimo, los matraces se aforarán (sacar el agua hasta la marca de aforo del matraz) con ayuda de una pipeta, y con papel absorbente se limpiará y secará el cuello del matraz, cuidando que el menisco del agua quede sobre la línea de aforo.
- A continuación, se pesará el matraz + agua + suelo.
- Posteriormente se tomarán tres medidas de temperatura de cada matraz, una en el cuello; la segunda, aproximadamente a la mitad del matraz y por último en el fondo del matraz, pero sin tocarlo.
- Con el promedio de las temperaturas se busca en la curva de calibración del matraz, el peso del matraz + agua hasta la marca de aforo.
- Ya tomadas las temperaturas, se vaciará en una charola previamente pesada y se meterá al horno por un período de 12 horas como mínimo.
- Al día siguiente se harán los cálculos necesarios para la determinación de la gravedad específica de los sólidos del suelo de acuerdo a la ecuación 15, donde el V_s se obtiene de la expresión:

$$V_s = W_s + W_{mw} - W_{mws} \quad (26)$$

Donde

W_{mw} = Peso del matraz + agua hasta la marca de aforo.

W_{mws} = Peso del matraz + agua + suelo.

W_s = Peso de los sólidos.



Figura 6.13 Desarrollo de la prueba de densidad de sólidos.

Para cada muestra se determinó la gravedad específica de los sólidos del suelo (Figura 6.14). En la Tabla 6.1 y 6.2 se observa los resultados para cada muestra.

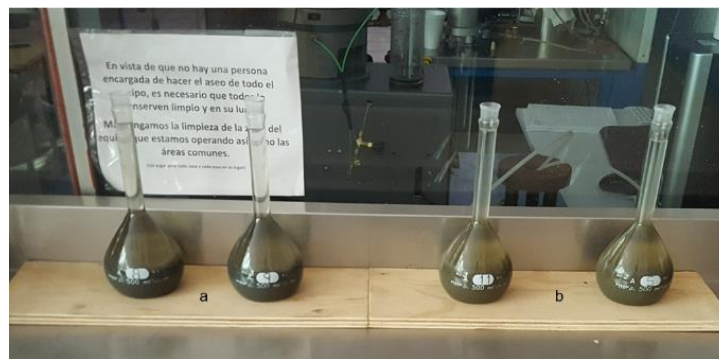


Figura 6.14 Densidad de sólidos de la Muestra B. a) Primer subconjunto. b) Segundo subconjunto.

6.2.3 Granulometría

Es conveniente mencionar que este procedimiento se realizó por el método de tamizado en húmedo, ya que en ocasiones las partículas más finas se quedan unidas a las partículas de mayor tamaño, por ello, es práctico la utilización de un cepillo de cerdas delgadas para evitar grumos, aplicando una pequeña presión con el cepillo al suelo en la malla No. 200 (Figura 6.15.a). Sin embargo, no hay que ejercer mucha fuerza ya que en ocasiones se puede obligar a pasar a las partículas más gruesas por la malla. En nuestro caso se dejó remojando el suelo por un período de 24 horas, al momento de realizar la prueba se usó gran cantidad de agua y el procedimiento requirió mayor tiempo de lo contemplado inicialmente.

Para el conjunto de Muestras A se realizó análisis granulométrico para todo el tubo Shelby, mientras que, para las Muestras B, sólo la porción en la que claramente se detectaron (tacto y visual) presencia de no-finos.



Figura 6.15 Desarrollo de la prueba de granulometría para el primer subconjunto de B. a) Lavado de la muestra. b) Suelo que pasó la malla No. 200 y suelo que no pasó la malla No.200.

En la Tabla 6.3 se observan los resultados del proceso.

Tabla 6.3 Resultados de la prueba de granulometría.

		Charola	W tara	Ws + tara	Ws	Total	
			g	g	g	g	%
Muestras A	Retenido en la malla No. 200	No. 200	116.5	124.2	7.7	7.7	8.17
	Pasa la malla 200	GRAN 200	190.3	276.9	86.6	86.6	91.83
	Total					94.3	100
Primer subconjunto de la Muestra B.	Pasa la malla No. 200	MS-15	162.2	177.3	15.1	54.2	84.2
		MS-10	162.5	173.8	11.3		
		GRAN 200	190.3	218.1	27.8		
	Retenido en la malla 200	GRAN 100	183.3	193.5	10.2	10.2	15.8
	Total					64.4	100

De acuerdo con la norma ASTM D 2488-00, para el primer subconjunto de las Muestras B con un 84.2 % del suelo que pasa la malla No. 200, y con poco contenido de no finos, se trata de una arcilla de alta plasticidad, con arena. Las Muestras A resultaron simplemente arcilla de alta plasticidad.

6.2.4 Incorporación de nanosustancia a la masa arcillosa

Para la transmutación de las arcillas fue necesario determinar primero los valores de W%, LL, LP e IP de cada muestra de suelo natural. Cada muestra (aquella porción de tubo que se considera un ejemplo) se dividió en 4 porciones de igual peso que se almacenaron en recipientes herméticos y se protegieron con papel plástico para evitar pérdida de humedad. De acuerdo con el método a cada recipiente se le añadió un 5 %, 9 % y 11 %, del peso seco del suelo muestreado, de nanosustancia - nanoSiO₂ (Figura 6.16).



Figura 6.16 Segundo subconjunto de B. a) Suelo en estado natural. b) Muestra con 5% de nanoSiO₂. c) Muestra con 9 % de nanoSiO₂. d) Muestra con 11 % de nanoSiO₂.

Para incorporar la nanosustancia al suelo es indispensable homogenizar el suelo y cuando se considera que se ha obtenido el grado suficiente se somete a la muestra a mezclado (con una batidora mecánica durante 300 segundos a la velocidad máxima del aparato eléctrico), Figura 6.17. La razón de integración entre el número de ciclos de batido y el tiempo, se consideró de acuerdo con las recomendaciones de la literatura para materiales compuestos relacionables (To et al., 2011). El suelo nanotransformado se conservó durante un período de 24 horas en curado en cuarto húmedo. Es fundamental tener en cuenta que una vez dispuesto el suelo con nanosustancia y transcurrido el tiempo de curado, inmediatamente después se ejecuta la prueba programada, sin distinto en ninguna muestra.

El tiempo de curado sigue las experiencias de García et al (2017), sin embargo, se reconoce que debe explorarse más profundamente el efecto que el curado tiene en las propiedades de estos materiales. Al establecer un mismo curado para todas las masas se plantea que se desprecia el efecto reconocido.

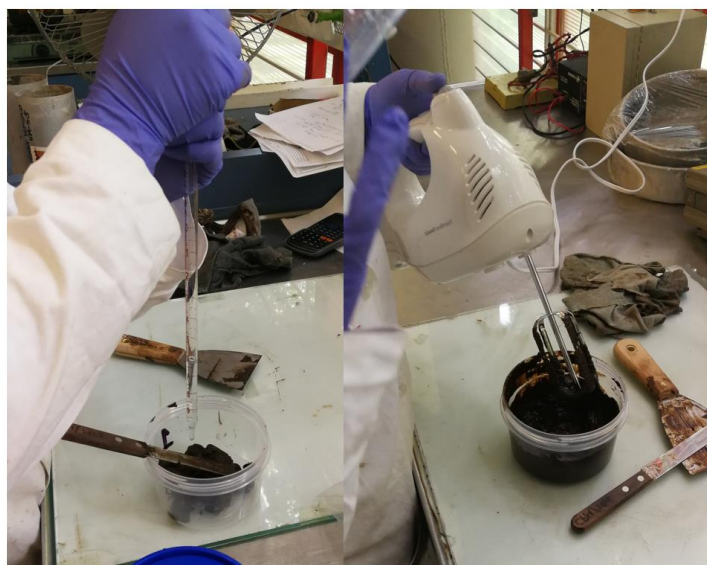


Figura 6.17 Preparación de las muestras nanomodificadas con nanoSiO₂: etapa de mezclado.

6.3 Resultados

Las pruebas para determinar los límites de Atterberg se basaron en la norma ASTM D 4318-00, detallada en la sección 4.2. Como ya se dijo, la primera etapa de todas las pruebas específicas requiere determinar W%, Límite Líquido, Límite Plástico y el correspondiente Índice de Plasticidad y después estos mismos parámetros se miden en muestras mezcladas con nanoSiO₂ (Figura 6.18).

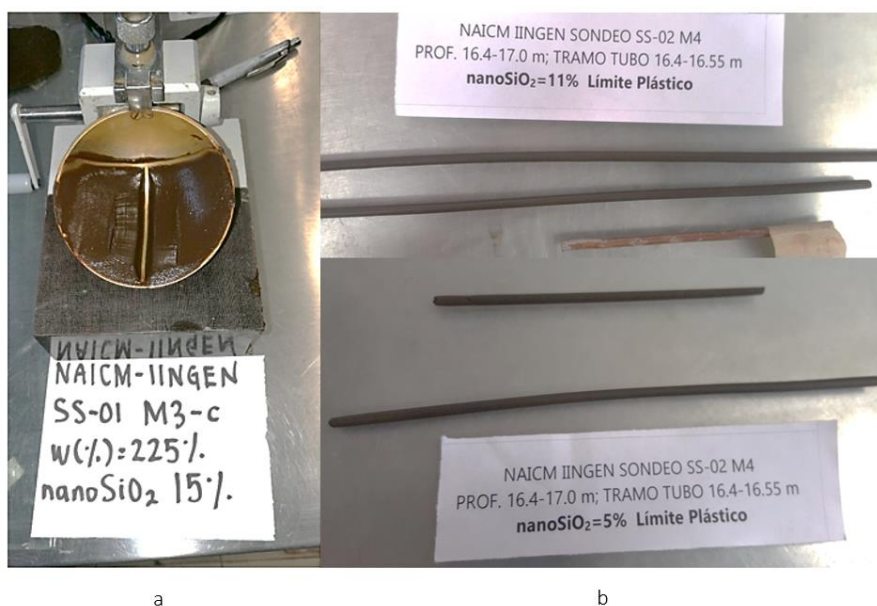


Figura 6.18 Desarrollo para determinar los límites de Atterberg.

6.3.1 Sobre el límite líquido

Conjunto de Muestras A

En la Figura 6.19 se aprecia que efectivamente la nanoSiO₂ tiene efecto importante sobre el límite líquido para el conjunto Muestras A (profundidad de 10.40 a 11 m). Las modificaciones se pueden describir en dos sentidos: i) incremento del valor con el incremento de sustancia y ii) modificación del índice de flujo (siendo este índice el valor de la pendiente de la recta obtenida con la prueba de Casagrande).

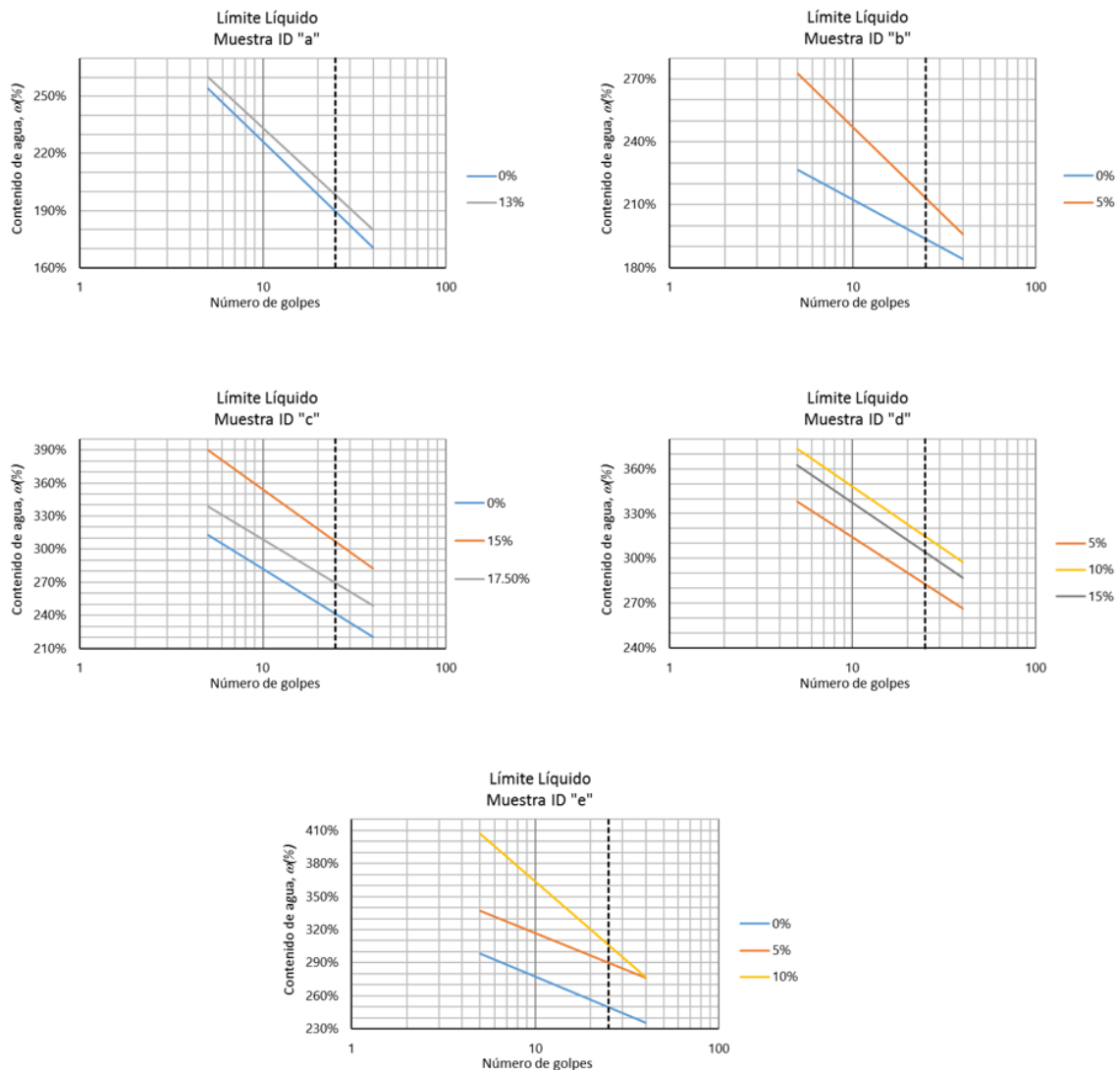


Figura 6.19 Comportamiento del límite líquido en las Muestras A. Muestra ID "a" (profundidad. 10.40-10.505 m), muestra ID "b" (profundidad 10.505-10.61 m), muestra ID "c", muestra ID "d" (profundidad 10.61-10.76 m), muestra ID "e" (10.76-10.87 m).

Conjunto de Muestras B

En los resultados mostrados en la Figura 6.20, para el conjunto de Muestras B, el efecto de la adición de nanosustancia muestra una tendencia más clara. El límite líquido se ve afectado, al igual que para el conjunto Muestras A, en dos sentidos: i) incremento del valor con el incremento de sustancia y ii) modificación del índice de flujo. Sin embargo, a diferencia del anterior conjunto de pruebas, las Muestras B mantienen un crecimiento de índice y cambio de valor de LL que parece monotónico.

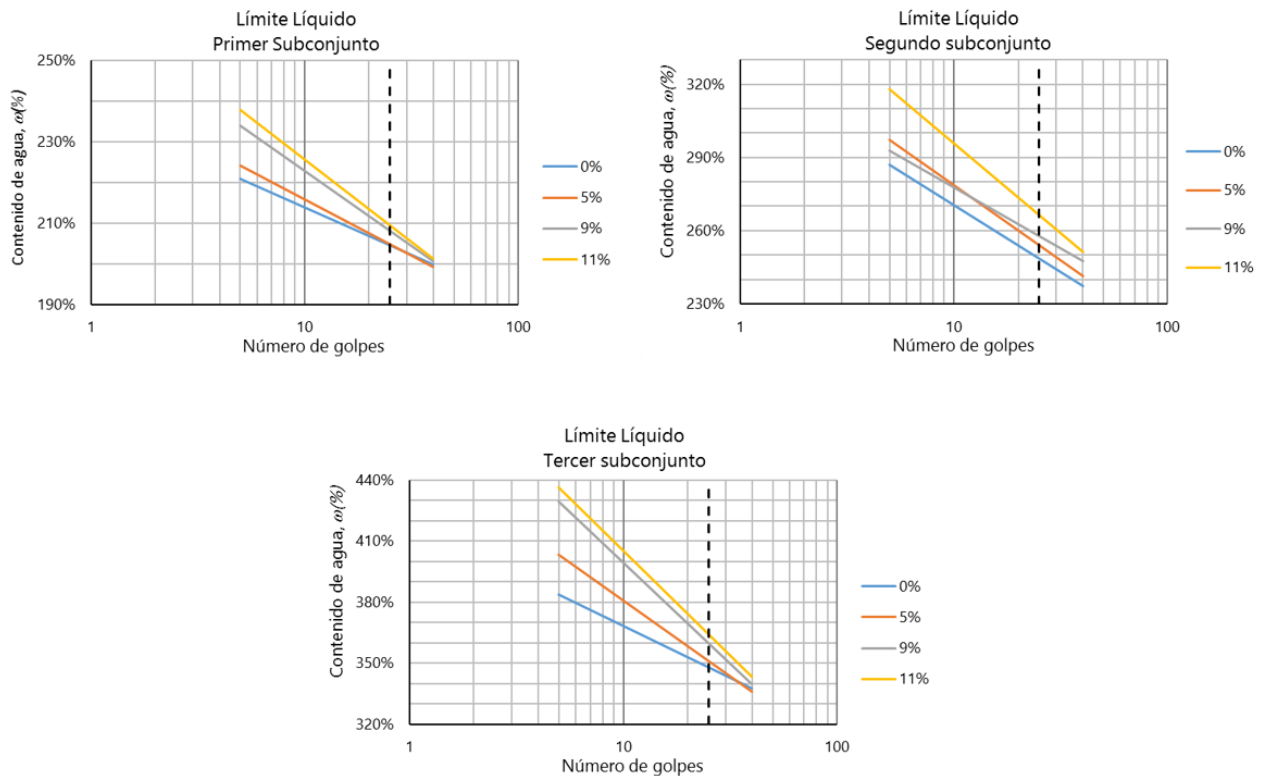


Figura 6.20 Comportamiento del límite líquido en el conjunto de Muestras B. Primer subconjunto (prof. 3.50-3.65 m). Segundo subconjunto (prof. 16.40-16.55 m). Tercer Subconjunto de B (prof. 8.30-8.45 m).

Las líneas rectas que se observan para cada Muestra A y B (Figura 6.19, 6.20), conocidas como curvas de flujo, muestran una medida de la rigidez del material: entre mayor sea el valor de la pendiente de la recta, el material es más resistente a la falla en la copa de Casagrande como se observa en la Figura 6.21 y 6.22. Es evidente que el aumento del porcentaje de nanoSiO₂ provoca rigidización de todas las muestras.

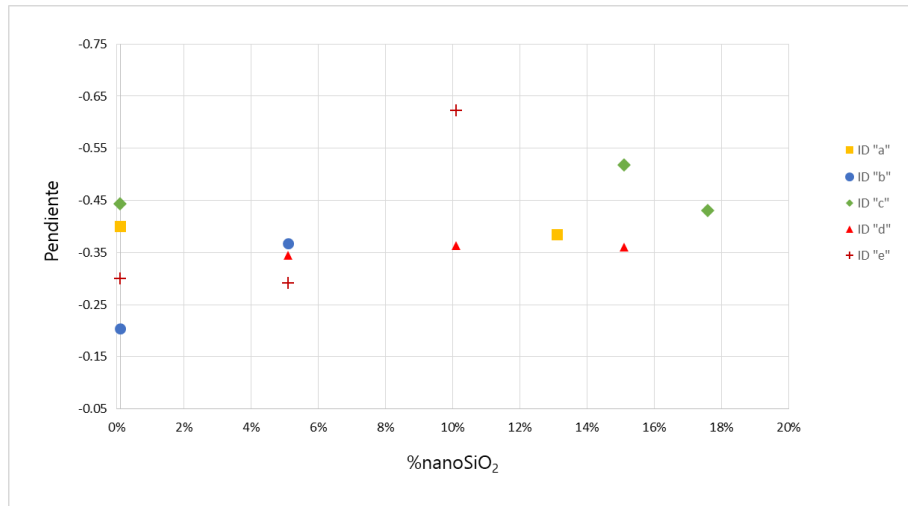


Figura 6.21 Comportamiento del índice de flujo para las Muestras A.

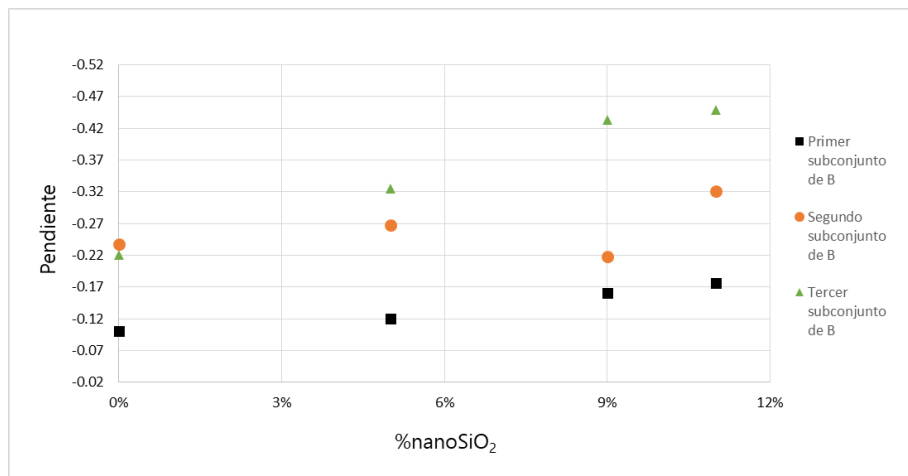


Figura 6.22 Comportamiento del índice de flujo para las Muestras B.

6.3.2 Resultados del límite plástico

Conjunto de Muestras A

En la Figura 6.23 se observa el comportamiento del límite plástico en el conjunto de Muestras A. En general para cada subconjunto se observa un pequeño incremento en el valor del LP del suelo (respecto a la muestra natural), sin embargo, para el rango de valores reportados en todo el conjunto, la modificación es mínima, incluso despreciable.

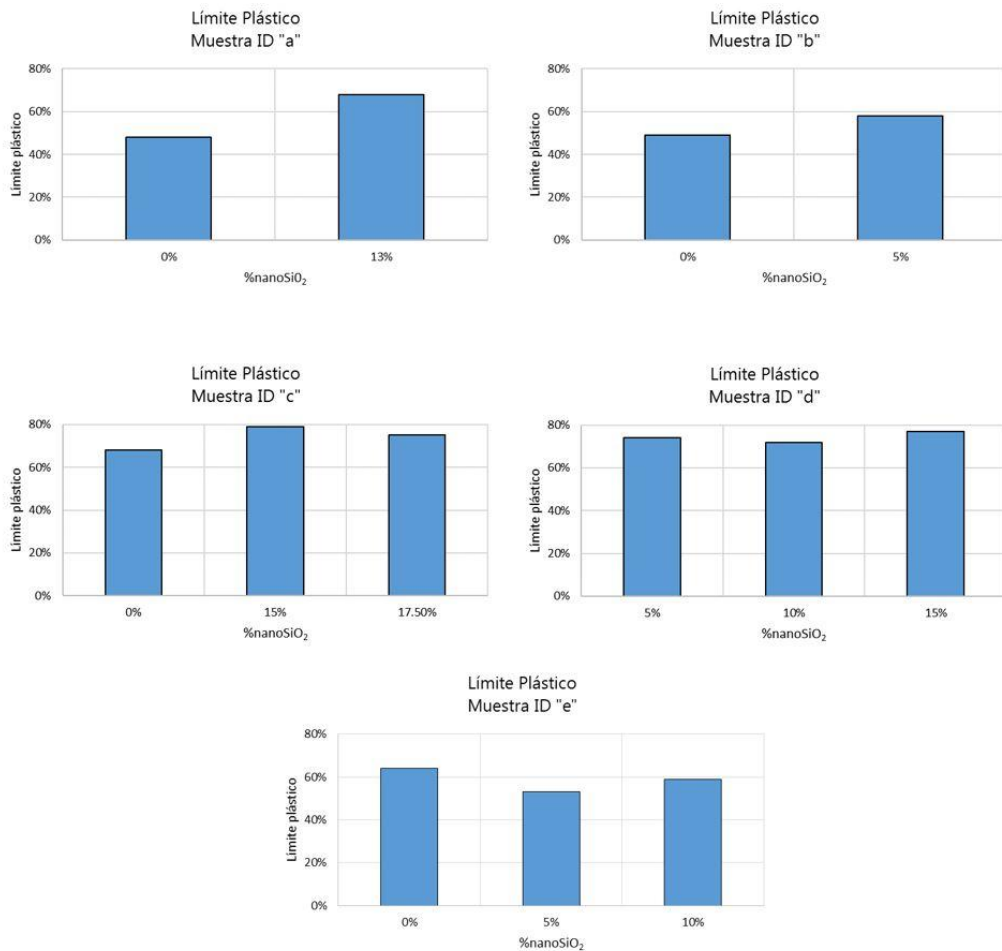


Figura 6.23 Comportamiento del límite plástico en las Muestras A.

Conjunto de la Muestra B

Al igual que para el anterior conjunto, el límite plástico en las masas con diferentes porcentajes de nanoSiO₂ para las Muestras B, no presenta cambios sustanciales entre muestras naturales y nanomodificadas, vea Figura 6.24.

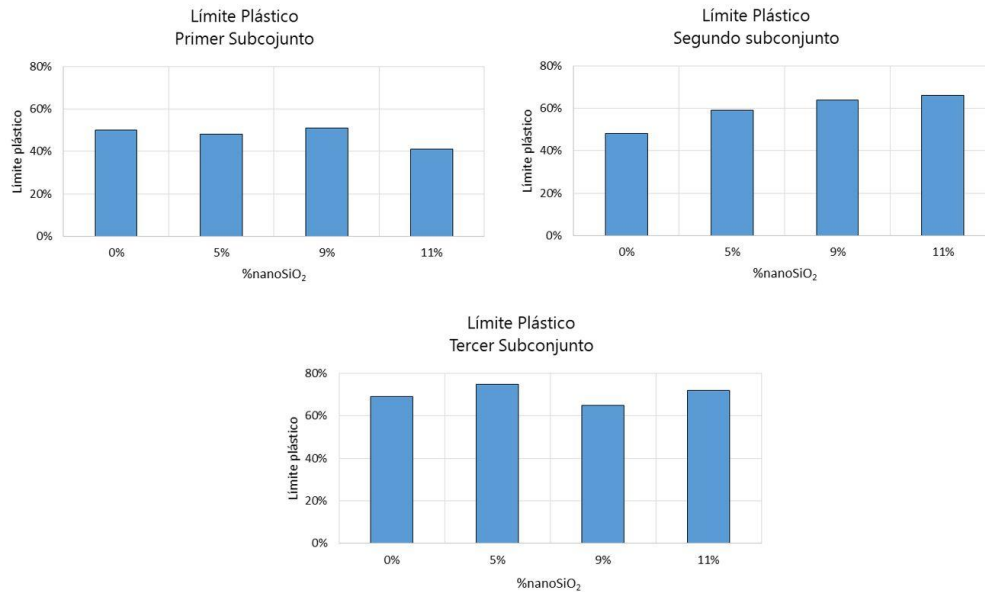


Figura 6.24 Comportamiento del límite plástico en las Muestras B.

Ante una situación del tipo que se muestra en las experimentaciones para el LP se tiene que evaluar dos posibles condiciones:

- a) que los experimentos estén mal realizados
- b) que la precisión alcanzada en los experimentos no sea la adecuada para el material.

Para responder a). En evaluaciones anteriores realizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el ex-Lago de Texcoco, cerca del área en estudio, se reportaron límites de plasticidad entre 60 y 70 %. Para las Muestras B, se obtuvieron LPs de 52.47 %, 50.11 % y 74.75 % para cada tramo analizado. Por otro lado, de acuerdo con Marzal & Mazari (1959) en suelos del valle superficiales (menos de 6 m de profundidad) el LP promedio es ligeramente mayor a 60 %, mientras que para suelos más profundos (por encima de los 16 m) se reportan LP menores de 60 %. Con base en estas comparaciones se deduce que, para las muestras naturales, los LP obtenidos en esta investigación, están en rango y se consideran correctos.

Para responder b). Si se ha seguido el método, las incertidumbres por errores humanos se han minimizado o por lo menos están afectando todas a las pruebas en la misma proporción, ¿es esta prueba de LP correcta para los materiales ensayados? Para medir la plasticidad de las arcillas el método más empleado en el mundo es el de los rollos (la humedad más baja con la que puede formarse con el suelo cilindros de 3 mm de diámetro hasta que éstos presenten grietas) recomendado indistintamente para cualquier material plástico, y es el seguido en esta investigación.



Es necesario recordar que la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente principalmente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente, este intervalo depende de factores ampliamente reconocidos como el origen mineralógico, la contaminación por sustancias orgánicas, por ejemplo.

Si se reconoce que el procedimiento mismo es uno de los más discutidos en la literatura por los errores y subjetividades a los que está expuesto (Haigh et al., 2013, Haigh et al., 2014 y Barnes, 2013) entonces tendrá que aceptarse que el valor, incluso de la muestra natural podría no representar correctamente la transición del suelo dúctil→frágil. Dentro de la experiencia de trabajo en laboratorio se puede acotar:

- que la obtención del límite plástico en suelos naturales requirió un tiempo aproximado desde el inicio del secado de la muestra hasta el momento que se consideró al suelo en el límite entre 3 a 4 horas aproximadamente
- que los suelos agrietados distan mucho de aquellos que se reportan en la literatura, definir la aparición de grietas resulta subjetivo en la mayoría de los casos
- el secado de los suelos, incluso los naturales, ya sea con abanico eléctrico o con la ayuda de la temperatura ambiental, era la etapa que más consumía tiempo en los ensayos
- dada la imposibilidad en muchos casos, incluso los naturales, de observar grietas se recurrió al uso de la espátula para cortar, embarrar e intentar formar nuevamente un rollo (si el suelo permite reconstituirlo como masa homogénea aún no se llega al LP)
- para llegar a la transición dúctil-frágil del suelo el tiempo necesario crecía conforme aumentaba el porcentaje de nanoSiO₂; por ejemplo, para suelo con 5 % de nanosustancia en ocasiones se necesitaban más de 5 horas, mientras que ese mismo suelo cuando contenía 9 % de nanoSiO₂ requería más de 6 horas, ocupando por encima de las 8 horas las muestras con 11 % de sustancia.

Lo anterior indica que expulsar agua en las masas nanomodificadas es un proceso más lento, lo que indirectamente nos da idea de la transformación de permeabilidad, la ocupación de los vacíos y con esto el incremento en su resistencia.

6.3.3 Resultados sobre el índice plástico y el índice de liquidez

El índice de plasticidad es el rango de contenidos de agua en el que un suelo puede soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse o agrietarse. En la Figura 6.25 se observa la variación del índice de plasticidad del conjunto de Muestras A. Se aprecia que agregar nanosustancia eleva el IP, sin embargo, algunas muestras no mantienen esta tendencia.

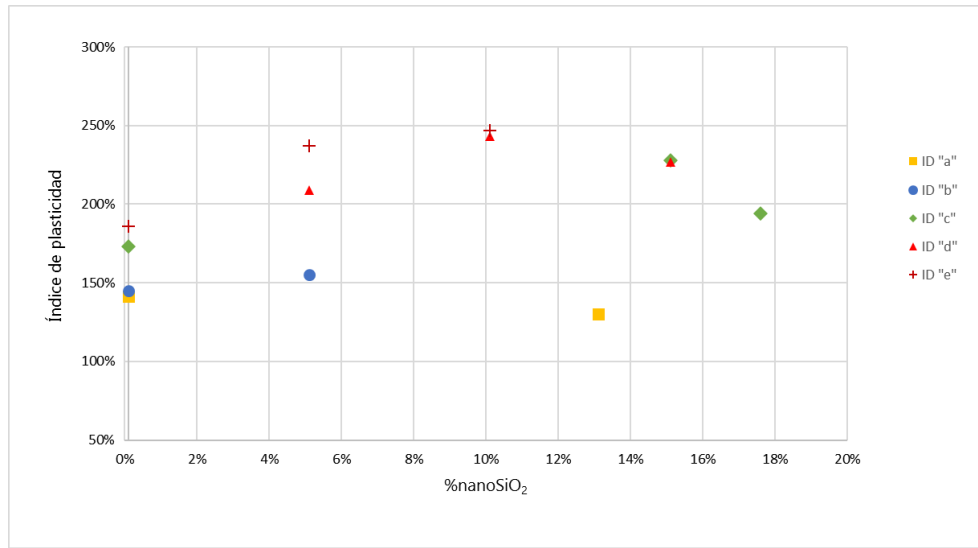


Figura 6.25 Variación del índice plástico en las Muestras A, tanto en suelos naturales como en nanomodificados.

Usando la información de las Muestras B (Figura 6.26) se observa que efectivamente existe un incremento en el valor de IP pero en esta ocasión es muy ligero.

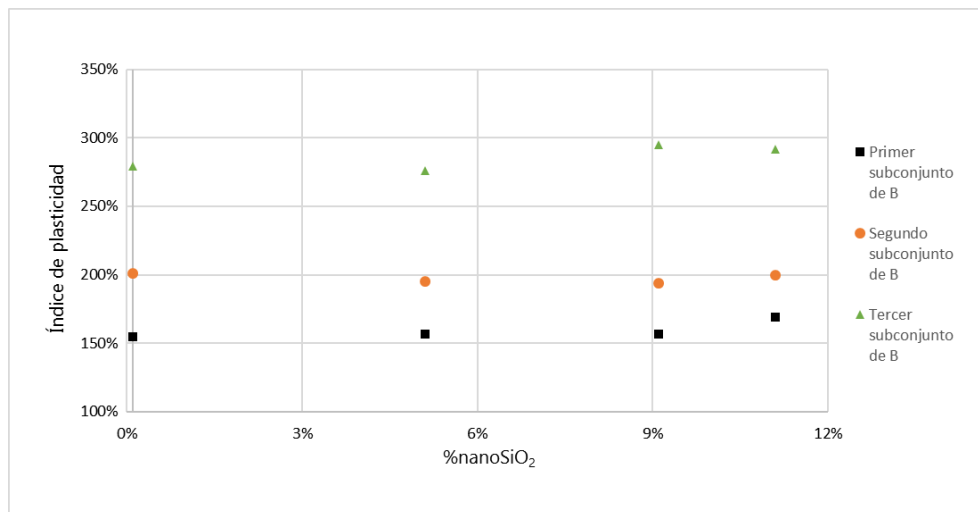


Figura 6.26 Variación del índice plástico en las Muestras B, tanto en suelos naturales como en nanomodificados.

Sin embargo, es importante señalar que si $IP = LL - LP$ y se ha declarado que el verdadero efecto de la nanosustancia sobre la masa natural (en términos de LP) no se puede determinar eficazmente con la prueba de los cilindros, entonces los valores de IP que se calcularon no representan totalmente la modificación en el comportamiento dúctil→frágil de los suelos arcillosos del ex-Lago de Texcoco.



✚ Variación del Índice de liquidez del conjunto de Muestras A

El índice de liquidez IL se refiere a la proximidad del suelo natural al límite líquido. Con el valor de IL se puede comparar la consistencia de los suelos cohesivos, además indirectamente es una medida aproximada de la resistencia del suelo (Lambe & Whitman, 1969). La Figura 6.27 muestra el comportamiento del índice de liquidez en las Muestras A. Aunque no se puede observar una tendencia muy clara, parece que al agregar nanoSiO₂ el IL disminuye (Figura 6.27 b, c), aunque en algunos casos sea ligero, se observa un corrimiento del valor en casi todas las muestras ensayados.

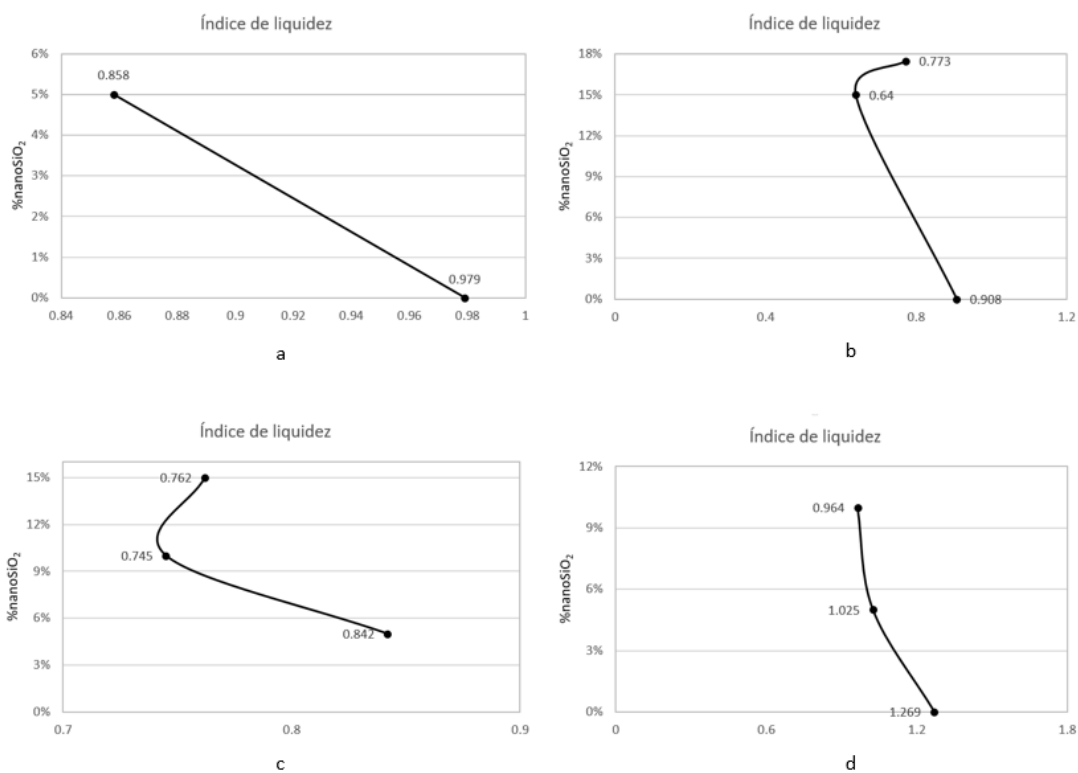


Figura 6.27 Variación del IL para las Muestras A. a) Muestra ID “b”. b) Muestra ID “c”. c) Muestra ID “d”. d) Muestra ID “e”.

✚ Variación del Índice de liquidez del conjunto de muestras B

En las Muestras B se ve más claramente que el índice de liquidez disminuye conforme aumenta el contenido de nanosustancia (Figura 6.28). Esto indica que existe un cambio en la consistencia del suelo que puede ser expresado como: arcilla con mayores proporciones de nanoSiO₂ presenta mayor resistencia. Incluso podría obtenerse el valor de la pendiente de estas rectas para construir una ley de comportamiento.

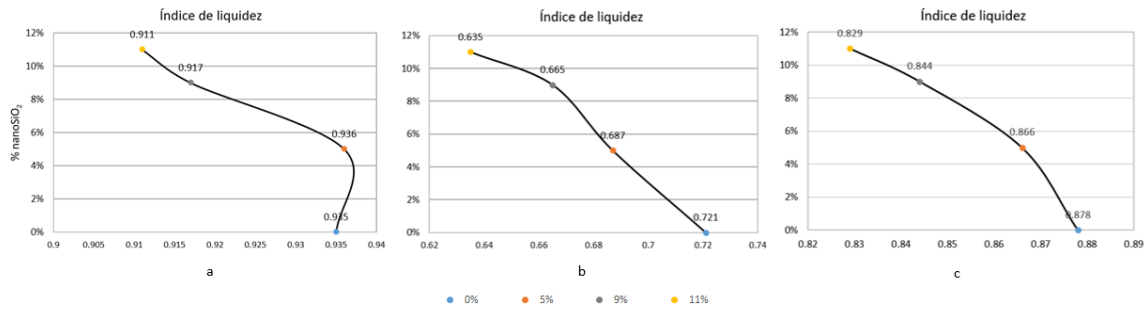


Figura 6.28 Variación del IL para las Muestras B. a) Primer subconjunto de B. b) Segundo subconjunto de B. c) Tercer subconjunto de B.

En la Tabla 6.4 se aprecia un resumen de los límites analizados para suelos naturales contra sus versiones nanomodificadas.

Tabla 6.4 Resultados del conjunto de Muestras A y B, tanto para muestras naturales como muestras nanomodificadas.

Conjunto A					Conjunto B				
NanoSiO ₂	W%	LL	LP	IP	NanoSiO ₂	W%	LL	LP	IP
Muestra ID "a"					Primer subconjunto				
0%	191%	189%	48%	141%	0%	195%	205%	50%	155%
13%	191%	198%	68%	130%	5%	195%	205%	48%	157%
Muestra ID "b"					Segundo subconjunto				
0%	191%	194%	49%	145%	9%	195%	208%	51%	157%
5%	191%	213%	58%	155%	11%	195%	210%	41%	169%
Muestra ID "c"					Tercer subconjunto				
0%	225%	241%	68%	173%	0%	193%	249%	48%	201%
15%	225%	307%	79%	228%	5%	193%	254%	59%	195%
17.50%	225%	269%	75%	194%	9%	193%	258%	64%	194%
Muestra ID "d"					Segundo subconjunto				
5%	250%	283%	74%	209%	11%	193%	266%	66%	200%
Muestra ID "e"					Tercer subconjunto				
10%	250%	315%	72%	243%	0%	314%	348%	69%	279%
15%	250%	304%	77%	227%	5%	314%	351%	75%	276%
Muestra ID "f"					Tercer subconjunto				
0%	300%	250%	64%	186%	9%	314%	360%	65%	295%
5%	300%	290%	53%	237%	11%	314%	364%	72%	292%
Muestra ID "f"					Tercer subconjunto				
10%	300%	306%	59%	247%					
0%	248%	278%	58%	220%					

6.4 Notas sobre los resultados.

Las implicaciones en la obtención del límite plástico estándar son variadas. Si consideramos que estas nociones se desarrollaron en 1911 con materiales “ideales” (suelos que se encuentran por encima de la línea A de la carta de plasticidad de Casagrande) y que se hipotetizó que los finos se comportan como un continuo en el que las teorías de fuerzas de corte en el estado crítico aplican, en tal caso los suelos “difíciles” (como los que se encuentran debajo de la línea A, con limos y arenas

en proporciones bajas y altas), entonces algunas de las condiciones para su aplicación, en esta investigación, no se cumplen y por lo tanto los resultados no son consistentes: deben ser tomados con precaución.

Uno de los efectos que se ha reconocido que provoca la nanoSiO_2 al entrar en contacto con la fase sólidos-agua es su configuración como gel (Figura 6.29 y 6.30) que:

- aglutina las partículas de suelo cercanas,
- reduce los espacios vacíos entre sólidos,
- ralentiza la expulsión de agua debido a carga o desecación y
- minimiza la cantidad de líquido que puede ser expulsada.

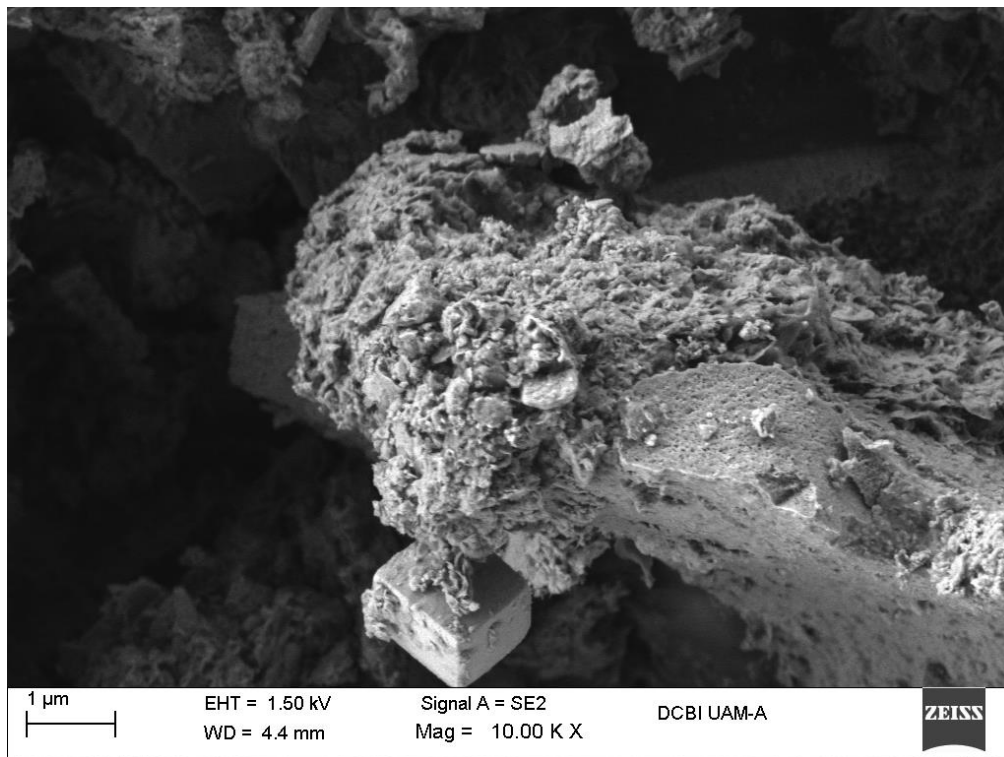


Figura 6.29 Fotografía SEM de una muestra de suelo del ex-Lago de Texcoco con 5 % de nanoSiO_2 (Tomada en el laboratorio del SEM en la UAM Azcapotzalco).

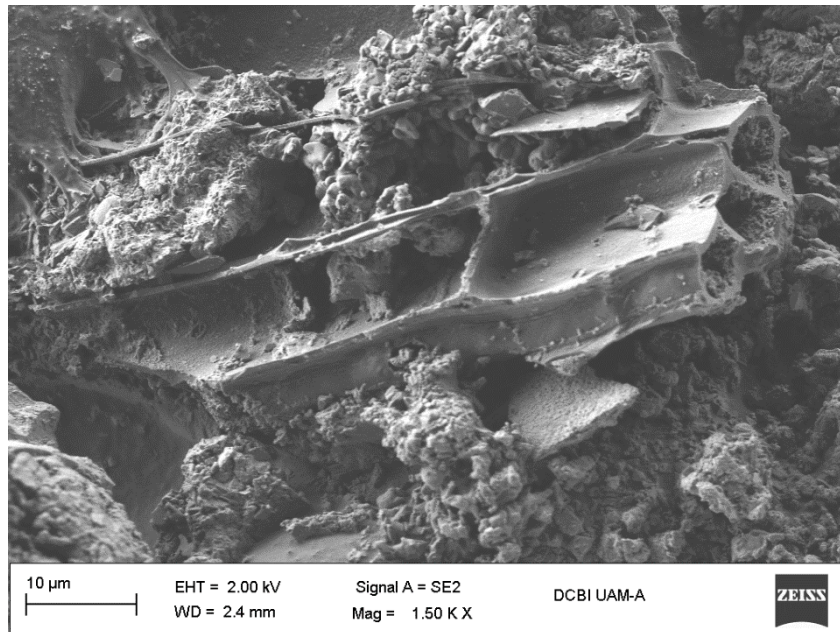


Figura 6.30 Fotografía SEM de una muestra de suelo del ex-Lago de Texcoco con nanoSiO₂ (Tomada en el laboratorio del SEM en la UAM Azcapotzalco).

De acuerdo con Marinho & Oliveira (2012), quienes demostraron que la entrada de aire (desaturación) alrededor del límite plástico en un suelo resulta en un cambio en la resistencia del suelo, volviendo frágil, las interpretaciones anteriores tienen sentido.

Además, si el límite plástico es el contenido de agua en la transición dúctil-frágil del suelo, parece que éste no cambia o lo hace muy poco, pero el proceso de cavitación (su tiempo de desarrollo y su extensión) se ve profundamente modificado y con esto, su resistencia al corte.

El límite líquido tanto para las Muestras A como las Muestras B se ve impactado por el contenido de nanosustancia: a mayor porcentaje de nanoSiO₂ se verifica aumento en la rigidez de las masas de suelo en la que parece alargarse el rango de contenidos de agua en la que las masas siguen siendo tenaces. El fortalecimiento de las masas que normalmente se consigue con graduales disminuciones del contenido de agua que permita arreglos de partículas más fuertes se consigue con el mezclado de mínimos contenidos de nanoSiO₂. El material expresa un incremento evidente de la rigidez (o endurecimiento) que se desarrolla muy rápidamente

7 CONCLUSIONES

La modificación de los suelos arcillosos de alta plasticidad (baja capacidad de carga y muy compresibles) del ex-Lago de Texcoco, es un tema fundamental desde diversos puntos de vista: ambiental, económico, social, resiliencia, etc.

La adición de nanosílice, nanoSiO_2 , a los suelos arcillosos de alta plasticidad del ex-Lago de Texcoco modifica la condición física de la mezcla de suelo y agua y por lo tanto afecta la consistencia de la arcilla. Aumentar la cantidad nanoSiO_2 , a Ss fijas, incrementa la resistencia al flujo por medio de dos posibles mecanismos a) crece la fuerza de atracción entre partículas y/o b) disminuye la permeabilidad.

La afectación al Límite Líquido es evidente al incrementar notablemente el contenido de humedad por encima del cual las mezclas suelo-agua pasan a estados líquidos. Lograr que las masas nanomodificadas se comportaran como fluidos viscosos y fluyeran bajo su propio peso fue prácticamente imposible. El rango en el que la mezcla se encuentra en estado plástico crece considerablemente conforme aumenta la nanoSiO_2 .

La determinación del Límite Plástico representó un reto tanto para masas naturales como para mezclas nanomodificadas. En esta investigación se aborda la complicación de llegar a la frontera dúctil-frágil por medio del método tradicional de los cilindros desecados. Conseguirlo para materiales sin nanoSiO_2 requirió de varias horas y el criterio de paro fue incierto, pero para las masas mezcladas con diferentes porcentajes de nanosustancias, conseguir el contenido de humedad para que la mezcla suelo-agua no fuera más plástica (generar agrietamiento) fue imposible. De forma indirecta se intentaron alternativas, pero se reconoce que todas ellas son profundamente subjetivas. Por lo anterior, el incremento de las fuerzas de atracción entre partículas cuando se estudia el LP, es más fácil de sentir físicamente que de describir cuantitativamente.

El índice de plasticidad, o rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo es plástico, definitivamente se modifica con la adición de nanoSiO_2 . Este hallazgo es de gran relevancia dada las muchas propiedades de ingeniería que se han correlacionado de forma empírica con el IP. Por ejemplo, un suelo con un $\text{IP} = 2$ (bajo) tiene una gama muy estrecha de plasticidad, por el contrario, un suelo con un $\text{IP} = 30$ tiene características plásticas muy elevadas. Para actividades de construcción la condición ideal deseada es un IP elevado y bajo LL con la precaución de que suelos naturales con esta condición pueden ser potencialmente expansivos. El efecto de la nanosustancia es precisamente elevar el IP sin significar adicionar elementos minerales que los hagan nocivos para los desarrollos civiles.

Como conclusión general de este estudio se tiene que existe una alta reactividad de las partículas de nano-sílice con las partículas del suelo, que esto conduce a la afectación de los límites de consistencia y que podría conducir a mejorar las propiedades del suelo como la plasticidad, el índice de expansión y la resistencia.

8 REFERENCIAS

AASHTO. (1987). "Soil mechanics" level I: Module 2. Study Guide. United States Department of Agriculture.

Almanza-Hernández P., Rangel-Núñez J. & Garfias-García E. (2013). "Study on the composition and microstructure of lacustrine soft soil deposits in Mexico City". ISSM-GE TC-214 Workshop on Extreme Soil Mechanics, SMIG., 3-12.

Ashby M., Ferreira P. & Schodek D. (2009). "Nanomaterials, nanotechnologies and design". Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

ASTM. (2000). "D 4318-00 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils".

Auvinet G., Méndez E. & Juárez M. (2017). "El subsuelo de la Ciudad de México". Vol. III. Ciudad de México: Instituto de ingeniería, UNAM.

AYSEN, A. (2002). "Soil mechanics: Basic concepts and engineering applications". Tokio: A.A. Balkema Publishers.

Barnes, G. (2013). "The plastic limit and workability of soils". Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, The University of Manchester.

Brar S., Zhang T., Verma M., Surampalli R. & Tyagi R. (2015). "Nanomaterials in the environment". United States of America: American Society of Civil Engineers.

Budhu M. (2010). "Soil mechanics and foundations". EUA: John Wiley & Sons, Inc.

Carreón-Freyre D., Hidalgo-Moreno C. & Hernández-Marín M. (2006). "Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México". Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Número Especial de Geología Urbana. Vol. (58), No. 2, 237-250.

Changizi F. & Haddad A. (2015). "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber". Journal of rock mechanics and geotechnical engineering 7, 367-378.

Clement K., Iseli A., Karote D., Cremer J. & Rajagopalan S. (2012). "Nanostructured materials industrial application". Handbook of industrial chemistry and biotechnology. Berlin: Springer.

Cornejo L. (2015). "La revolución nanotecnológica en los nuevos materiales. Un reto tecnológico para el siglo XXI". Universidad de Jaen.



- Craig R. (2004). "Craig's Soil Mechanics" (Seventh ed.). London and New York: Spon Press.
- Crespo C. (2004). "Mecánica de suelos y cimentaciones" (5a ed.). México: Limusa.
- Das B. (2008). "Advanced Soil Mechanics" (3a ed.). New York, USA: Taylor & Francis.
- Díaz del Castillo F. (2012). "Introducción a los nanomateriales". Lecturas de ingeniería 20.
- Díaz-Rodríguez A. (2011). "Diatomaceous soils: monotonic behavior". International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, September 1~3, 2011, Seoul, Korea.
- Díaz-Rodríguez A. & Santamarina C. (2001). "Mexico City soil behavior at different strains: Observations and physical interpretation". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 127(9), 783-789.
- Díaz-Rodríguez A. (1989). "Behavior of Mexico City clay subjected to undrained repeated loading". Canadian Geotechnical Journal, Vol. (26) No. 1, 159-162.
- Díaz-Rodríguez A. (2006). "Los Suelos Lacustres de la Ciudad de México". Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2), 111-130.
- Díaz-Rodríguez A. (2014). "Mecánica de suelos: Naturaleza y propiedades". México: Trillas.
- Díaz-Rodríguez A., Leroueil S., & Alemán D. (1992). "Yielding of Mexico City Clay and Other Natural Clays". Journal of Geotechnical Engineering 118 (7), 981-995.
- Díaz-Rodríguez, A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V., Vallejo, E., & Girón, P. (1998). "Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective". Can. Geotech. J., 600-610.
- Domínguez R., Hernández S., Almanza F. & Juárez J. (2001). "Manual de Prácticas de Laboratorio de Geotecnia". UAM-Azcapotzalco.
- Elices M. (2003). "Nanomateriales". Revista de la real academia de ciencias exactas, físicas y naturales. Vol. (97), 271-287.
- European Commission. (2011). "Recomendación de la comisión relativa a la definición de nanomaterial". Comisión Europea, 696.
- European Commission. (2012). "Types and uses of nanomaterials, including safety aspects". SWD 288 final.
- Ferrari L., Orozco T., Constantin V. & Manea M. (2012). "The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone". Tectonophysics 522-523, 122-149.



Galindo N. (2012). "Caracterización mecánica de suelos arcillosos afectados por derrames superficiales en hidrocarburos en concentración por porcentaje en peso: 5, 10, 15 y 30". Colombia, Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Tesis de licenciatura.

Gallagher P., Pamuk A. & Abdoun T. (2007). "Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica Grout". *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. (19). No.1, 33-40.

García S., Trejo P., Ramírez O., López-Molina J., & Hernández N. (2017). "Influence of Nanosilica on compressive strength of lacustrine soft clays". *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, South Korea.

Haigh, S., Vardanega, P., & Bolton, M. (2013). "The plastic limit of clays". *Géotechnique* 63, No.6, 435-440.

Haigh, S., Vardanega, P., Bolton, M., & Barnes, G. (2014). "Discussion, The plastic limit of clays". *Géotechnique* 64, No. 7, 584-586.

Garza G. (2000). "La Ciudad de México en el fin del segundo milenio". Ciudad de México: El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano.

Harwood D. & Gersonde R. (1990). "Lower Cretaceous diatoms from ODP leg 113 site 693 (Weddell Sea). Part 2: resting spores, chrysophycean cysts, and endoskeletal dinoflagellate, and notes on the origin of diatoms". *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol (113), 403-405.

Holtz R., Kovacs W. & Sheahan T. (2011). "An introduction to geotechnical engineering". USA: Pearson.

Huang Y. & Wang L. (2016). "Experimental studies on nanomaterials for soil improvement": a review *Environ Earth Sci* 75:497.

Huan-Lin L., Da-Hung H., Deng-Fong L. & Cong-Kai L. (2012). *Cohesive Soil Stabilized Using Sewage Sludge Ash/Cement and Nano Aluminum Oxide*. *International Journal of Transportation Science and Technology*. Vol (1). No.1, 83-99.

Ibukun I., Diwa D. & Obianigwe N. (2014). "Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay". *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, Vol. (3), Issue 4, 816-824.

INSHT. (2015). "Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales". Madrid.

Juárez E. & Rico A. (2005). "Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de suelos". Mexico: Limusa.

Khitab A. & Anwar W. (2016). "Advanced research on nanotechnology for civil engineering applications". United States of America: Engineering science reference.



- Lambe W. & Whitman R. (1969). "Soil mechanics". New York: John Wiley & Sons.
- Le T., Fatahi B. & Khabbaz H. (2012). "Viscous Behaviour of soft clay and inducing factors". *Geotechnical and Geological Engineering* 30(5), 1065-1083.
- López-Molina J. (2009). "Comportamiento cíclico de suelos diatomáceos". Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Losic D., Pillar R., Dilger T., Mitchell J. & Voelcker N. (2007). "Atomic force microscopy (AFM) characterisation of the porous silica nanostructure of two centric diatoms". *Journal of Porous Matter* 14(1), 61-69.
- Marinho F. & Oliveira O. (2012). Unconfined shear strength of compacted unsaturated plastic soils. *Proc. Inst. Civ. Engrs Geotech. Engng* 165, No. 2, 97-106.
- Marsal R. & Mazari M. (2016). "El Subsuelo de la Ciudad de México" Vol. I. Ciudad Universitaria, México: Instituto de ingeniería, UNAM.
- Medln L., Kooistra W., Gersonde R., Sims P. & Wellbrock U. (1997). "Is the origin of diatoms related to the end-Permian mass extinction?" *Nova Hedwigia*, 65, 1-11.
- Meléndez B. (1998). "Tratado de paleontología", Tomo I. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.
- Menéndez A. (2011). "Una revolución en miniatura: Nanotecnología al servicio de la humanidad". Universidad de Valencia: Sin fronteras.
- Mesri G., Rokhsar A. & Bohor B. (1975). "Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay". *Géotechnique*, 25 (3), 527-554.
- Mitchell J. & Soga K. (2005). "Fundamentals of soil behavior". Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Mohammadi M. & Niazian M. (2013). "Investigation of Nano-clay effect on geotechnical properties of rasht clay". *International journal of advanced scientific and technical research*. Vol. (3), Issue. 3, 37-46.
- Morales-Casique E., Escolero O. & Arce J. (2014). "Resultados del pozo San Lorenzo y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. (31), No. 1, 64-75.
- Mosser F. & Zuñiga A. (2005). "La capa dura y su extensión a las lomas". Memoria, Reunión conmemorativa de homenaje a Enrique Tamez Gonzáles, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Ciudad de México, México.
- National Nanotechnology Initiative, <https://www.nano.gov/>



Niroumand H., Zain M. & Alhosseini S. (2013). "The influence of nano-clays on compressive strength of earth bricks as sustainable materials". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 89, 862-865.

Ovando E. (2011). "Some geotechnical properties to characterize Mexico City Clay". *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*.

Ovando-Shelley E., Ossa A. & Santoyo E. (2013). "Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in Mexico City". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Vol. (65), No. 1, 157-167.

Peck R., Hanson W. & Thornburn T. (2001). "Ingeniería de cimentaciones". México: Limusa.

Pham H. & Nguyen Q. (2014). "Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions". *Journal of Nanoparticle Research* 2014. Vol. (16), 2137.

Rahman Z., Hamzah U. & Raiham M. (2010). "Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil". *American Journal of Applied Sciences* 7 (7), 954-961.

Santoyo E., Ovando E., Mooser F. & León E. (2005). "Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México". Ciudad de México: TGC Geotecnia S.A. de C.V.

Shiwakoti D., Tanaka H., Tanaka M. & Locat J. (2002). "Influences of Diatom microfossils on engineering properties of soils". *Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, 42(3), 1-17.

Smith G. & Smith I. (1998). "Elements of soil mechanics". U.S.A.: Blackwell science.

Song-Yuan C., Lei L. & Sanford A. (1994). "Preparation and properties of tailored morphology, monodisperse colloidal silica-cadmium sulfide nanocomposites". *J. Am. Chem. Soc.* Vol. (116) No. 15, 6739-6744.

Taha M. & Taha O. (2012). "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior". *Nanoparticles Research* 14, 1190-202.

Tamez E., Santoyo E., Mooser F. & Gutiérrez C. (1987). "Manual de diseño geotécnico". Vol. 1, *Metro en Cajón*. México: Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, Departamento del Distrito Federal.

Tamez E. (2001). "Ingeniería de cimentaciones: conceptos básicos de la práctica". Ciudad de México: tgc geotecnia.

Terzaghi K., Peck R. & Gholamreza M. (1996). "Soil mechanics in engineering practice" (3a. ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

To, D., Sundaresan, S., & Dave, R. (2011). Nanoparticle mixing through rapid expansion of high pressure and supercritical suspensions. *J. Nanopart Res*, 4253-4266.



USDA. (1999). "Guía para la evaluación de calidad y salud del suelo". Obtenido de United States Department of Agriculture: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/resource/>

Varadan V., Pillai A., Mukherji D., Dwivedi M. & Chen L. (2010). "Nanoscience and nanotechnology in engineering". New Jersey: World Scientific.

Whitman L., Makinen A., Friedersdorf L., Holdridge G., Thomas T., Madsen L. & Bobalek J. (2017). "The national nanotechnology initiative: Supplement to the president's 2018 budget". U.S.A.: Subcommittee on nanoscale science, engineering, and technology; Committee on technology; National science and technology council.

Yong, R., & Warkentin, B. (1966). Introduction to soil behavior. New York: Macmillan.