



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE
SECUENCIAS FLUVIO-LACUSTRES EN ZONAS VOLCÁNICAS Y SUS
CONDICIONES DE DEFORMACIÓN”**

**TESIS:
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA:**

Martha Daniela Martínez Alfaro

TUTOR:
Dra. Dora C. Carreón Freyre
Centro de Geociencias, UNAM

MIEMBROS DEL JURADO:
Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Instituto de Geofísica, UNAM
Dra. Marina Vega González, Centro de Geociencias, UNAM
Dra. María de la Luz Pérez Rea, UAQ
Dra. Teresa López Lara, UAQ

Juriquilla, Santiago de Querétaro., Agosto del 2016.



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.

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Dedicatoria

Para mis dos Ángeles:

***A mi hijo Ariel Iram Vega Martinez
por ser el gran motor que me hace ser,
por llenar mi vida de amor, alegría y felicidad,
Te amo.***

***Alfredo Hernández Alfaro 🎵
que me cuidas desde el cielo,
siempre estarás en mi corazón hermano.***



Tabla de Contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	xvi
Capítulo I Introducción	1
I.1 Hipótesis	1
I.2. Justificación	2
I.3 Objetivos	3
I.3.1. Objetivo general	3
I.3.2. Objetivos específicos	3
Capítulo II Antecedentes	4
II.1. Condiciones de formación de materiales granulares	5
II.2. Estudios previos sobre el comportamiento mecánico de materiales granulares	6
Capítulo III Propiedades de materiales arcillosos	8
III.1 Mineralogía de arcillas	8
III.1.1 Familias principales	8
III.1.2 Familia de las esmectitas: Montmorillonita	9
III.1.3 Grupo de los amorfos: Alófono	9
III.2 Propiedades fisicoquímicas	12
Capítulo IV Comportamiento mecánico de materiales arcillosos	14
IV.1 Relación agua-partícula	14
IV.2 Limites de consistencia o de Atterberg	14
IV.3 Propiedades índice	17
IV.4 Compresibilidad	18



Capítulo V Metodología	22
V.1 Propuesta metodológica para caracterización de materiales granulares	25
Capítulo VI Geología y localización de los sitios de estudio	31
VI.1 Sitio Tláhuac	31
VI.2 Sitio Irapuato	33
Capítulo VII Resultados	35
VII.1 Descripción de perfiles en la Ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato	35
VII.1.1 Descripción del perfil Tláhuac	35
VII.1.2 Descripción del perfil Irapuato	40
VII.2 Caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica de los materiales granulares de la Ciudad de México (Tláhuac) e Irapuato	43
VII.2.1 Caracterización fisicoquímica	43
VII.2.1.1 Sitio Tláhuac	43
VII.2.1.2 Sitio Irapuato	45
VII.2.2 Caracterización mineralógica	47
VII.2.2.1 Sitio Tláhuac	47
VII.2.2.2 Sitio Irapuato	61
VII.2.3 Caracterización mecánica	73
VII.2.3.1 Límites de consistencia	73
VII.2.3.1.1 Sitio Tláhuac	73
VII.2.3.1.2 Sitio Irapuato	76
VII.2.3.2 Propiedades índice	78
VII.2.3.2.1 Sitio Tláhuac	78
VII.2.3.2.2 Sitio Irapuato	80
VII.2.3.3 Compresibilidad	81
VII.2.3.3.1 Sitio Tláhuac	81
VII.2.3.3.2 Sitio Irapuato	84
Capítulo VIII Discusión	87
Capítulo IX Conclusiones	97
Referencias	99



Agradecimientos

Al CONACYT por la beca otorgada para el desarrollo de la maestría.

A todos miembros del jurado: Dra. Elizabeth Solleiro, Dra. Marina Vega González, Dra. María de la Luz Pérez y a la Dra. Teresa López Lara por los comentarios, explicaciones y sugerencias que fueron de gran importancia para mejorar este trabajo.

A la Dra. Dora Carreón Freyre por su apoyo, comentarios y sugerencias en este trabajo, así como en mi formación académica.

Al DGAPA UNAM a través del Proyecto PAPIIT IN114714, de Título Estudio de las propiedades mineralógicas y geomecánicas de materiales arcillosos, para el desarrollo de este trabajo.

Al equipo de trabajo de la sede en Geociencias del Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM.

Al Laboratorio de Mecánica de Geosistemas del Centro de Geociencias (LAMG) de la UNAM por el apoyo en el trabajo de laboratorio y campo.

M.C. Sara Solís Valdez por sus comentarios en este trabajo y apoyo en los análisis fisicoquímicos en el laboratorio de Edafología del Centro de Geociencias.

Dra. Marina Vega González por sus comentarios en este trabajo y apoyo en los análisis del laboratorio de Fluidos Corticales del Centro de Geociencias.

Dra. Beatriz Marcela Millán Malo por el apoyo en los análisis del laboratorio de DRX del Centro de Física Aplica y Tecnología.

IBQ Ma. Lourdes Palma Tirado del Instituto de Neurobiología por el apoyo en la microscopía electrónica de transmisión (TEM).

Al equipo de trabajo del Centro de Evaluación de Riesgo Geológico de la Delegación Iztapalapa de la Ciudad de México por el apoyo y colaboración en el sondeo realizados en la Delegación Tláhuac

Al Sr. Ricardo J. Carrizosa Elizondo, laboratorista del LAMG, por su apoyo y gran disposición para el trabajo del laboratorio.

A mis profesores Tim Lawton, Jaime Carrera, Penélope López, Ramón Zúñiga, Mariano Cerca, Sara Solís, Marina Vega por compartir sus conocimientos que fueron una gran herramienta para mi formación.

Marta Pereda por su constante apoyo, paciencia no solo para mi sino para cada uno de mis compañeros del posgrado.



A mis Padres y hermanas por su gran apoyo, fortaleza para seguir en el camino y por ayudarme hacer esto posible una vez mas.

Mis sobrinos Alonso, Leo, Andrea y Katia, por estar siempre ahí y darme ánimos, cariño y enseñanzas para continuar en el camino que elegí, los AMO.

A toda mis tíos y primos que desde pequeña me han acompañado en mi camino, son una hermosa compañía.

David Blain, gracias por que sin conocerme varios meses empezaste el día conmigo para ayudarme a cumplir uno de mis objetivos.

Marcos González y Félix Centeno sin duda, gracias por ser mis hermanos académicos y amigos por brindarme siempre su apoyo en lo académico y personal. Marco agradezco tu apoyo en este trabajo.

A mi madrina Pilar Soler y Adela Sánchez por su gran apoyo en un momento importante de mi vida.

A mis amigos desde ya hace mucho Claudio Flores, Cecilia González, Japhet Rivero, Gabriela Hernández, Mariana Elorza.

A mis compañeros de CGEO y amigos de cubo Aurora, Erick, Gloria, Violeta, Lorena, lisel, Cinthia, Arlette, Giovani y Paola, gracias por todos los momentos.

A mis compañeros del Fut-Cgeo, sin duda alguna los momentos mas divertidos.

Y a todas aquellas personas que directa o indirectamente me ayudaron a llegar aquí, GRACIAS.



Resumen

Las ciudades más pobladas del centro del México se ubican en planicies rellenas con materiales sedimentarios fluvio-lacustres que se asocian al emplazamiento de materiales volcánicos (piroclastos y lavas). La contemporaneidad entre procesos sedimentarios y volcánicos se traduce como una alta heterogeneidad de los materiales del subsuelo. La composición y estructura de materiales de relleno tienen una estrecha relación con el agua en las cuencas continentales como agente erosivo y de alteración, además de que el contenido de agua de los materiales granulares determina su comportamiento mecánico y en consecuencia la estabilidad de la infraestructura urbana. Para este trabajo se realizó la caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica de secuencias de materiales granulares con distintas proporciones de arcilla, limo y arena, tomadas a diferentes profundidades en dos sitios de estudio ubicados en el centro y margen de la FVTM, que presentan condiciones de formación y evolución distintas. En las ciudades de México e Irapuato se realizaron dos sondeos geotécnicos mixtos con recuperación de muestra intacta de 30 y 20 m de profundidad respectivamente. Para cada secuencia se determinaron: propiedades fisicoquímicas, mineralogía y propiedades mecánicas.

En el sitio de Tláhuac en la Ciudad de México, la secuencia es principalmente lacustre, con distintas variaciones en sus condiciones de óxido-reducción, asociadas a variaciones en el nivel del lago, con una gran cantidad de limo, que varía de limo-arenoso a limo arcilloso, con alta porosidad, y alto contenido de agua y carbono orgánico. La mineralogía de la fracción arcillosa corresponde principalmente a alófono. Estos materiales tienen una alta capacidad de retención de agua, su índice de plasticidad (IP) varía de 25 a 238 % en condiciones de humedad natural, su índice de compresibilidad (Cc) varía de 0.04 a 3.48 y presentan muy baja resistencia (0-23 golpes) en la prueba de resistencia a la penetración estándar (SPT). Por otra parte, en el sitio de Irapuato la secuencia presenta materiales arcillo-limosos y areno-limosos de origen fluvial con una porosidad y contenido de agua medios y bajo contenido en carbono orgánico. La caracterización mineralógica de las arcillas indica que son esmectitas (montmorillonita) y caolinita. Debido a sus condiciones climáticas actuales estos materiales presentan una baja humedad natural y su IP varía de 10 a 27 % en condiciones de humedad natural. Las arcillas están bien cristalizadas y recuperan su plasticidad, su IP aumenta de 18 a 63 % cuando se re-humedece el material de acuerdo a la norma de ASTM. Debido a la pérdida



de humedad, estos materiales son poco compresibles, su C_c varía de 0.02 a 0.48, y presentan mayor resistencia en la prueba SPT (más de 35-50 golpes).

En las secuencias estudiadas los resultados son contrastantes; en el sitio de Tláhuac se presentan altos contenidos de agua gravimétrica que se asocian a la estructura variable del alófono y en menor proporción a la cantidad de arcillas (montmorillonita). En el caso de Irapuato se trata de una cuenca drenada con bajo contenido de agua y menor C_c . El déficit de agua mantiene en estado de contracción la estructura y las arcillas cristalizadas, como la montmorillonita, pueden expandirse en presencia de agua. La caracterización sistemática de las secuencias evidencia la estrecha relación entre los procesos geológicos que dan origen a los materiales granulares, su evolución, sus propiedades fisicoquímicas y su comportamiento mecánico. Las características mineralógicas determinan su capacidad de retención de agua y en consecuencia sus propiedades mecánicas, como el incremento del IP en las montmorillonitas. Los resultados muestran también que su C_c no depende de la profundidad si no de su mineralogía y estructura. Los resultados obtenidos durante este trabajo permiten documentar con detalle las variaciones de las propiedades de los materiales granulares con la profundidad en dos cuencas de evolución geológica distinta, y la identificación de las propiedades que determinan su comportamiento mecánico. Este tipo de estudios permite una mejor estimación de las condiciones de deformación en secuencias heterogéneas en zonas de elevado desarrollo urbano.

Palabras Clave: arcillas, cuenca lacustre, compresibilidad, Tláhuac, Irapuato.



Abstract

The most populated cities in central Mexico are located in plains filled with fluvio-lacustrine sedimentary materials associated with volcanic materials (pyroclastics and lavas). Contemporaneity between sedimentary and volcanic processes translates to a high heterogeneity of subsurface materials. In continental basins the composition and structure of filling sediments have a close relationship with water as erosive and alteration agent, in addition, the water content of granular materials determines their mechanical behavior and consequently the stability of urban infrastructure. For this work was achieved the physicochemical, mineralogical and mechanical characterization of granular materials sequences with different proportions of clay, silt and sand at different depths in two study sites, located in the center and outside the TMVB, with contrasting geological conditions. In the cities of Mexico and Irapuato were drilled two geotechnical boreholes with intact sampling that reached 30 and 20 m deep respectively. For each sequence physicochemical properties, mineralogy and mechanical properties were determined.

At the Tláhuac study site, in Mexico City, the sequence is mainly lacustrine with variations in oxidation-reduction conditions associated with variations in the water level of the lake, composed mainly by silt, ranging from silt-sandy to clayey silt, with high porosity, water content and organic carbon. The mineralogy of the clay fraction corresponds mainly to allophane. These materials have high water retention capacity, its plasticity index (PI) ranging from 25 to 238% under conditions of natural moisture, its compressibility index (Cc) varies from 0.04 to 3.48 and have very low resistance (0- 23 strokes) in the Standard Penetration Test (SPT). In the other hand, in the Irapuato study site the sequence presents silty clay and sandy-loamy fluvial materials, having average values of porosity and water content and low organic carbon content. The mineralogical characterization indicates the presence of smectite (montmorillonite) and kaolinite clays. Because of their current weather conditions these materials have a low water content and IP varies from 10 to 27% in natural moisture conditions. Clays are well crystallized and recover its plasticity, its IP increases from 18 to 63% when re-wets the material according to the ASTM standard. Due to the loss of moisture, these materials are low compressible, its Cc varies from 0.02 to 0.48, and have high strength according to the SPT test (more than 35-50 strokes).



As mentioned before, in the studied sequences the results are contrasting; in the Tláhuac site high gravimetric water contents are associated with the variable structure allophane and in a less proportion to the amount of clay (montmorillonite). The Irapuato basin is drained and the materials present low water contents and C_c values. Because of the deficit in water the structure maintains a shrinkage state and crystallized clays, such as montmorillonite, may expand in the presence of water. The systematic characterization of the sequences shows the close relationship between the geological processes that give rise to granular materials distribution, physical properties, mechanical behavior and its evolution. The mineralogical characteristics determine its water retention capacity and thus its mechanical properties, such as an increased IP in montmorillonites. The results also show that C_c does not depend on the depth but on mineralogy and fine grained materials structure. The results obtained during this work allowed to document in detail the variations in the properties of granular materials with depth in two basins with different geological evolution and the identification of the properties that determine their mechanical behavior. This type of study allows a better estimate of the deformation conditions in heterogeneous sequences in areas of high urban development.

Keywords: clays, lacustrine basin, compressibility, Tláhuac, Irapuato.



Lista de Figuras

Figura 1. Imágenes de alófono e imogolita i) Microfotografías de TEM de alófono (tomado de Wada y Wada, 1977); ii) Microfotografías de TEM de alófono e imogolita en arcillas finas. Escala: 500 Å (tomado de Henmi y Wada, 1976).....	11
Figura 2. Carta de Plasticidad SUCS (Casagrande, 1926) donde CL son arcillas de baja o media plasticidad; OL son limos inorgánicos y arcillas limosas de baja o media plasticidad; ML son limos ligeramente plásticos; MH son limos plásticos; CH arcillas inorgánicas de alta plasticidad y OH son orgánicos de alta plasticidad.....	16
Figura 3. Diagrama donde se resumen las etapas de campo y laboratorio utilizadas en este trabajo.....	22
Figura 4. Ubicación de sondeos geotécnicos en las ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato, Gto., ubicadas dentro de la FVTM.....	24
Figura 5. Sondeo geotécnico mixto con recuperación de muestra intacta (tubo Shelby) y de prueba de Resistencia a la Penetración Estándar (SPT) ó alterada, en la en la Ciudad de México (Tláhuac), realizado en Diciembre del 2014.	24
Figura 6. Sondeo geotécnico mixto con recuperación de muestra intacta y de la prueba de Resistencia a la Penetración Estándar (SPT) en la Ciudad de Irapuato, Guanajuato., realizado en Julio del 2015.....	25
Figura 7. Características de muestras recuperadas: en a) Muestra alterada recuperada de la prueba SPT; b) Recuperación de muestra intacta en tubo Shelby.....	25
Figura 8. Diagrama donde se muestra el trabajo inter-laboratorio. El Laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG) como el principal laboratorio, en donde se corroboraron los horizontes descritos en campo y se separaron las muestras para posteriormente distribuir las en cada laboratorio para su análisis correspondiente.....	26
Figura 9. Diagrama de flujo de la caracterización fisicoquímica realizada en los laboratorios de Edafología y LAMG del Centro de Geociencias	27
Figura 10. Diagrama donde se muestran los diferentes análisis realizados para la caracterización mineralógica en cada uno de los laboratorios correspondientes.....	29
Figura 11. Diagrama que muestra los diferentes análisis para la caracterización mecánica realizados en el LAMG.....	30
Figura 12. Localización de sondeo geotécnico en realizado en la Ciudad de México (Tláhuac)....	31
Figura 13. Geología del sitio de estudio en la Ciudad de México (Tláhuac), el círculo verde, muestra la ubicación del sondeo geotécnico realizado (CERG, 2012).....	32
Figura 14. Localización sondeo geotécnico en la ciudad de Irapuato, Guanajuato.....	33
Figura 15. Geología de la Ciudad de Irapuato, Guanajuato (tomado de Rodríguez-Castillo y Schroeder-Aguirre, 2010).....	34
Figura 16. Fotografías de la recuperación de muestra alterada (SPT) en Tláhuac a distinta profundidad: (a) 17.40 m, (b) 22.60 m.....	38



Figura 17. Fotografías de material recuperado de tubo Shelby en Tláhuac a distinta profundidad (a) de 5.5 a 6.4 m, se observa material fracturado;(b) Fotografía de 29.10 a 30 m, se puede observar que la recuperación no fue del 100% debido a que el material se encontraba fracturado.....38

Figura 18. Perfil del sondeo geotécnico realizado en la Tláhuac. Se muestra la variación de la humedad de 135 a 430 % con la profundidad y el número de golpes de hincado. P.H: hincado por peso propio de la herramienta; NF: nivel freático, encontrado a 1.80 m. Los cuadros en amarillo indican la ubicación de las muestras analizadas en este sondeo: MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31.....39

Figura 19. Perfil del sondeo geotécnico realizado en Irapuato. Se muestra la variación de la humedad de 10 a 36 % con la profundidad; el numero de golpes de hincado y el nivel freático no se encontró a la profundidad del sondeo. Los cuadros en amarillos indican la ubicación de las muestras analizadas: MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80.....42

Figura 20. Perfil del sondeo realizado en la Tláhuac, se observa la variación de su granulometría con la profundidad y predomina el contenido de limo.....44

Figura 21. Se muestra el perfil con la variación de la granulometría con la profundidad del sondeo realizado en la Ciudad de Irapuato. La secuencia presenta materiales arcillo-limosos y areno-limosos.....46

Figuran 22. Amplificación del horizonte H6 (11.40-12.23 m) del sondeo realizado en Tláhuac, donde se tomó la muestra MA-T3-H6-12. El horizonte H6 es una secuencia limo-arenosa de color verde con pequeños lentes de color rojizo (oxidación). Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.....47

Figura 23. Difractograma en MTA del horizonte H6 donde se encuentra la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificaron las fases minerales calcita (en rojo), anortita (en azul), cuarzo (en verde) y probables arcillas (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....48

Figura 24. Difractograma en FAI de la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificó la posible arcilla pobremente cristalizada. En a) se muestra la interpretación de montmorillonita y en b) se muestra la posible presencia de vermiculita; en color negro se observa la muestra sin glicolar y en azul la muestra glicolada . En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....49

Figura 25. Microfotografías de SEM de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) en la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac, a diferentes ampliaciones. Se observan agregados de partículas de morfología granular gruesa. Las partículas más pequeñas presentan tamaño menores a 2 μm , que se pueden observar en las flechas (rojo).....50

Figura 26. Microfotografías de TEM de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) en la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac. Se observan morfologías esféricas similares a las del alófono. Los diámetros encontrados varían entre 4.1 a 5.6 nm que no son identificables a las escalas usadas.....50

Figura 27. Amplificación de un tramo (17.00-17.90 m) del horizonte H10 del sondeo realizado en Tláhuac, donde se tomo la muestra MB-T4-H10-17. Se observa una secuencia limo-arcillosa de color verde olivo intercalada con arena negra, a los 17.80 m destaca un lente de ceniza de 3 cm.



Se muestra una fotografía que corresponden a la muestra (seca) sometida a la prueba de consolidación.....51

Figura 28. Difractograma en MTA de un tramo (17.00-17.90 m) del horizonte H10, donde se encuentra la muestra MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificaron las fases minerales calcita (en rojo), anortita (en azul), cuarzo (en verde) y probables arcillas (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....52

Figura 29. Difractograma en FAI de la muestra MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. Se observa la posible presencia de montmorillonita (rojo) pobremente cristalizada. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....52

Figura 30. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) de MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) y (b) se observa morfología granular fina, en (c) y en (d) se observan posibles fragmentos de diatomeas (algas silíceas) menores a 5 μm . En (d) se la flecha indica un posible fragmento de diatomea.....53

Figura 31. Microfotografías de TEM de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) se observa una estructura tubular de 20 μm con zonas internas esferoides en b) se observa una ampliación de (a). En (c) y (d) se observan estructuras esferoides de diámetros entre 3.5 a 5.2 nm no identificables a las escalas usadas (posible alófono).....53

Figura 32. Amplificación de un tramo (22.50 a 23.40 m) del horizonte H11 del sondeo realizado en Tláhuac, donde se tomo las muestras MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. De 22.50 a 22.75 m se observa una secuencia arcillosa de color verde olivo, continuando con una secuencia arcillosa de color café rojiza con intercalaciones de arcillas de color verde. Se presentan fotografías de las muestras antes mencionadas sometidas a la prueba de consolidación; en a) muestra MC-T5-H11-22.55 seca después de la prueba, en b) muestra MD-T5-H11-22.85 húmeda después de prueba, c)muestra intacta de la muestra ME-T5-H11-23.31 y d) muestra ME-T5-H11-23.31 húmeda antes de prueba.....54

Figura 33. Difractograma en MTA de un tramo (22.50-22.75 m) del horizonte H11, donde se encuentra la muestra MC-T5-H11-22.55 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificaron las fases minerales calcita (en rojo), anortita (en azul), cuarzo (en verde) y probables arcillas (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....55

Figura 34. Difractograma de la fracción arcillosa de muestra intacta FAI de la muestra MC-T5-H11-22.55 del sondeo realizado en Tláhuac. En a) observa la interpretación de montmorillonita y en b) la interpretación de la posible presencia de vermiculita; en color negro se observa la muestra sin glicolar y en azul la muestra glicolada. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....55

Figura 35. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta del tramo 22.50-22.75 m, en donde se ubica la muestra MC-T5-H11-22.55 del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) y (b) se observan morfologías granulares muy finas, en (c) y (d) se observa morfología laminar (flechas) y escasa morfología granular.....56

Figura 36. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) del tramo 22.50-22.75 m, en donde se ubica la muestra MC-T5-H11-22.55, del sondeo realizado en Tláhuac. En (a), (b), (c) y (d) se observan estructuras laminares (flechas) y escasa a nula morfología esferoide (cuadro en amarillo).....57

Figura 37. Difractograma de la muestra total alterada MTA del tramo 22.75-23.40 m del sondeo realizado en Tláhuac. Este tramo corresponde a la ubicación de las muestras MD-T5-H11-22.85 y



ME-T5-H11-23.31. En el difractograma se observa el registro de calcita, anortita, cuarzo y probables arcillas. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).
.....58

Figura 38. Difractograma de la fracción arcillosa de muestra intacta FAI de la muestra MD-T5-H11-22.85, del sondeo realizado en Tláhuac. Se observa el posible registro de montmorillonita muy poco cristalina y material amorfo. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....58

Figura 39. Microfotografías de SEM diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) MD-T5-H11-22.85, del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) y (b) morfología granular gruesa, en (c) y (d) morfología granular gruesa y posibles fragmentos de diatomeas.....59

Figura 40. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) MD-T5-H11-22.85, del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) se observan diatomeas centrales *Alaucoseira granulata* (Ehrenberg, 1843), de aproximadamente 6 µm de largo y 2 µm de ancho, en b) morfologías esféricas, laminares y posibles diatomeas, en (c) morfologías esféricas y/o diatomeas con longitudes mayores a 1000 nm, en (d) posibles morfologías de diatomeas.....60

Figura 41. Amplificación del tramo 6.60-7.32 m donde se ubica la muestra MF-Ir3-7.07 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por material arcillo-limoso de color café oscuro (fracturado) intercalado con un lente de arena media a gruesa a los 6.75 m con 20 cm de espesor. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.....61

Figura 42. Difractograma en MTA obtenida del tramo 6.60-7.32 m donde se ubica la muestra MF-Ir3-7.07 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....62

Figura 43. Difractograma en FAI de la muestra MF-Ir3-7.07, del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul y verde) y caolinita (en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....62

Figura 44. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones en FAI de la muestra MF-Ir3-7.07 del sondeo realizado en Irapuato . En (a), (b), (c), y (d); se observan morfologías laminares de 50 a 25 µm de longitud.....63

Figura 45. Amplificación del tramo 8.35-8.80 m donde se ubica la muestra MG-Ir3-8.60 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una secuencia limo-arenoso de color café claro. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.....64

Figura 46. Difractograma en MTA obtenida del tramo 8.35-8.80 donde se ubica la muestra MG-Ir3-8.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....64

Figura 47. Difractograma en FAI de la muestra MG-Ir3-8.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita(en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....65



- Figura 48.** Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MG-Ir3-8.60, del sondeo realizado en Irapuato. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares menores a 200 nm de longitud.....65
- Figura 49.** Amplificación del tramo 10.70-10.90 m, donde se ubica la muestra MH-Ir3-10.85 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una secuencia arcillo-limosa de color café. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.....66
- Figura 50.** Difractograma en MTA obtenida del tramo 10.70-10.70 donde se ubica la muestra MH-Ir3-10.85 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....67
- Figura 51.** Difractograma en FAI de la muestra MH-Ir3-10.85, del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita (en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....67
- Figura 52.** Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MH-Ir3-10.85. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares de 50 a 30 μm de longitud.....68
- Figura 53.** Amplificación del tramo 15.12-15.90 m, donde se ubica la muestra MI-Ir2-15.60 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una secuencia arcillo-limosa color café claro. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.....68
- Figura 54.** Difractograma en MTA obtenida del tramo 15.12-15.90 m, donde se ubica la muestra MI-Ir2-15.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....69
- Figura 55.** Difractograma en FAI de la muestra MI-Ir2-15.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita(en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....69
- Figura 56.** Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MI-Ir2-15.60. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares menores a 50 μm70
- Figura 57.** Amplificación del tramo 16.25-16.95 m, donde se ubica la muestra MJ-Ir2-16.80 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una intercalación de limo (café) y arcilla (negra). Se muestra fotografía que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba.....71
- Figura 58.** Difractograma en MTA obtenida del tramo 16.25.16.95 m, donde se ubica la muestra MJ-Ir2-16.80 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....71



Figura 59. Difractograma en FAI de la muestra MJ-Ir2-16.80, del sondeo realizado en Irapuato. . Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita(en verde). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).....72

Figura 60. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MJ-Ir2-16.80. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares de entre 50 y 200 nm.....72

Figura 61. Límites de consistencia del sondeo realizado en Tláhuac, ubicados en la Carta de Plasticidad para su clasificación SUCS. Todos los materiales de las muestras analizadas se encuentran dentro de la clasificación de MH (limos de alta plasticidad), pero su alto contenido de materia orgánica indica que son materiales orgánicos de alta plasticidad (OH).....74

Figura 62. Perfil del sondeo realizado en Tláhuac con la variación de límites de consistencia a diferentes profundidades bajo condiciones de humedad natural (línea negra) según la norma ASTM (línea roja). Los límites líquidos se marcan con un cuadro y los plásticos con un rombo. Se puede observar la disminución general del índice de plasticidad al realizar los análisis según la norma ASTM, que en condiciones de humedad natural en prácticamente toda la secuencia es mayor a su límite líquido.....75

Figura 63. . Límites de consistencia del sondeo realizado en Irapuato ubicados en la Carta de Plasticidad para su clasificación SUCS. Los materiales de las muestras analizadas se encuentran dentro de la clasificación de arcillas de baja plasticidad en estado húmedo a excepción de la muestra MH-Ir3-10.85 que es un arcilla de alta plasticidad y acillas de alta plasticidad a excepción de la muestra MG-Ir3-8.60.....76

Figura 64. Perfil del sondeo realizado en Irapuato que presenta la variación de límites de consistencia de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, bajo condiciones de humedad natural (línea negra) y según la norma ASTM (línea roja). Los límites líquidos se marcan con un rombo y los plásticos con un cuadro. Se puede observar el aumento general del índice de plasticidad según la norma ASTM, que las muestras en condiciones de humedad natural en prácticamente toda la secuencia es menor a su límite líquido.....77

Figura 65. Fotografías de material recuperado en tubo Shelby (MTI) del sondeo realizado en Tláhuac a distintas profundidades (a) 17.0-17.30 m; (b) 22.8-23.10 m; y (c) 23.10-23.40 m.....78

Figura 66. Gráficos de propiedades índice de las muestras analizadas (MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31) del sondeo realizado en Tláhuac, donde se muestra la variación con la profundidad de la porosidad, contenido de agua volumétrica en %; la relación de vacíos (sin unidades) y humedad natural (%)......79

Figura 67. Gráficos donde se muestra la variación con la profundidad de la porosidad y contenido de agua volumétrica en %; la relación de vacíos y humedad natural, para las muestras analizadas del sondeo realizado en Irapuato.....80

Figura 68. Curvas de compresibilidad de las muestras analizadas en el sitio Tláhuac; en a) MA-T3-H6-12, b) MB-T4-H10-17, c) MC-T5-H11-22.55, d) MD-T5-H11-22.85 y e) ME-T5-H11-23.31. Las graficas presentan en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm^2) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos. Las curvas (a) y (e) con una presión de consolidación es de 0.52 y 0.28 Kg/cm^2 respectivamente. Las curvas (b), (c) y (d) no presentan tramo de preconsolidación.....82



Figura 69. Curvas de compresibilidad de las muestras analizadas en el sitio Tláhuac; en (a) MA-T3-H6-12, (b) MB-T4-H10-17, (c) MC-T5-H11-22.55, (d) MD-T5-H11-22.85 y (e) ME-T5-H11-23.31. Las graficas presentan en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm^2) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos (en el mismo rango). Como se puede observar la curva de MA-T3-H6-12, es la menos compresible y la curva de MD-T5-H11-22.85 es la mas compresible.....83

Figura 70. Curvas de compresibilidad de las muestras en a) MF-Ir3-7.07, b) MG-Ir3-8.60, c) MH-Ir3-10.85, d) MI-Ir2-15.60 y e) MJ-Ir-16.80 del sitio Irapuato. Las graficas presenta en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm^2) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos. La curva a) no presenta tramo de pre-consolidación. En b), c), d) y e) las curvas con una presión de consolidación de 1.3, 1.2, 1.0 y 1.2 Kg/cm^2 respectivamente.....85

Figura 71. Curvas de compresibilidad de las muestras analizadas en el sitio Irapuato; en a) MF-Ir3-7.07, b) MG-Ir3-8.60, c) MH-Ir3-10.85, d) MI-Ir2-15.60 y e) MJ-Ir-16.80 del sitio Irapuato. Las graficas presenta en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm^2) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos (en el mismo rango). Se muestra que las curvas de compresibilidad a la misma escala con el fin de observar las diferencias de compresibilidad.....86

Figura 72. Grafica que muestra los limites de consistencia para los sondeos realizados en Tláhuac e Irapuato. La grafica muestra variaciones contrastantes para ambos casos; Para Tláhuac los limites con humedad natural son muy plásticos pero después de secado y re-humedecido (ASTM) la plasticidad disminuye; caso contrario en Irapuato, presenta baja plasticidad con humedad natural, pero después de secado y re-humedecido (ASTM) absorbe agua por lo que la plasticidad aumenta.....95

Figura 73. Grafica que muestra los índices de compresibilidad (C_c) para los sondeos realizados en Tláhuac e Irapuato (MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85, ME-T5-H11-23.31; MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80). Los resultados indican que Tláhuac presenta C_c mayores en comparación con Irapuato y no están asociados con la profundidad.....96



Lista de Tablas

Tabla 1. Se presentan valores correspondientes a la resistencia en materiales arcillosos dependiendo de su consistencia y numero de golpes (N), por la prueba SPT (Terzaghi y Peck, 1948 en Juárez y Rico 2005).....	39
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de las muestras MA-T3-H6-12 MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31, del sondeo realizado en la ciudad de México (Tláhuac), donde: W; humedad natural, C.O.: carbono orgánico, C.E: conductividad eléctrica, D.R: densidad real.....	43
Tabla 3. Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, del sondeo realizado en la Ciudad de Irapuato, donde: W; humedad natural, C.O.; carbono orgánico, C.E.; conductividad eléctrica, D.R; densidad real.....	45
Tabla 4. Características mineralógicas del sondeo realizado en Tláhuac. La mineralogía se determinó por DRX de MTA y de FAI. La morfología se obtuvo por SEM y TEM de la FAI, para cada una de las muestras analizadas (MA-T3-H6-12 MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31).....	60
Tabla 5. Se presentan los resultados de la mineralogía del sondeo realizado en Irapuato para las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, en los análisis de DRX de MTA y de FAI. De igual manera se presentan los resultados de la morfología observada en los análisis de SEM y/o TEM en FAI.....	73
Tabla 6. Resultados de los límites de consistencia de las cinco muestras analizadas en condiciones de humedad natural y según la norma ASTM D4318-95a, 98 (seco y rehumedecido), del sondeo realizado en Tláhuac. Donde; LL: límite liquido, LP: límite plástico e IP: es índice de plasticidad. Los resultados presentan variaciones de índice de plasticidad de húmedo a seco con disminuciones de hasta 81 %. La clasificación SUCS indica que todos los materiales son orgánicos de alta plasticidad (OH).....	74
Tabla 7. Resultados de las pruebas de límites de consistencia de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, en condiciones de humedad natural y según la norma ASTM D4318-95a, 98, así como su clasificación SUCS. Donde; LL es límite liquido, LP es límite plástico e IP es índice de plasticidad. Presentan variaciones de índice de plasticidad de seco (rehumedecidas) a húmedo con aumentos de hasta 150 %, la clasificación SUCS indica que los suelos son CL y CH.....	78
Tabla 8. Propiedades índice en muestras con humedad natural al abrir el núcleo del sondeo realizado en Tláhuac; donde n: porosidad, e: relación de vacíos, %Wv: contenido de agua volumétrica y humedad natural.	79
Tabla 9. Propiedades índice en muestras con humedad natural al abrir el núcleo donde n: porosidad, e: relación de vacíos, %Wv: contenido de agua volumétrica; y humedad natural, para las muestras analizadas en el sitio de Irapuato.....	80
Tabla 10. Se muestran los resultados de los índices de compresibilidad (Cc) y la razón de sobre consolidación (OCR) las muestras analizadas del sondeo Tláhuac.....	81
Tabla 11. Se muestran los resultados de los índices de compresibilidad (Cc) y la razón de sobre consolidación (OCR) las muestras analizadas del caso Irapuato.....	84
Tabla 12. Tabla donde se muestra la comparación de las propiedades mas importantes de los sitios de estudio: Tláhuac e Irapuato.....	96



Capítulo I Introducción

Los procesos de formación y evolución de los materiales geológicos tienen una incidencia directa en su estructura, su composición (mineralogía) y sus principales propiedades hidrodinámicas, como la compresibilidad. El estado de esfuerzo de los suelos también puede depender de su proceso de formación (Wesley, 2009). El estudio de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos, materiales granulares o geomateriales, especialmente en los materiales arcillosos que los componen, permite entender las variaciones de su comportamiento mecánico.

Las propiedades físicas asociadas al contenido de arcilla son: el contenido gravimétrico de agua o humedad, la composición mineralógica, la granulometría, el tipo de cationes intercambiables, la presencia de sales y de materia orgánica (Wilson, 1936; Schmitz et al., 2004; Beroya et al., 2009).

En el presente trabajo se presentan la caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica de dos sondeos geotécnicos (Tláhuac e Irapuato) que se ubican en cuencas fluvio-lacustres asociados a procesos volcánicos distintos en su formación, dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) en su parte central y septentrional. A pesar de que ambas cuencas son de origen volcánico, sus procesos de formación y evolución son distintos, lo que se refleja en su comportamiento mecánico como se muestra en las variaciones de sus propiedades físicas y mecánicas con la profundidad.

I.1 Hipótesis

La influencia en las condiciones de formación y evolución de materiales geológicos granulares en secuencias fluvio-lacustres ubicados en zonas volcánicas determinan su heterogeneidad, estructura y mineralogía principalmente de los minerales del tamaño de arcilla que tienen relación directa en su comportamiento mecánico. Los resultados permitirán demostrar que la deformación en estas secuencias depende de sus condiciones de formación que se ven reflejadas en sus propiedades fisicoquímicas y mineralógicas.



I.2. Justificación

La mayoría de las ciudades en el centro del país se ubican en planicies lacustres rellenas con materiales sedimentarios fluvio-lacustres altamente heterogéneos en su composición y estructura, que se encuentran dentro de zonas volcánicas por lo que se asocian a estos materiales.

Con este estudio se pretende resaltar la relevancia de la caracterización de materiales granulares finos, como la variación mineralógica y fisicoquímica con la profundidad, para analizar sus variaciones de plasticidad y compresibilidad; ya que aunque existen estudios sobre la caracterización de estos materiales (*i.e.* Rudolph, 1997; Díaz *et al.* 1998; Gutiérrez *et al.* 2005) pocos han involucrado de manera sistemática las variaciones de sus propiedades con la profundidad y condiciones de formación.

En este trabajo se analizan las variaciones mineralógicas y fisicoquímicas de dos secuencias sedimentarias de propiedades contrastantes a diferentes profundidades, incluso en un mismo horizonte debido a la estratificación micro-estructural. Los dos sitios estudiados están ubicados en la parte central y septentrional de la Faja Volcánica Transmexicana (FVMT) en cuencas fluvio-lacustres que tienen diferentes condiciones de formación para explicar la importancia de su evolución en su estructura y comportamiento mecánico.

Además en este trabajo también se pretende resaltar la relevancia de la caracterización de materiales para determinar las propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y mecánicas (compresibilidad) de los materiales granulares (limo-arcillosos) presentes en cuencas lacustres. Se hace énfasis en la relación entre la mineralogía de estos materiales y sus condiciones de formación, ya que éstas determinan la estructura y capacidad de retención de agua y en consecuencia su comportamiento mecánico.



I.3 Objetivos

I.3.1 Objetivo General

Caracterizar dos secuencias con diferentes condiciones de formación en las Ciudades de México e Irapuato para relacionar las condiciones de formación y evolución de secuencias lacustres y fluviales en zonas volcánicas con las variaciones mineralógicas de su fracción arcillosa y sus propiedades mecánicas. Implementar una metodología para la caracterización de materiales granulares finos.

I.3.2 Objetivos específicos

1. Estudiar la variación a profundidad de cinco muestras en cada secuencia estudiada de sus propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y mecánicas.
2. Determinar las propiedades mecánicas de las cinco muestras por medio de compresibilidad relacionándolo a su mineralogía.
3. Implementar una propuesta metodológica para la caracterización de materiales granulares finos.



Capítulo II Antecedentes

El término "suelo" tiene una amplia variedad de definiciones y también se le puede denominar material granular o sedimento de acuerdo a la disciplina de estudio. Los principales factores formadores de los suelos son el clima, topografía, tiempo, vegetación y material parental. En términos generales se refiere a un conjunto de partículas minerales producto de la desintegración mecánica o de la descomposición de las rocas preexistentes y en ingeniería se enfatiza su grado de cohesión en el sentido de su susceptibilidad a la desintegración de la masa y a la disgregación mecánica (Rico y Del Castillo, 1996).

En agricultura el suelo es un material rico en materia orgánica apto para el cultivo de plantas (Zbik *et al.*, 2015). En Geología, es un depósito formado por los agentes físicos como el agua, viento o el hielo y es producido por la erosión química, biológica y física de los materiales sólidos en la superficie de la tierra (Zbik *et al.*, 2015). Birkeland (1984) lo definió como un cuerpo natural que consiste en capas u horizontes de minerales y constituyentes orgánicos de espesor variable, que referencia al material de matriz en sus características morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas, así como sus características biológicas.

En este trabajo se utiliza el término de "material granular" haciendo referencia a suelos, sedimentos o depósitos piroclásticos re TRABAJADOS. De acuerdo a su comportamiento mecánico, los materiales granulares se clasifican en cohesivos y no cohesivos (Lambe, 1969). En Los materiales cohesivos, a diferencia de los materiales no cohesivos, sus granos están unidos por los enlaces entre las partículas que son dependientes de la interacción física, electroquímica, mecánica y de sus factores biológicos (Kimiaghalam *et al.*, 2015). Los materiales cohesivos pueden estar constituidos por arcillas y en menor cantidad por limos, ya que las partículas de arcilla tienen mayor superficie específica en comparación con las partículas más gruesas, por lo que imponen mayores fuerzas electroquímicas. Los materiales altamente cohesivos son muy plásticos (Kimiaghalam *et al.*, 2015).



II.1 Condiciones de formación de materiales granulares

Los factores que influyen en la formación de los materiales granulares son el clima, la vegetación, topografía, el tiempo y material parental (Hilgar, 1892; Campos *et al.*, 2001), este último es importante para conocer su génesis y poder interpretar sus propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y mecánicas. Wesley, (2009) y otros autores clasifican los materiales granulares de acuerdo a su origen en residuales y sedimentarios (Wesley, 2009), que comúnmente son llamados transportados (Righi y Meunier, 1995; Lambe y Whitman, 1969).

Materiales granulares sedimentarios o transportados

Se forman por proceso de deposición, frecuentemente en un ambiente marino o de lago que se puede someter a varios procesos adicionales tienen un grado de homogeneidad mayor en comparación con los suelos residuales, ya que durante su proceso de erosión (transporte-deposición) obtienen buena clasificación.

Materiales granulares residuales

Formados por los procesos de intemperismo físico y químico a partir de su roca madre. Wesley (2009) los clasifica según su mineralogía: a) sin una fuerte influencia mineralógica que contienen arcillas de baja actividad (caolinita), b) con fuerte mineralogía que contienen arcillas de alta actividad, como las esmectitas y c) con una fuerte influencia mineralógica procedentes de los minerales de arcilla especiales (alófono y halloysita; minerales de arcilla de sílice). Los materiales granulares residuales con fuerte influencia mineralógica procedentes de los minerales de arcilla especiales incluyen: i) arcillas rojas tropicales (gibbsita y goetita), ii) materiales granulares volcánicos de ceniza (Andisoles) que están formados por intemperismo del vidrio volcánico; el mineral del tamaño de arcilla predominante es el alófono que es asociado a la imogolita y iii) Lateritas, depósitos que han alcanzado una etapa avanzada y ha dado lugar a una concentración de óxidos de hierro de aluminio que actúan como agentes cementantes.

Durante la alteración de rocas básicas, el sílice y el Mg son lixiviados, mientras que el Fe^{3+} y el Al se concentran en los horizontes superiores dando origen a la formación de suelos arcillosos residuales (Velde 1995; Alcocer *et al.*, 2000). El material transportado continúa su evolución al ser depositado en un ambiente húmedo, parte del agua migra a través del



suelo como drenaje interno, algunos minerales son disueltos y la solución se desplaza hacia las partes inferiores del perfil de suelo.

El movimiento de elementos en el suelo está directamente relacionado con la estructura del suelo, ya que las arcillas se acumulan en los horizontes medios del perfil reduciendo la permeabilidad de la parte superior en donde se pueden establecer condiciones de oxidación-reducción (Gama et al., 1998).

II.2 Estudios previos sobre el comportamiento mecánico de materiales granulares

Los procesos de formación y evolución de los materiales granulares han sido estudiados por autores como Wesley, 2009; Lambe & Whitman, 1995; hacen énfasis en la clasificación de estos materiales ya que pueden variar en su composición y heterogeneidad dependiendo de su origen. Los minerales arcillosos que determinan el comportamiento mecánico han sido documentados por Wilson, 1999; Carreón *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2016;. Los materiales arcillosos afectan los procesos biológicos, físicos y químicos de los suelos (Velde y Meunier, (2009); Cébron *et al.* (2015); Zhang *et al.*, 2016) ya que su estructura es parte fundamental de estos cambios.

Estos materiales pueden presentar estructura laminar definida (Carbajal *et al.*, 1997; Campos *et al.*, 2001) o variada, tipo esferoides como el alófono, por ejemplo (Wesley, 2001; Wesley, 2009; Wada 1987; Parfit 1990; Parfit, 2009; Theng *et al.*, 1982; Moore&Reynolds, 1989) o tipo tubular o de hilo como la imogolita, por ejemplo (Parfit, 2009; Moore&Reynolds, 1989; Wesley, 2001).

Los materiales que tienen estructura laminar se pueden identificar con difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM) (Moore&Reynolds, 1989), pero los que tienen una estructura variada, como el alófono, se muestran como amorfos a la DRX por tener sólo orden de corto alcance (Parfit 1990 a); Arai *et al.* (2005) mencionan que el alófono sintético se puede identificar por esta técnica por dos reflexiones anchas y poco intensas en 26.5 y 39.5° 2 θ aproximadamente, que corresponden a 0.34 y 0.225 nm de espaciamiento interplanar. En microscopía electrónica (Wada 1977; Moore&Reynolds, 1989) se presentan como partículas esféricas huecas e irregulares de aproximadamente 3.5 a 5 nm de diámetro. La imogolita se presenta de forma tubular con diámetros entre 1.8 a 2.02 nm (Wesley, 2001; Moore&Reynolds, 1989).



La mineralogía de materiales granulares arcillosos (con estructura laminar o variada) tienen una relación directa con el agua ya que, dependiendo del tipo de material del que se trate, el agua será parte de la estructura, como agua intermolecular (alófano), se adherirá a la estructura, como agua absorbida (esmectitas), o viajará como agua libre entre los agregados.

Estos tipos de agua se desplazan en el proceso de consolidación por lo que han sido discutidas por varios autores, como Wesley (2001), Saarenketo (1998), Warren y Rudolph (1997). El agua libre está relacionada con la consolidación primaria de estos materiales (Carreón Freyre *et al.*, 2003).

Ohstubo *et al.* (1983) correlacionan los límites de consistencia con la variación de la capacidad de retención de agua de las partículas del suelo en función de las características químicas de las arcillas y del agua intersticial; y para el caso de los minerales con estructura variada en función de sus características químicas y el agua intermolecular.



Capítulo III Propiedades de materiales arcillosos

III.1 Mineralogía general de arcillas

III.1.1 Familias principales

Los minerales arcillosos se forman por procesos de intemperismo, por alteración hidrotermal en zonas volcánicas o por procesos sedimentarios en cuencas lacustres continentales (Righi y Meunier, en Velde 1995). La unidad estructural básica de los minerales de arcilla es una estructura de capas que comprende una lámina de sílice tetraédrica y una lámina octaédrica de alúmina; las diferentes proporciones de las dos láminas conducen a la formación de los tipos de minerales de arcilla 1:1, 2:1 y 2:1:1 (Calabi-Floody *et al.* 2009).

La formación de los minerales de arcilla generalmente se originan por tres distintos procesos (meteorización): (1) la herencia detrítica, por ejemplo, los minerales de arcilla se heredan de la roca madre preexistente o materiales erosionados; (2) transformación, es decir, la estructura de capas del mineral de arcilla se mantiene, pero se altera la región de capa intermedia de la estructura; y (3) neoformación, es decir, el mineral de arcilla se forma a través de cristalización de geles o soluciones (Wilson, 1999). La neo-formación de arcillas y otros minerales secundarios en la secuencia sedimentaria dependen de las concentraciones iónicas en el sistema del suelo, condiciones Eh (óxido-reducción) y pH (acidez-alcalinidad) (Carreón *et al.*, 2006).

Los patrones de evolución de los minerales de arcilla generalmente se pueden resumir como: 1) minerales primarios se transforman a partir de minerales 2:1 a tipo 1:1; y 2) caolinita se forma por hidrólisis total de minerales primarios en ciertas condiciones (Wilson, 1999; Zhang *et al.*, 2016). Las arcillas tipo 1:1 son formadas a partir de minerales primarios que evolucionaron a minerales secundarios, que se transformaron a través de reacciones pedogeoquímicas (Wilson, 1999).

Los principales grupos materiales arcillosos son: caolinitas, ilitas, vermiculitas y esméctitas, así como los minerales especiales de origen volcánico comúnmente llamados amorfos que comprende principalmente alófano e imogolita. Estos minerales tienen una amplia distribución de tamaño de partícula, por ejemplo la caolinita es de aproximadamente 300 nm; la esméctita se distribuye generalmente en partículas de



tamaño <100 nm, y el mineral principal (montmorillonita) existe principalmente en partículas de tamaño de 450- 2000 nm de partículas (Zhang *et al.*, 2016).

En este trabajo se estudian con detalle las características de la familia de las esmectitas y el alófono, ya que estos minerales se encuentran en las zonas de estudio.

III.1.2 Familia de las esmectitas

Las arcillas esmectíticas se forman en zonas de lago con drenaje restringido bajo condiciones salino-alcálinas. Tienen una estructura 2:1, un espaciamento basal variable de 15 Å y su superficie específica de varios cientos de metros (Hillier, en Velde, (1995); Carbajal *et al.*, 1997; Wesley, 2009).

Dentro de la familia de las esmectitas se encuentra la montmorillonita $[(OH)_4.Si_8Al_4O_{20}.nH_2O]$ formada por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente, por lo tanto su estructura es tipo 2:1. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil: las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Se produce así un incremento en el volumen de los cristales (expansión).

En las cuencas con actividad volcánica e hidrotermal se favorece la formación y deposición de montmorillonita (Carbajal *et al.*, 1997) que, en presencia de agua presenta fuerte tendencia a la inestabilidad. La alta plasticidad en estas arcillas es debido a su estructura laminar y sus propiedades químicas, como capacidad de absorción de agua y cationes intercambiables por mencionar algunos (Carbajal *et al.*, 1997).

III.1.3 Grupo de los amorfos: Alófono

La formación de los suelos alofánicos se debe a la rápida alteración de ceniza volcánica y pumicita (Warren y Rudolph, 1997), el material parental generalmente tiene una estructura no cristalina (de bajo orden). La ceniza volcánica cumple con este criterio ya que se forma por el enfriamiento rápido del material piroclástico de grano relativamente fino, lo que no permite la formación de estructuras cristalinas bien ordenadas y pueden formarse de limo grueso a arena fina (Wesley 2009). Parfit (2009), menciona que los suelos con cenizas volcánicas tienen humedad suficiente para que la lixiviación del sílice se lleve a cabo. Los suelos alofánicos también se pueden formar en los sedimentos lacustres y lavas (Farmer *et al.*, (1980 a); Parfit, 2009; Warren y Rudolph, 1997).



Parfitt (1990a) definió al alófono como un mineral con orden de corto alcance que contiene sílice, alúmina y agua en combinación química. Existen alófonos ricos en aluminio (Al:Si = 2:1) y ricos en silicio (Al:Si = 1:1), los que muestran abundante aluminio están ligados a la imogolita por tener el mismo arreglo atómico y composición química pero diferente morfología (Wada, 1989; Shoji *et al.*, 1993); se considera que la imogolita tiene orden de largo alcance en una dimensión (Farmer y Russell, 1990). El alófono y la imogolita tienen cargas positivas y negativas que interactúan fuertemente con aniones como fosfato o arsenato (Parfitt, 1990a; Parfitt, 2009). Poseen grandes superficies específicas de 700-1500 m²/g, respectivamente.

El alófono es amorfo a los Rayos X (Wesley 2001), aunque Wada, (1989) y Wesley (2009) mencionan que tienen una estructura ordenada, de naturaleza muy diferente a los otros minerales de arcilla, que consiste en agregaciones de partículas esféricas huecas con diámetros de 35 a 50 Å entretejidas con hilos de imogolita (tubulares de 18.3-20.2 Å de diámetro) o formando puentes entre ellos (ver Figura 1). El alófono se puede identificar por espectroscopia de infrarrojo (IR), siempre que las bandas de silicato no oscurezcan las del alófono (Farmer *et al.*, 1977 a; Parfitt, 2009).

Los alófonos tienen propiedades contrastantes cuando se encuentra en condiciones de humedad natural y cuando es secado. En condiciones naturales de humedad, los suelos con alófono poseen un cierto volumen pero con la deshidratación éste disminuye de manera notable. La cantidad de agua que retienen estos suelos es muy alta entre, 50 y 300 %, y es el resultado del volumen grande y de poros pequeños que dominan (Shoji y Ono, 1978; Wesley 2001).

La estructura de partículas esferoides con estructuras filiformes parece explicar el alto contenido de agua natural y los cambios que se experimentan cuando la muestra es remoldeada, ya que el remoldeo parece romper los agregados de partículas, lo que hace que el material se vuelva homogéneo sin estructura. Todo lo anterior va acompañado de una pérdida de resistencia y aumento en su compresibilidad, así como un aumento de permeabilidad (Parfitt, 2009).

El contenido de agua tiene una relación directa con el contenido de alófono, por tanto si un material tiene alto contenido de agua, este puede estar asociado a un alto contenido de alófono. Los materiales con que contienen alófono poseen alta porosidad y relación de vacíos (1.5-8) pero baja densidad aparente (Wesley, 2009). Conservan una carga



eléctrica permanente baja y una carga eléctrica variable alta subordinada al pH (Parfitt *et al.*, 1989; Wada, 1989; Parfitt, 1990; Shoji *et al.* 1996; Parfitt 2009).

La relación de vacíos de los materiales granulares alofánicos se ha reportado para cenizas volcánicas en diferentes partes del mundo como Colombia, Japón e India. En Japón se han reportado relaciones de vacíos que varían de 3.0 a 5.7; y de 1 a 6.1 (Herrera *et al.*, 2007); en India de 1.9 a 4.1 donde el alófono es predominante (Herrera *et al.*, 2007); en Colombia de 2 a 7 (Forero *et al.*, (1999) en Herrera *et al.*, 2007) y de 0.88-3.62 (Arango *et al.*, (1993) en Herrera *et al.*, 2007).

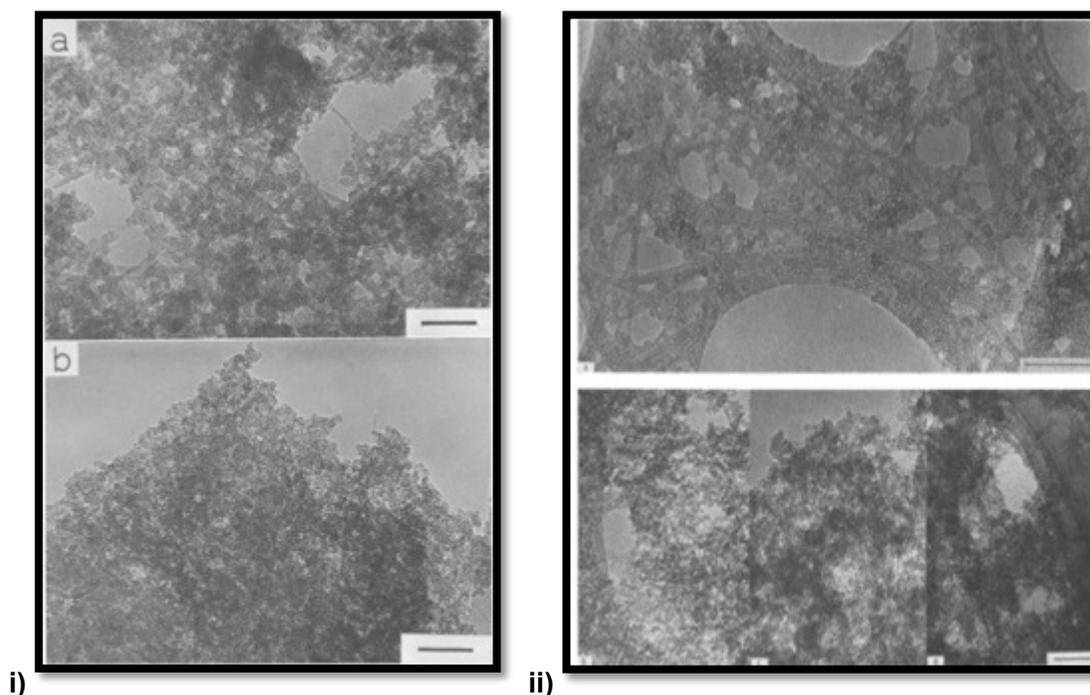


Figura 1. Imágenes de alófono e imogolita i) Microfotografías de TEM de alófono (tomado de Wada y Wada, 1977); ii) Microfotografías de TEM de alófono e imogolita en arcillas finas. Escala: 500 Å (tomado de Henmi y Wada, 1976).



III.2 Propiedades fisicoquímicas

En general, el comportamiento hidromecánico de arcillas se rige por la competencia fisicoquímicas y los efectos mecánicos (Cui *et al.*, 2002; Le *et al.*, 2011). A continuación se mencionan las propiedades fisicoquímicas determinadas en el presente trabajo y su influencia.

pH-sales

Las arcillas no activas son inertes a los cambios en la concentración de sal del agua de los poros, pero sensibles a los cambios de pH y la constante dieléctrica (debido a sus fuerzas atractivas de Van de Waals). Di Maio *et al.*, 2004; Nguyen *et al.*, 2014, mostraron efectos significativos de la concentración salina del agua de poros en el comportamiento hidromecánico de arcillas expansivas y se reconstituye con amplios rangos de las concentraciones de: i) cambios en la concentración de la sal y el resultado de tipo de iones en los cambios de volumen reversibles o irreversibles de suelo, principalmente por la consolidación osmótica; ii) el aumento de la tensión vertical reduce el grado de cambio de volumen inducido químicamente; y iii) la compresibilidad y capacidad de hinchamiento se reducen mediante el aumento de la concentración de sal. Estos efectos generalmente se han explicado con la teoría de la doble capa difusa (Mitchell y Soga, 2005).

Conductividad Eléctrica

Los materiales desde la arena hasta la arcilla presentan una conductividad eléctrica baja a alta respectivamente, esta variable se correlaciona con el tamaño de grano y la textura del suelo. Asimismo una salinidad mayor provoca mayor conductividad eléctrica (Barbosa y Overstreet, 2011; Kimiaghalam *et al.*, 2015).

Carbono orgánico

La acumulación de carbono orgánico es una propiedad de algunos suelos como los Andisoles; suelos de origen volcánico (Campos *et al.*, 2001), aquí la estabilidad de la materia orgánica ocurre por la formación de complejos del aluminio con el humus y por la adsorción de las sustancias húmicas al alófono o a la imogolita. (Parfitt. 1980; Shoji *et al.*, 1993).



Estructura

Resnik (2007) menciona que el efecto total de los enlaces estructurales de los materiales granulares pueden ser caracterizados por valores de presión estructural, que son los valores máximos de tensión para los cuales sólo se ha recuperado las deformaciones que pueden ser observadas.

Algunos materiales granulares tienen la propiedad de ser colapsables, ya que su volumen disminuye con un aumento del contenido de humedad bajo tensión vertical total, prácticamente sin cambios, estos suelos son muy sensibles a los cambios de porosidad y contenido de humedad. Los suelos más porosos colapsan bajo cargas más pequeñas que los suelos más densos o llenos, ya que tienen mayor contenido de agua.

Granulometría de finos

La distribución granulométrica que en edafología es comúnmente llamada textura, puede ser de materiales gruesos y materiales finos. Los materiales gruesos son todos aquellos materiales que son retenidos en la malla #200



Capítulo IV Comportamiento mecánico de materiales arcillosos

IV.1 Relación agua-partícula

Los materiales formados en suelos residuales tienen gran heterogeneidad en su fracción arcillosa (Wesley, 2009). Existe una estrecha relación entre la estructura de arcilla y su relación agua-partícula. Las partículas de arcilla retienen moléculas de agua eléctricamente que forman parte de su estructura (Velde, 1995). Al agua que se encuentra en la superficie de las partículas se le conoce como agua adsorbida (principalmente presente en las arcillas esmectíticas) y consiste en una capa molecular extremadamente organizada alrededor de las superficies minerales cargadas negativamente y capas adicionales de agua libre-que circula libremente por los poros (Lyon y Buckman (1937) en Saarenketo, 1999) y se necesitan presiones relativamente altas para separarlas de las partículas del suelo (Saarenketo, 1999). El agua intermolecular es aquella que forma parte la estructura de los minerales (i.e., alofano)

El agua libre, está sujeta únicamente a las presiones hidrostática y litostática y algunos autores como Urry (1995) mencionan que la poseen los amorfos, debido a su intercambio de enlaces. Este tipo está relacionada con la consolidación primaria de los materiales arcillosos.

IV.2 Límites de consistencia o de Atterberg

La plasticidad para los minerales de arcilla es la propiedad que tienen ciertos materiales que permiten que se deforme repetidamente sin ruptura, cuando actúe sobre él una fuerza suficiente para causar la deformación y que le permite retener su forma después de la fuerza aplicada se ha eliminado (Perkins (1995) en Andrade *et al.*, 2011).

Albert Atterberg (1911), descubrió que la plasticidad es una característica particular de las arcillas. Y definió que los límites de consistencia o de Atterberg, que se utilizan para caracterizar el comportamiento materiales granulares finos y mencionó que hay una cantidad definida de agua en la que la arcilla es fácilmente moldeable y que cuando su contenido de humedad es bajo aparecen grietas en el cuerpo de la arcilla cuando este se moldea.

Atterberg marcó fronteras entre los estados en los que se pueden presentar los materiales, a los cuales denominó como: Limite Líquido (LL), es el contenido de agua en la que el cuerpo empieza a fluir y marca la transición entre el estado líquido y el plástico;



Limite Plástico (LP) al contenido de agua más bajo a la cual el cuerpo puede ser enrollado en hilos sin romperse (Beroya et al., 2006; Andrade *et al.*, 2011) y es la transición entre el estado plástico y el estado semisólido; y Limite de contracción (LC) es la frontera que separa el estado semisólido del sólido. La diferencia entre el LL y LP se le llama índice de plasticidad (IP), lo que nos indica que tan plástico es un suelo. Casagrande, estandarizó el método para determinar si los suelos son formados por materiales arcillosos o no arcillosos (Andrade *et al.*, 2011) (Figura 2).

Los límites pueden dar información importante sobre el comportamiento de la arcilla (Jefferson y Rogers 1998; Andrade *et al.*, 2011), como su capacidad de retención de agua y sus propiedades índice (que explican cualitativamente el comportamiento mecánico del suelo). La variación de la capacidad de retención de agua de las partículas de suelo está en función de las características químicas de las arcillas y del agua intersticial. Lambe y Whitman (1979) mencionan en cuanto mayor sea la cantidad de agua retenida por el suelo menor será la interacción entre partículas adyacentes y su comportamiento mecánico más se acercará a un límite líquido.

Un sistema de agua arcillosa de alta plasticidad requiere más fuerza para deformarse y se deforma en mayor medida sin agrietarse que uno de baja plasticidad que se deforma más fácilmente y se rompe antes (Brownell 1977; Andrade *et al.*, 2011). A medida que aumenta el contenido de agua de la arcilla, la plasticidad aumenta hasta un máximo, dependiendo de la naturaleza de la arcilla (Andrade *et al.*, 2011).

Factores que influyen en la plasticidad pueden estar relacionadas con el mineral de arcilla o el proceso de moldeo (Carman (1949) en Andrade *et al.*, 2011).

Para el caso de los minerales de arcilla amorfos el secado (natural y en horno) tiene un efecto muy importante ya que se ha demostrado con arcillas amorfas de Nueva Guinea que varían en sus índices de plasticidad de 30 a 80 en su estado natural se convierten en no plásticas cuando se secan (Frost, 1967; Wesley, 2009) ya que sufren cambios irreversibles cuando se secan y pasan de ser un material muy plástico a uno no plástico.

Estos minerales se encuentran en el diagrama de plasticidad convencional muy por debajo de la línea A. Lo que el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) indicaría que son limos, aunque estos no presentan características que se asocian con el limo (Wesley, 2009).

El secado y la remodelación alteran las propiedades y el comportamiento de los materiales granulares de cenizas volcánicas y hacen que los métodos tradicionales de



clasificación de suelos inadecuados (Knight, (1986) en Herrera et al., 2007). En el estado no perturbado, suelos de cenizas volcánicas aparecen como una arena limosa bajo contenido de agua con poca o ninguna plasticidad. Sin embargo cuando son remoldeados pierden la unión de la partícula y su humedad se hace evidente que exhiben un comportamiento muy plástico (NZ Geotechnical Sociedad (2003) en Herrera et al., 2007). El secado altera la retención de la plasticidad y el agua. La alta plasticidad en la condición natural disminuye después de aire o secado en horno. La pérdida de plasticidad depende del contenido inicial de agua, temperatura de secado, y la duración de la desecación (Wada y Wada (1977); Shoji *et al.* (1993); Wesley, (2003); Wesley 2009). El grado de pérdida de plasticidad irreversible sigue siendo poco clara (Herrera et al., 2007).

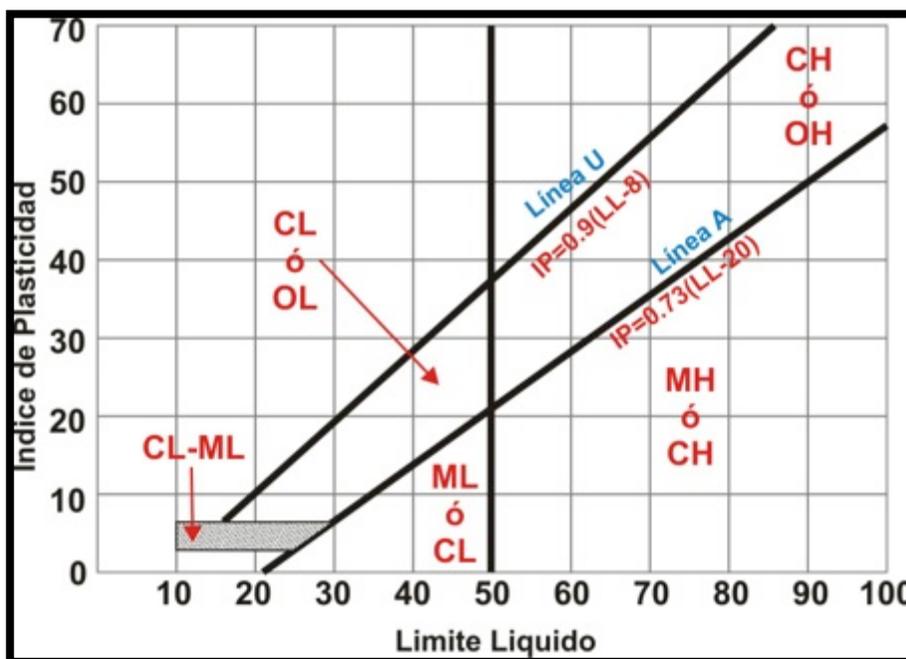


Figura 2. Carta de Plasticidad SUCS (Casagrande, 1926) donde CL son arcillas de baja o media plasticidad; OL son limos inorgánicos y arcillas limosas de baja o media plasticidad; ML son limos ligeramente plásticos; MH son limos plásticos; CH arcillas inorgánicas de alta plasticidad y OH son orgánicos de alta plasticidad.

Otro factor que influye en la variación de los límites de Atterberg es el contenido de sales, ya que algunos experimentos demuestran que las sales reducen el límite líquido, cuando la arcilla se mezcla con soluciones salinas se transformó en un limo o arcilla arenosa. (Schmitz *et al.*, 2004).



Se pueden hacer estimaciones que pueden indicar las propiedades mecánicas, haciendo una correlación entre los límites de Atterberg y la mineralogía de arcillas, siempre y cuando se conozcan los cambios en la mineralogía de la arcilla. El límite líquido y el índice de plasticidad están altamente influenciados por la capacidad de los minerales de arcilla para interactuar con los líquidos (Schmitz *et al.*, 2004). Estas relaciones se hacen con el concepto de la Distancia Basal Equivalente (EBS) según Schmitz *et al.*, 2002.

Ohstubo et al. (1983) correlacionó los límites de consistencia (plasticidad) con la variación de la capacidad de retención de agua de las partículas de suelo en función de las características químicas de las arcillas y del agua intersticial. Los materiales con el mismo límite líquido pueden tener diferente límite plástico o de contracción, de este modo exhiben diferentes comportamiento en el cambio de volumen o contracción. Como consecuencia, los suelos están obligados a exhibir comportamiento diferente compresibilidad a pesar de que el límite líquido es el mismo.

Se ha señalado en la literatura (Sridharan y Nagaraj, 2000), que las fuerzas capilares inician el proceso de contracción. Las fuerzas capilares dependen del tamaño de los poros: cuanto menor sea el tamaño de poro, mayor será las fuerzas capilares (Sridharan y Nagaraj, 2000).

IV.3 Propiedades índice

Las propiedades índice, son propiedades de uso ingenieril, como porosidad, relación de vacíos, contenido de agua volumétrica, y contenido de agua gravimétrico o humedad.

Porosidad (n)

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total, y se expresa en %.

$$n = \left(\frac{Vv}{Vt} \right) * 100$$

El efecto de la porosidad inicial y el contenido de humedad en las propiedades mecánicas de los suelos y rocas débiles fue descubierta desde hace muchos años por Schmertmann, (1955), Holtz *et al.*, (1986), Wesley (1990) en Resnik, 2007; estos autores dejaron claro que la estructura de un material, afecta significativamente sus propiedades mecánicas. La naturaleza de los enlaces estructurales de suelos cohesivos es una función de su origen (Mitchell y Sitar (1982) en Resnik, 2007).



Relación de Vacíos (e):

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de las partículas sólidas; es adimensional.

$$e = V_v/V_s$$

In-situ los valores de relación de vacíos y contenidos de humedad pueden determinarse por métodos geofísicos. Materiales granulares formados de cenizas volcánicas se caracterizan por una muy alta proporción de vacíos, retención de agua y alta plasticidad (Herrera *et al.*, 2007).

Contenido de agua gravimétrico o humedad (%):

Es la relación en % de agua con respecto al peso de los sólidos

$$W_G = (W_w/W_s) * 100$$

Contenido de agua volumétrico (%):

Indica cuánta agua hay respecto al volumen total de la muestra.

$$W_v = (V_w/V_T) * 100$$

La variabilidad en el contenido de agua suelos, que regula la contracción, es principalmente el resultado de la fluctuación estacional de las precipitaciones/evaporación. Además, el contenido de agua del suelo se ve afectada por las exigencias transitorias de la vegetación y el potencial infiltración de la superficie del suelo. Todas estas influencias se rigen por el clima (Stirling *et al.*, 2015).

IV.4 Compresibilidad

Consolidación

La Teoría de Consolidación fue propuesta por Terzaghi (Terzaghi, 1948), y establece que el medio poroso a considerar debe estar completamente saturado y que las partículas sólidas y el agua son incompresibles. Terzaghi en su intento por ilustrar el comportamiento transitorio de consolidación del suelo propuso que el esfuerzo efectivo cuantifica el esfuerzo vertical que tiende a compactar la matriz porosa (Lo y Lee, 2015) y aumenta con la disminución de la relación de vacíos. También define el esfuerzo total σ_t y analiza la participación de la presión de poro durante todo el proceso de consolidación. En los sedimentos finos estos se adaptan en cada incremento como respuesta a un aumento de estado de esfuerzos.

La ecuación del esfuerzo efectivo de Terzaghi es: $\sigma_t = \sigma' + u$

Donde: σ_t = esfuerzo total

u = presión de poro

σ' = esfuerzo efectivo



Esfuerzo efectivo: Es la presión soportada por las partículas sólidas que conforman los sedimentos. Presión de poro: Es la parte de la presión total que soporta el agua de poro. En cualquier punto en un estrato o capa, el esfuerzo total es la suma de las presiones litostáticas e hidrostáticas que sobreyacen al punto.

Consolidación, es la reducción paulatina de vacíos en un suelo saturado provocado por el aumento de cargas, mediante la expulsión de agua intersticial que depende de su permeabilidad y como consecuencia tiene una reducción en su volumen vertical. Los materiales finos (arcillo-limosos) se generan esfuerzos de tensión tanto verticales como horizontales y ambos determinan sus condiciones de deformación. La consolidación del suelo es un fenómeno transitorio lento, lo que lleva a los asentamientos dependientes del tiempo (Lo and Lee, 2015). Generalmente las pruebas de consolidación se realizan en muestras inalteradas pero otros autores lo hacen correlacionando características de compresibilidad con propiedades índice (Sridharan and Nagaraj, 2000).

La relación entre la mineralogía de suelos arcillosos y el desplazamiento de agua durante el proceso de consolidación ha sido ampliamente discutida (Wesley, 2001; Saarenketo, 1998; Warren y Rudolph, 1997).

Consolidación primaria y secundaria

En las pruebas de consolidación hay dos etapas, la consolidación primaria y la secundaria. Ambas indican una forma de disipación de energía que se manifiesta como una reducción de volumen y como un flujo de agua de poro a esfuerzo efectivo constante. La consolidación primaria se manifiesta como un flujo de agua intersticial libre de fuerzas intergranulares (agua libre), que se dirige hacia el exterior de la muestra. Cuando toda el agua ha sido evacuada se dice que esta fase terminó, esta consolidación avanza con el tiempo. La consolidación secundaria, se manifiesta generalmente como el flujo lento del agua absorbida y de las partículas sólidas. La expulsión de agua absorbida durante la consolidación secundaria se ha adjudicado al reajuste de las partículas de arcilla debido al rompimiento de los enlaces iónicos entre cada partícula (Rogers, 1998).



Compresibilidad

El proceso de consolidación está relacionado directamente con la compresibilidad del material (Ohstubo *et al.*, 1983), ya que se utiliza para determinar las características de compresibilidad de los suelos. Por medio de los ensayos de consolidación se pueden obtener los datos para construir una curva de compresibilidad.

La compresibilidad depende de diversas características como granulometría, estructura, fabrica, historia geológica de cargas, materia orgánica entre otros (Lo y Lee, 2015).

La estructura del suelo es un estado de equilibrio cuando la muestra del suelo cargado está en estado elástico, cuando no está en estado de equilibrio existe stress efectivo (effective stress). Es aceptado que durante los primeros estados de carga la estructura del suelo se comporta como un cuerpo elástico-plástico.

La curva de compresibilidad permite observar la deformación que sufre una muestra de sedimentos cuando es sometida a diferentes esfuerzos. En ella el tramo elástico corresponde al tramo de recompresion y el plástico al tramo virgen de la curva .

El valor de la presión de pre-consolidación (P_c), que fue presentado por Casagrande (1926), P_c es la carga máxima de la muestra de suelo natural a la que ha estado sometida en su historia geológica aunque el efecto puede ser causado por envejecimiento (Crawford, 1986) y mecánicamente indica el punto de cedencia entre deformación elástica y plástica y de una muestra sometida a diferentes esfuerzos.

Coeficiente de compresibilidad (C_c): que indica la variación de los espacios ocupados por el agua o aire como respuesta a una carga aplicada.

Suelos consolidados y sobre-consolidados (*Over Consolidated Ratio, OCR*)

Los suelos se pueden clasificar según su historia de esfuerzos, un factor importante que determina sus características, así los suelos pueden ser consolidados o sobre-consolidados. Wesley (2009) propone que esta distinción sólo se puede hacer para los suelos sedimentarios, ya que por tener un estado no perturbado y el material es mas homogéneo, a diferencia de los residuales cuya composición es altamente heterogénea y el factor más importante es su mineralogía. Ya que los procesos de intemperismo que forman a estos suelos residuales forman particulares tipos de arcillas y estructuras, y su historia de estrés tienen poca relevancia.



En los suelos sedimentarios es bien conocida la influencia de la composición: aquí los minerales arcillosos formados son la caolinita, la cual relativamente es inerte y presenta baja contracción-expansión así como relativamente baja compresibilidad y las arcillas montmorilloníticas que tienen propiedades opuestas

El criterio para clasificar los sedimentos de acuerdo a la relación entre la carga de preconsolidación y su esfuerzo litostático actual (σ_v) es el siguiente (Das, 1997):

1.- Normalmente consolidado-consolidado

En donde el esfuerzo actual es el máximo de la historia geológica del sedimento.

2.- Preconsolidación-sobreconsolidado

En donde el esfuerzo actual es menor que algún esfuerzo del pasado geológico.

$$OCR = \sigma_p / \sigma_v$$



Capitulo V Metodología

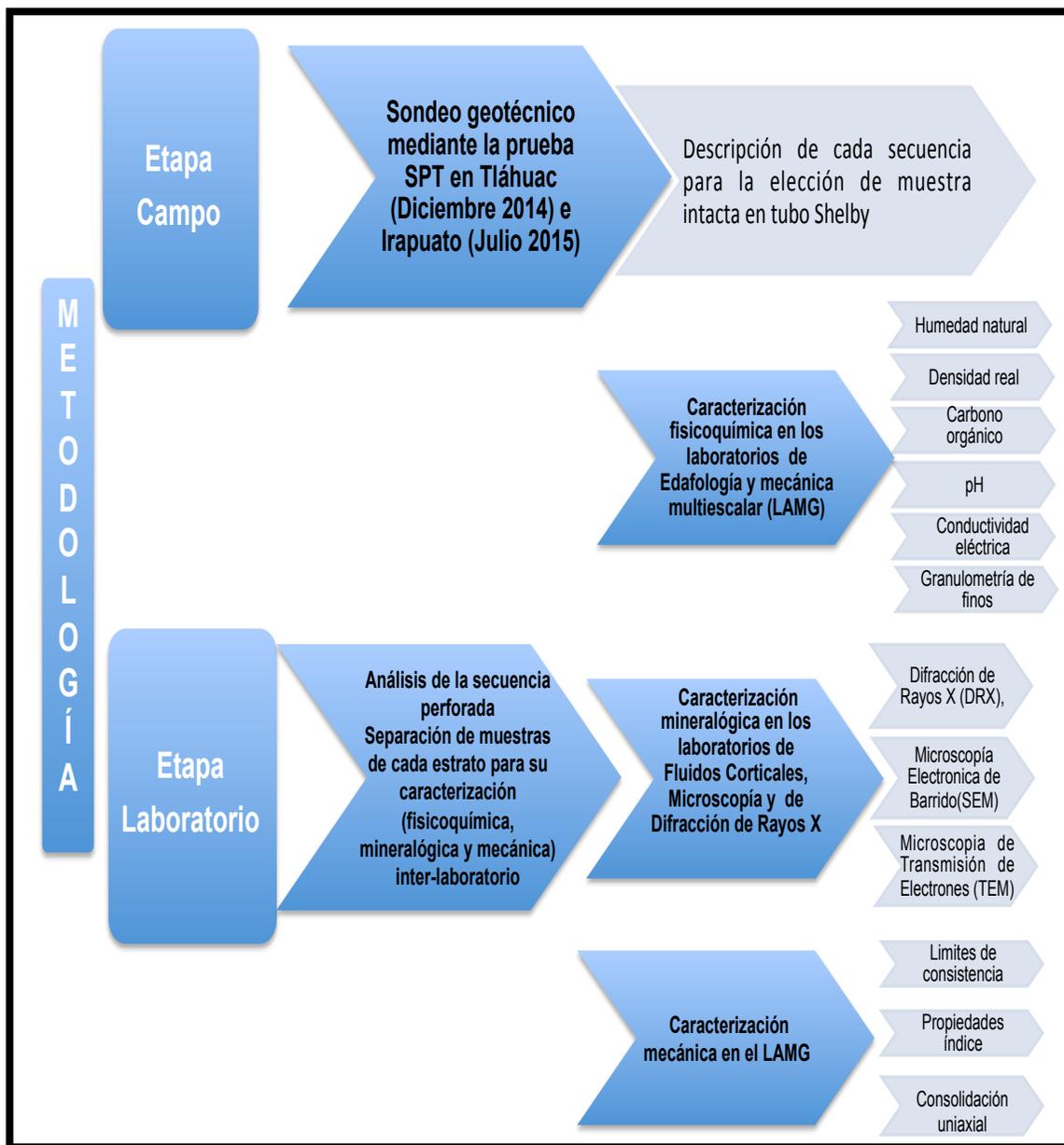


Figura 3. Diagrama donde se resumen las etapas de campo y laboratorio utilizadas en este trabajo.



Con el fin de resaltar la relevancia que tiene la caracterización de materiales granulares finos, se realizaron dos sondeos, para su caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica. Los sondeos se realizaron dentro de la FVTM en las Ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato (Ver Figura 4), cabe mencionar que cada sitio tiene diferentes condiciones de formación. A continuación se describe la metodología utilizada en: 1) campo y en 2) laboratorio, para la caracterización de los materiales (Ver Figura 3) :

Etapas de campo

- En cada sitio se realizó un sondeo geotécnico mixto con recuperación de muestra intacta. Los sondeos se realizaron mediante la prueba de Resistencia a la Penetración Estándar (SPT, por sus siglas en inglés Standard Penetration Test), que se realizó de acuerdo a la norma ASTM D1586 – 11. En las Figuras 5 y 6 se muestran fotografías de los sondeos geotécnicos mixtos en las Ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato.
- Posteriormente se realizó la descripción preliminar de la secuencia perforada, con el fin de seleccionar los principales horizontes para la recuperación de muestra intacta en tubo Shelby (recuperación de 0.90 m de longitud). La recuperación de muestra intacta se realizó en tubo Shelby de 4 pulgadas, que sirve como herramienta para el muestreo inalterado mediante el hincado de gatos hidráulicos.

Etapas de laboratorio

- Las muestras obtenidas de los sondeos geotécnicos se llevaron al laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG) del centro de Geociencias. En este laboratorio se reinterpretaron los horizontes descritos en campo utilizando la carta de color de suelos de Munsell (Munsell Color Company, 1975).
- Posteriormente se separaron las muestras para su caracterización inter-laboratorio que se llevó a cabo en diferentes centros de investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla. Para cada sitio la caracterización se realizó en cinco muestras a diferentes profundidades. La caracterización fisicoquímica se realizó en muestras **alteradas** (obtenida de la prueba SPT, Ver Figura 7), la caracterización mineralógica en muestras **alteradas e intactas** y la caracterización mecánica en muestras **intactas** (obtenida en tubo Shelby, Ver Figura 7).



- En el Capítulo V.1, se hace la propuesta metodológica para la caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica de materiales granulares en los sitios de estudio.
- Una vez analizadas las muestras se procedió a su interpretación.

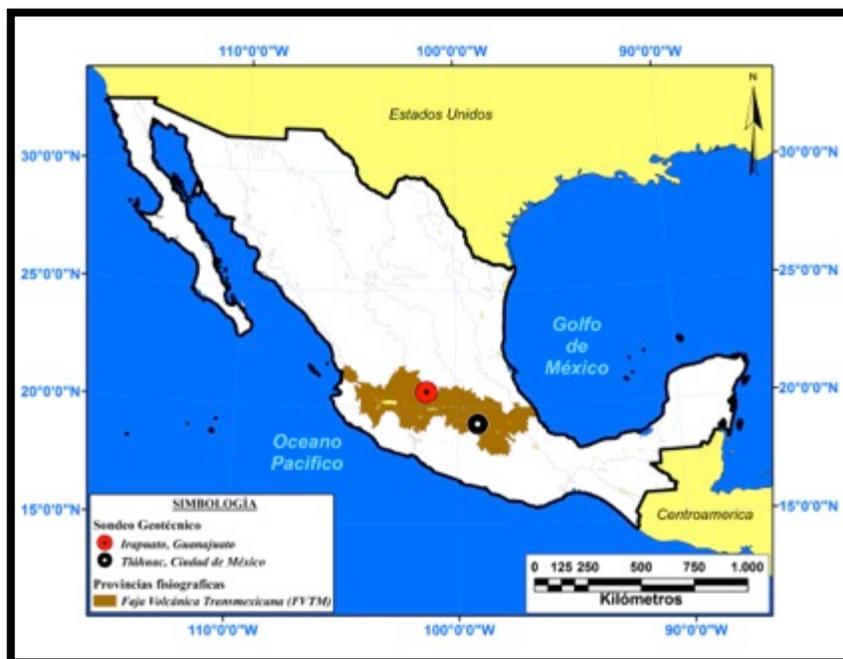


Figura 4. Ubicación de sondeos geotécnicos en las ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato, Gto., ubicadas dentro de la FVTM.



Figura 5. Sondeo geotécnico mixto con recuperación de muestra intacta (tubo Shelby) y de prueba de Resistencia a la Penetración Estándar (SPT) ó alterada, en la en la Ciudad de México (Tláhuac), realizado en Diciembre del 2014.



Figura 6. Sondeo geotécnico mixto con recuperación de muestra intacta y de la prueba de Resistencia a la Penetración Estándar (SPT) en la Ciudad de Irapuato, Guanajuato., realizado en Julio del 2015.



a)



b)

Figura 7. Características de muestras recuperadas: en a) Muestra alterada recuperada de la prueba SPT; b) Recuperación de muestra intacta en tubo Shelby.

V.1 Propuesta metodológica para la caracterización de materiales granulares

Como ya se mencionó para la caracterización inter-laboratorio de los materiales granulares de los sondeos geotécnicos realizados en las ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato se llevó a cabo en diferentes centros de investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla: Centro de Geociencias, Instituto de Neurobiología y Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada.



El Laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG) como el principal laboratorio de análisis donde se corroboraron los estratos descritos en campo. Se usó la carta de color de suelos de Munsell (Munsell Color Company, 1975), para la reinterpretación de los horizontes descritos y posteriormente se distribuyeron las muestras a los diferentes laboratorios para su análisis correspondiente en cada uno de estos. La Figura 8, muestra un diagrama donde se indican los análisis y pruebas que se realizaron en cada laboratorio.

Es importante mencionar que las muestras obtenidas de la prueba SPT son muestras **alteradas** y las muestras obtenidas en tubo Shelby son muestras **intactas**. En la Figura 7 se muestran imágenes de las muestras recuperadas alteradas (SPT) e intactas (tubo Shelby).

Para la caracterización de las diferentes propiedades de los sondeos geotécnicos se realizaron como se describe a continuación: muestra total alterada (**MTA**), que es la muestra representativa tomada de SPT; muestra total intacta que es la muestra tomada de Shelby (**MTI**); y muestra intacta en su fracción arcillosa que es la muestra tomada de Shelby separada en su fracción arcillosa (<math><2\mu\text{m}</math>) (**FAI**). Los análisis fisicoquímicos se realizaron en **MTA**, los análisis mineralógicos en **MTA** y **FAI** para la identificación de las fases minerales y los análisis mecánicos en **MTI**.

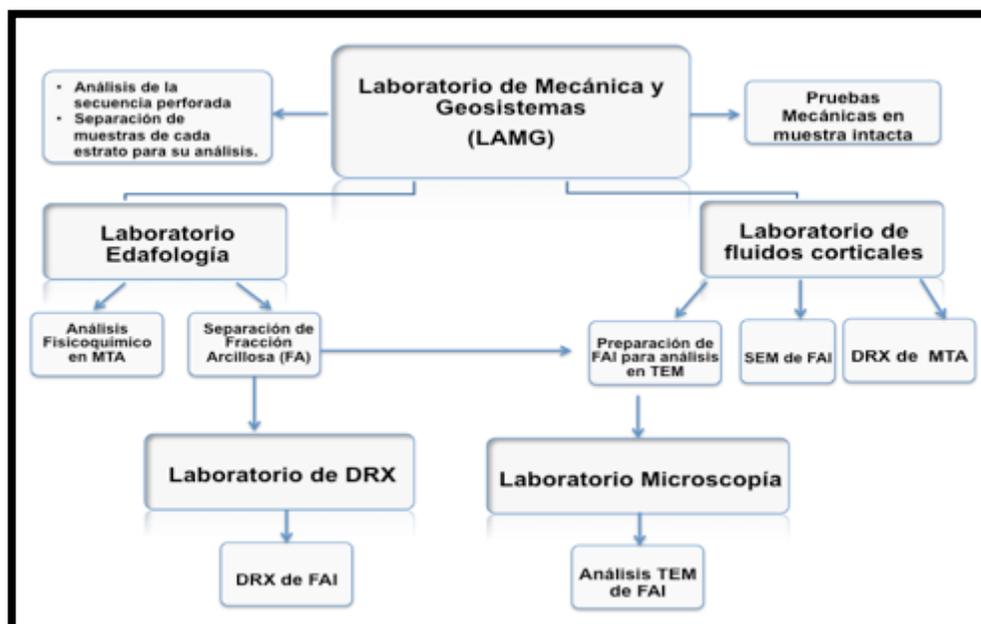


Figura 8. Diagrama donde se muestra el trabajo inter-laboratorio. El Laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG) como el principal laboratorio, en donde se corroboraron los horizontes descritos en campo y se separaron las muestras para posteriormente distribuir las en cada laboratorio para su análisis correspondiente.



La caracterización fisicoquímica en **MTA**, se analizó en los laboratorios de LAMG y de Edafología del Centro de Geociencias. Se determinaron los siguientes parámetros: humedad natural, densidad real, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, granulometría de finos (ver Figura 9). La separación y lavado de la fracción arcillosa se realizó en **FAI**.

- La distribución del tamaño de partícula fue determinado por hidrómetro y método de tamiz (ASTM D422-63, 1998b).
- Humedad natural (contenido de agua) según la ASTM D2216-92, 1998a.
- Conductividad eléctrica fue medida en una suspensión de suelo-agua 1:2.5 (USDA, 1996).
- pH se midió en una suspensión de agua-suelo 1:2.5 (Jackson, 1965).
- Densidad real fue determinada por el método del picnómetro (ASTM D854-92, 1998c)
- Materia orgánica se determinó por el método de Walker and Black (1947).
- Para la separación de la fracción arcillosa (FAI), previamente se removieron los carbonatos y materia orgánica, el sólido restante se separó por medio de decantación y se trató con cloruro de magnesio para su lavado. La fracción arcillosa fue depositada en un porta muestras de vidrio para su secado y orientación al azar.

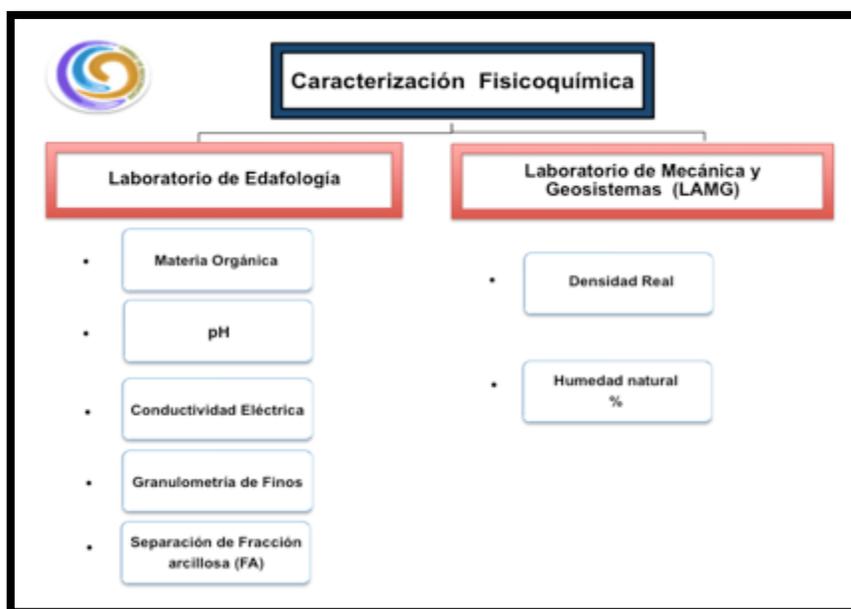


Figura 9. Diagrama de flujo de la caracterización fisicoquímica realizada en los laboratorios de Edafología y LAMG del Centro de Geociencias.



La caracterización mineralógica en **MTA** y **FAI**, se realizó en el laboratorio de fluidos corticales del Centro de Geociencias, el laboratorio de microscopía del Instituto de Neurobiología y en el laboratorio de difracción de rayos X del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada. En el laboratorio de fluidos corticales se realizó el análisis de la **MTA** por DRX y de **FAI** por SEM; en laboratorio de difracción de rayos X se analizó la **FAI** por DRX; finalmente en el laboratorio de microscopía se analizó la **FAI** por TEM (Ver Figura 10).

La importancia de la caracterización de los materiales por diferentes técnicas de análisis en **MTA** es para conocer las fases minerales del total de la muestra y en **FAI** es debido a que el comportamiento de los minerales de arcilla tiene una relación directa con su comportamiento mecánico. Los minerales de arcilla laminares poseen un orden de largo alcance por lo que se pueden observar en difracción de rayos X (DRX), que permite identificar el tipo de arcilla, mientras que la microscopía electrónica de barrido (SEM) nos brinda información sobre su morfología. Los minerales de origen volcánico que son del tamaño de arcilla no son laminares, por ejemplo el alófono (morfología esfeoride), y no se puede identificar en DRX debido a que sólo poseen orden corto alcance, aunque estudios en alófono sintético mencionan que presenta picos anchos en 26.5 y $39.5^\circ 2\theta$. En SEM su morfología no se alcanza a distinguir claramente pero si en microscopía electrónica de transmisión (TEM).

A continuación se describen las técnicas de laboratorio que fueron utilizadas en este trabajo para la identificación de las fases minerales en **MTA** y **FAI**.

Difracción de Rayos X

Los análisis de DRX se realizaron en **MTA** de cada horizonte en las secuencias estudiadas, para la identificación de las fases minerales en toda la muestra. Las muestras se secaron al aire libre y se pasaron por la malla # 100.

Las muestras fueron medidas usando el método de polvos (Moore and Reynolds Jr., 1989) en un equipo Miniflex de Rigaku con radiación de cobre $K\alpha$ 1.5406 \AA , en un intervalo de 2° a 80° en 2θ a un paso de 0.02° , a una velocidad de 2° por minuto.

Como ya se explicó la separación de la fracción arcillosa de la muestra intacta (**FAI**), se realizó con el fin de identificar a los minerales del tamaño de arcillas. Las muestras **FAI** se analizaron en un difractómetro de rayos X marca Rigaku modelo Ultima IV, con un detector de alta velocidad D/teX-ULTRA, en un intervalo de 5 a 80° en 2θ con un tiempo



de conteo de 0.02 segundos por punto, y velocidad de 10° por minuto y una incertidumbre de medición de ± 0.017 grados.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS) de FAI.

Para el análisis de la morfología, importante porque cada mineral tiene características particulares, la **FAI** en forma de polvo se dispersó sobre cinta de carbono y se observó en un equipo marca Hitachi-TM1000, operado a un voltaje de 15 kV. Las microfotografías se obtuvieron con un detector de electrones retrodispersados. La composición elemental se obtuvo con un microanalizador de EDS Oxford acoplado al microscopio, el tiempo de conteo fue de 60 s por espectro.

Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) de FAI.

La **FAI** fue dispersada en etanol con ayuda de ultrasonido. El análisis se realizó en un equipo de la marca JEOL, modelo JEM-1010, a un voltaje de aceleración de 80 kV.

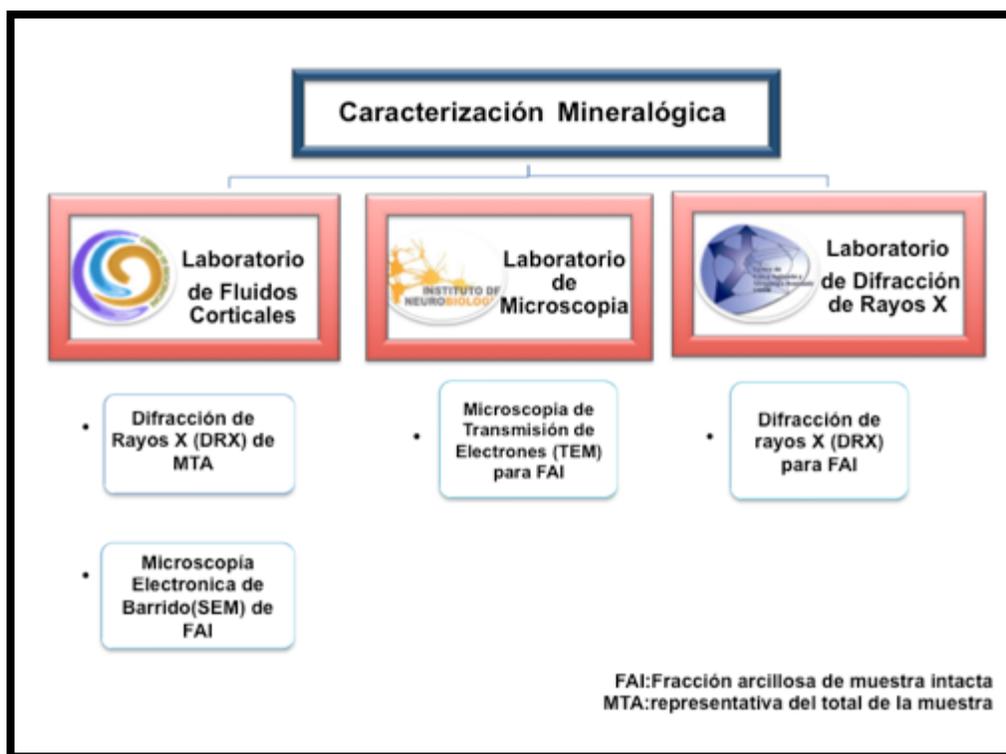


Figura 10. Diagrama donde se muestran los diferentes análisis realizados para la caracterización mineralógica en cada uno de los laboratorios correspondientes.



La caracterización mecánica se llevó a cabo en el LAMG, donde se determinaron para las muestras totales intactas (**MTI**): Límites de consistencia o de Atterberg, propiedades índice y compresibilidad (ver Figura 11).

- Límites de consistencia se realizaron según la norma ASTM D4318-95a, 98, que indica que el material en estado humedo no necesita ninguna especificacion para su análisis pero en estado seco se debe dejar secar al aire libre y se re-humedece para su análisis.
- Las propiedades índice se calcularon con datos obtenidos de un cilindro con dimensiones de 2.5 cm de alto donde la muestra se deajo secar hasta peso constante parao obtener los datos correspondientes para el cálculo de: porosidad (n), relación de vacíos (e), agua volumétrica (Wv) y humedad natural.
- Para el realización de las curvas de compresibilidad se realizó la prueba de consolidación uniaxial según la norma ASTM D2435-96, 1998.

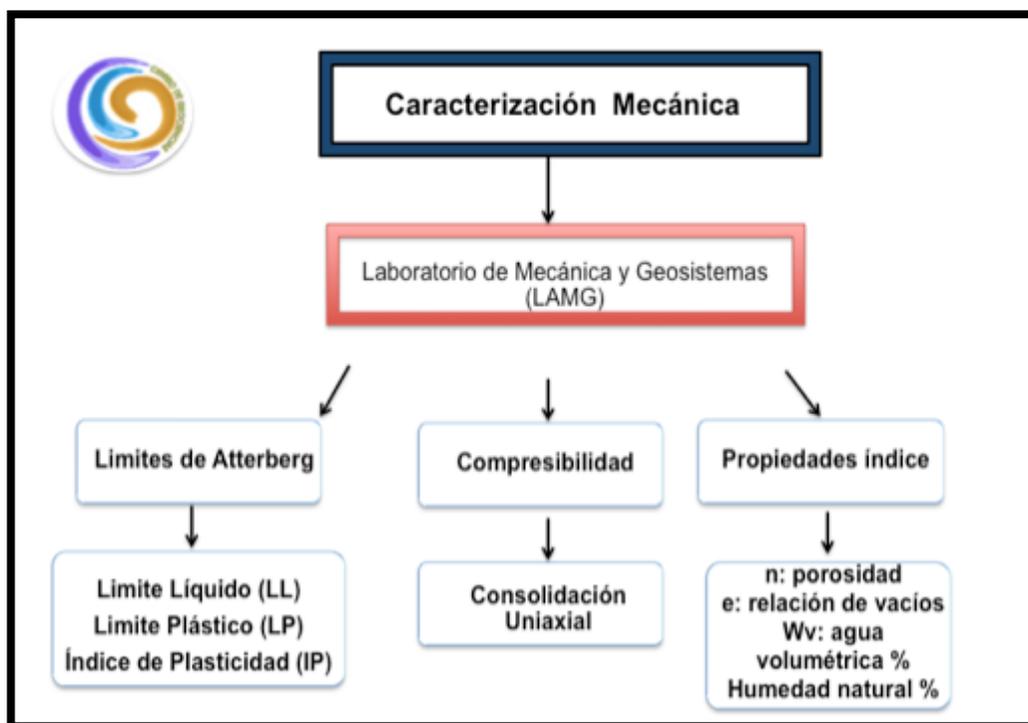


Figura 11. Diagrama que muestra los diferentes análisis para la caracterización mecánica realizados en el LAMG.



Capítulo VI Geología y localización de los sitios de estudio

VI.1 Sitio Tláhuac

El sitio de estudio se localiza hacia el sector sureste de la Ciudad de México, dentro de la Delegación Tláhuac, Figura 12, el círculo negro indica la ubicación del sondeo geotécnico de 30 m de profundidad. El sondeo geotécnico se realizó en colaboración con el personal técnico del Centro de Evaluación de Riesgo Geológico de la ciudad de México (CERG).

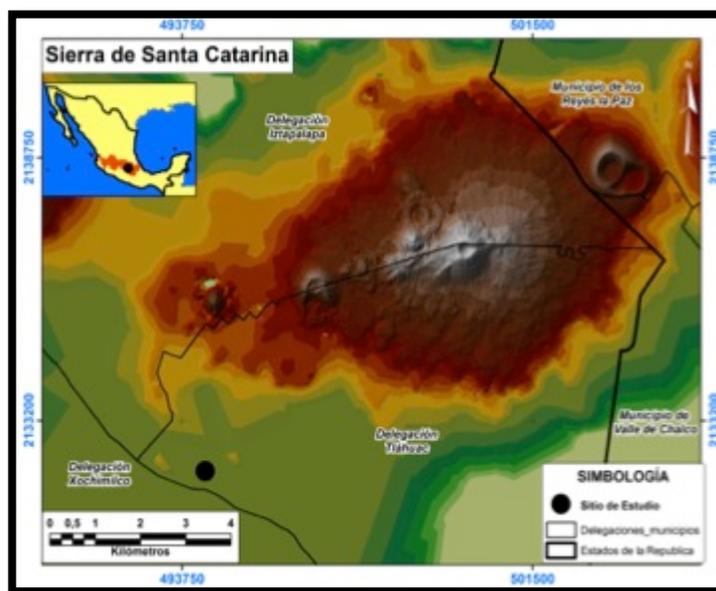


Figura 12. Localización de sondeo geotécnico en realizado en la Ciudad de México (Tláhuac).

Contexto geológico

La Cuenca de México en donde se encuentra la Ciudad de México tiene una superficie de 9,600 km², predominantemente es una planicie lacustre con altura promedio de 2,250 mns. La cuenca estaba abierta hace aproximadamente 600,000 años cuando fue cerrada como consecuencia de la actividad volcánica durante el Cuaternario (Mooser, 1990 en Díaz *et al.*, 1998).

La alteración de rocas, arcillas residuales, materiales piroclásticos, gravas y arenas, muestran la desintegración de productos de las rocas andesíticas de las colinas que fueron erosionadas gradualmente y los elementos más finos fueron transportados hacia la planicie lacustre. Otros elementos de los sedimentos del lago de grano fino son los productos de ceniza volcánica fino y ultrafino. Las erupciones volcánicas fueron acompañadas por explosiones de vapor que forman densas nubes que contienen ceniza volcánica fina y otros materiales piroclásticos que se depositaron como la lluvia sobre la



superficie del lago (Zeevaert 1983 en Díaz *et al.*, 1998). Parte de la ceniza volcánica fina recristalizó en minerales de arcilla. Este sedimento contiene una gran cantidad de restos de ostrácodos y diatomeas, este último da una estructura porosa del suelo y una alta relación de vacíos.

En la Delegación Tláhuac gran parte de su superficie se encuentra asentada sobre la planicie lacustre del lago de Xochimilco-Chalco, mientras que otra parte está conformada por una serie de elevaciones que corresponden con estructuras volcánicas de origen monogénético, hacia la parte norte por la Sierra de Santa Catarina y hacia el sur por estructuras pertenecientes a la formación Chichinautzin. Los productos emitidos de estas estructuras (depósitos volcánicos: lavas y piroclastos) y su inter-digitación con sedimentos lacustres (limos y arcillas) conforman gran parte del subsuelo.

La Sierra de Santa Catarina se encuentra constituida por 11 unidades volcánicas propuestas por Magaña (2003), cada una de estas unidades están asociadas tanto al aparato volcánico principal como a sus respectivos depósitos volcánicos, la unidad más antigua es la *Caldera, Yuhualixqui, Mazatepec 1 y 2, Tetecón 1 y 2, Coronillas, Tecuatzin, Guadalupe y Acahuatepec* (ver Figura 13).

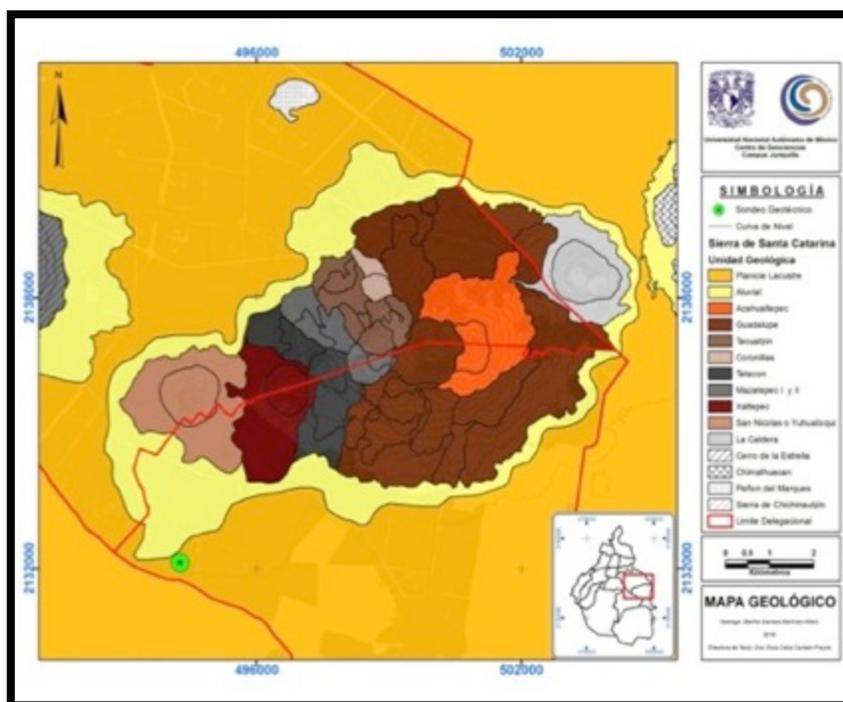


Figura 13. Geología del sitio de estudio en la Ciudad de México (Tláhuac), el círculo verde, muestra la ubicación del sondeo geotécnico realizado (CERG, 2012).



VI.2 Sitio Irapuato

El sitio de estudio se localiza en el centro de la ciudad de Irapuato, Guanajuato, Figura 14, el círculo negro indica la ubicación del sondeo geotécnico de 20.40 m de profundidad.

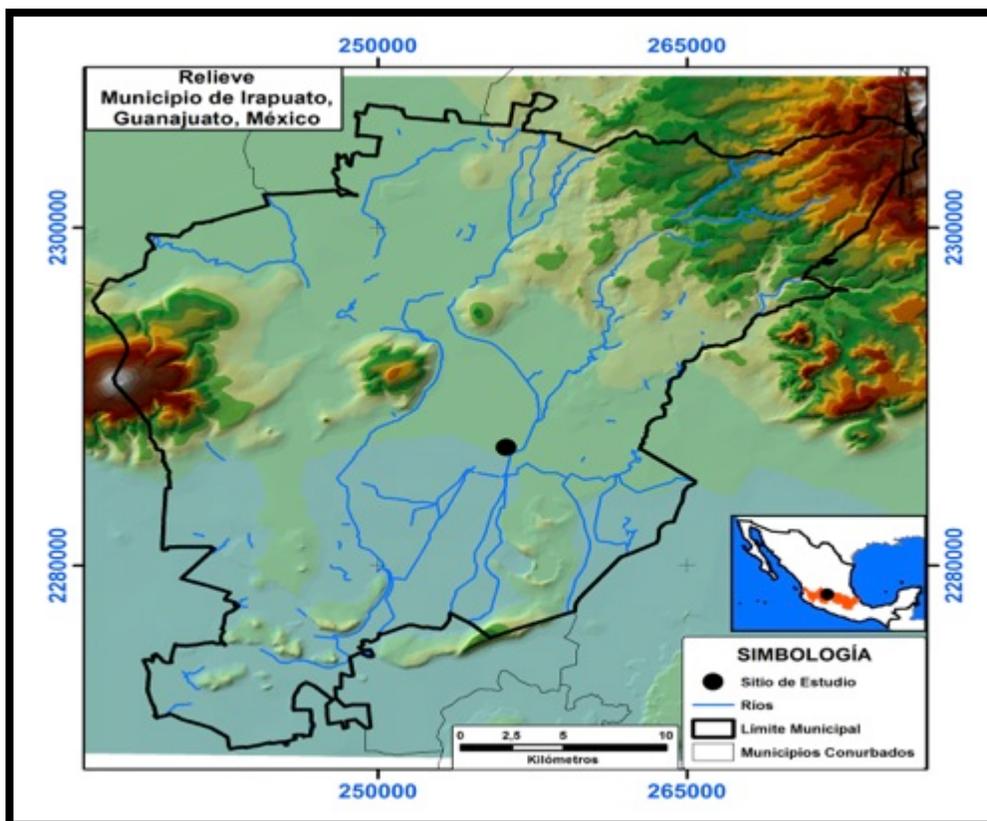


Figura 14. Localización sondeo geotécnico en la ciudad de Irapuato, Guanajuato.

Contexto geológico

El mioceno tardío en la región de Irapuato está representado por emisiones volcánicas de composición intermedia a básica ubicadas hacia el norte del campo volcánico de Michoacán Guanajuato, en el límite entre la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre Occidental (Cerca et al., 2000). La sub-provincia del Bajío Guanajuatense se caracteriza por Cadenas montañosas, mesetas y valles, las cuales se encuentran sobre depresiones llenas de sedimentos finos y aluviones.

Existen dos principales conjuntos litológicos:

- 1.-Un afloramiento complejo plutónico Mesozoico y meta-sedimentario a lo largo de a la Cuenca de Guanajuato que formó el basamento hidrogeológico (Carreón-Freyre et al., 2005.)



2.- Un dominio de la roca volcánica y sedimentos del Terciario Medio al Cuaternario. Estructuras terciarias están representadas por la falla del Bajío con orientación NW-SE (Martínez et. Al., 2005);(ver Figura 15).

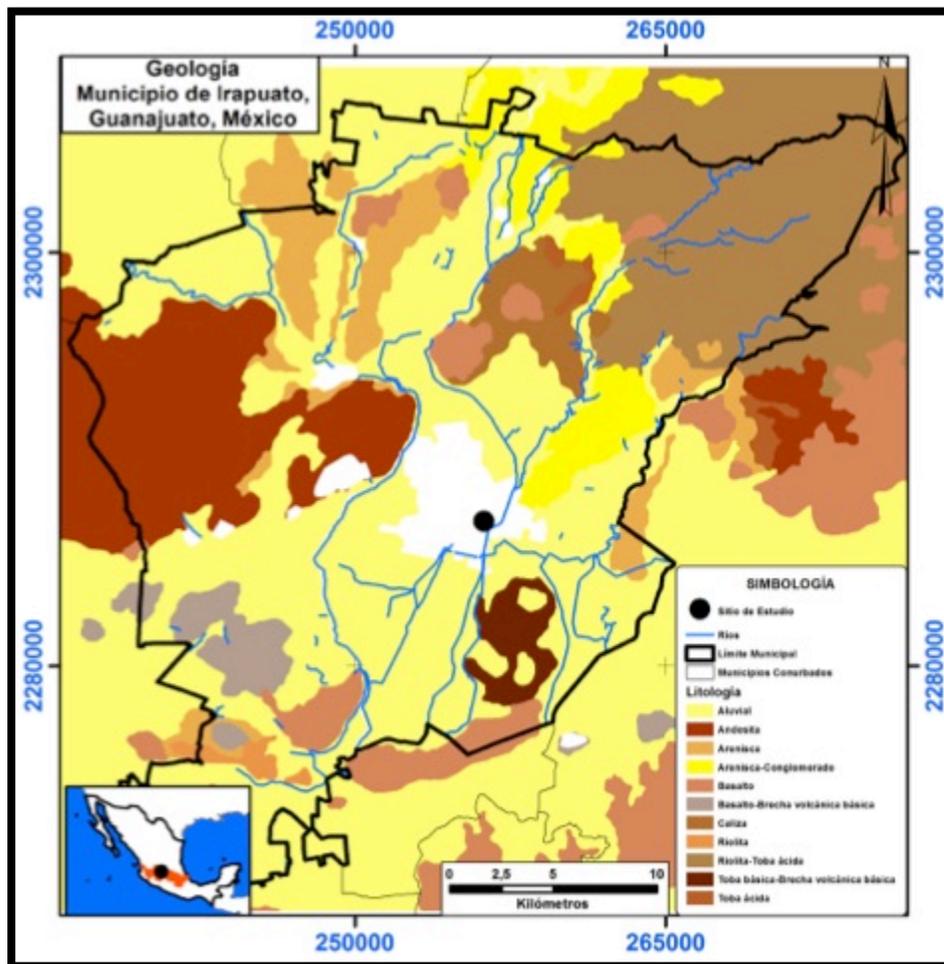


Figura 15. Geología de la Ciudad de Irapuato, Guanajuato (tomado de Rodríguez-Castillo y Schroeder-Aguirre, 2010).



Capítulo VII Resultados

VII.1 Descripción de perfiles en las Ciudades de México (Tláhuac) e Irapuato

VII.1.1 Descripción del perfil Tláhuac

Se analizó una secuencia de 30 metros de profundidad recuperada con un sondeo geotécnico mixto con recuperación continua de muestra alterada (prueba SPT) e intacta con tubo Shelby (ver Figura 16). Se recuperaron 10 tubos de muestra intacta pero algunas muestras no se pudieron caracterizar debido a que el material se encontraba muy fracturado y en algunos casos no se recuperó la muestra al 100%, ver Figura 17. En esta secuencia se caracterizaron físicoquímica, mineralógica y mecánicamente cinco muestras (MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31).

La descripción del perfil se basó en las variaciones de la granulometría que se muestran en la Figura 20. En la Figura 18, se presenta el perfil que muestra el número de golpes al realizar la prueba (SPT), en este sondeo la variación a lo largo de la secuencia fue de 1 a 20 golpes y, en algunos tramos, no se necesitó ningún golpe, solo el peso de la herramienta por lo que se puede asumir que son materiales de baja resistencia. En la Tabla 1 se presentan los valores correspondientes a la resistencia dependiendo de su consistencia y el número de golpes (N). A continuación se hace una descripción general de la secuencia relacionando el número de golpes: los primeros 60 cm comienzan con una resistencia de 14 golpes, por lo que se considera el contenido de arenas; la secuencia continúa hasta 13.80 m, con variaciones de 2 a 7 golpes; de 13.80 a 21.60 m, solo con el peso de la herramienta, por lo que estos materiales se consideran de baja resistencia asociados a contenido de material arcilloso-limoso. De 21.60 a 27 m se con variaciones de 1 a 12 golpes, la secuencia finaliza a 30 m con variaciones de 10 a 20 golpes, el aumento en el número de golpes indica que son materiales de mayor resistencia, asociados al incremento en el contenido de arenas.

En el perfil también se presenta la humedad natural (%), se observan variaciones a lo largo de la secuencia con valores entre 135-430 %. El nivel freático (NF) se encontró a 1.8 metros por debajo de la superficie. La secuencia presenta materiales limo-arenosos y limo arcillosos. Los rangos de variación de las propiedades físicoquímicas que se analizaron a lo largo de la secuencia fueron: carbono orgánico, que varía de 1 y 6.5%; densidad real,



de 2.1 a 2.5 gr/cm³; pH alcalino que varía de 8.8 a 10.7; y conductividad eléctrica que varía de 800 a 3400 dS/m.

La secuencia estudiada en Tláhuac muestra la historia reciente de deposición lacustre en el sitio de estudio, las fluctuaciones en los niveles de energía de deposición se reflejan en los incrementos del contenido de material limo-arcilloso y arena sucesivamente. Las variaciones en el contenido de materia orgánica indican cambios importantes en el clima, las sequías se asocian al aumento en la materia orgánica (Campos *et al.*, 2001; Parfitt, 1980; Shoji *et al.*, 1993).

La secuencia se describió de arriba hacia abajo y se dividió en cinco unidades principales que varían en profundidad: unidad uno (**T1**) de 0 a 6.0 m; unidad dos (**T2**) de 6.0 a 11.40 m; unidad tres (**T3**) de 11.40 a 16.80 m; unidad cuatro (**T4**) de 16.80 a 21 m; y unidad cinco (**T5**) de 21 a 30 m.

La unidad **T1** (0 a 6 m), que se compone de tres horizontes, (T1-H1) constituido de materiales arcillo-limosos con cantidades variables de arena fina que aumenta hacia la base y corresponde a una secuencia lacustre reciente con un horizonte orgánico en la superficie; subyacente por material arcilloso café-rojizo (T1-H2) asociado a descenso del nivel del agua (condiciones de oxidación); localizado sobre una secuencia arcillosa de color verde olivo; (T1-H3) que se asocia a un mayor nivel de agua en el lago (condiciones reductoras) y presenta contenidos de agua de 84 a 100 %, contenido de carbono orgánico de 1.45 %, conductividad eléctrica de 799 dS/m y un pH alcalino, de 8.89.

La unidad **T2** (6 a 11.40 m), corresponde a una secuencia con mayor contenido de materiales areno-limosos probablemente ocasionado por una deposición fluvial o un cambio en el nivel de energía de la cuenca. Esta unidad se compone de dos horizontes, el primero color verde seco (T2-H4) presenta un contenido de agua de 236 %, carbono orgánico de 1.95 %, conductividad eléctrica de 1777 dS/m y pH alcalino de 9.16; el segundo horizonte corresponde a material color café claro (T2-H5) asociado a condiciones de oxidación y presenta contenidos de agua que varían de 352 a 333 %, conductividad eléctrica de 1624 dS/m y un pH alcalino de 9.16.

La unidad **T3** (11.40 a 16.80 m), está constituida por cuatro horizontes limo-arcillosos con aproximadamente 20 % de arenas. El primero (**T3-H6**) de 11.40 a 12.23 m, de color verde olivo con pequeños lentes de color rojizo. Este horizonte muestra de manera general condiciones reductoras y tiene un contenido de agua de 187 %, carbono orgánico de 2.15 %, conductividad eléctrica de 1472 dS/m y pH de 9.76; el segundo (T3-H7) de 12.23 a



13.80 m, de color verde seco presenta dos lentes de ceniza uno de 17 cm de espesor a 12.40 m de profundidad y otro de 2 cm de espesor a 13.80 m de profundidad que se pueden asociar a dos pulsos volcánicos (deposición de piroclastos), este horizonte muestra contenido de agua de 249 %, carbono orgánico de 4.07 %, conductividad eléctrica de 1472 y un pH de 9.76. De 13.80 a 15.60 m de profundidad la unidad continua con un tercer horizonte café claro (T3-H8) de condiciones oxidantes, esta unidad termina con un cuarto horizonte café oscuro a los 16.80 m (T3-H9). Los horizontes T3-H8 y T3-H9 tienen contenidos de agua de 334 %, conductividad eléctrica de 3425 dS/m y un pH alcalino, de a 10.61. En esta secuencia se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y mecánicas de la muestra **MA-T3-H6-12**, el identificador de la muestra indica el nombre de la muestra (MA), la unidad a la que corresponde (T3), el horizonte (H6) y la profundidad a la que se ubica (12), que indica 12 m de profundidad, ya que algunas muestras se encuentran dentro de un mismo horizonte. Como ya se mencionó, ésta muestra se asocia a condiciones reductoras en el lago.

La unidad **T4** (16.80 a 21 m), presenta materiales limo-arcillosos con menos del 10 % de arena de color verde oscuro (**T4-H10**) con condiciones reductoras, a los 18 m presenta oxidación con 60 cm de espesor, seguido de un pequeño lente de ceniza no mayor a 3 cm. Muestra contenidos de agua que varían entre 290 a 130 %, carbono orgánico de 4.58% a 17 m, 3.99% a 17.82 m y 095% a 17.90 m; conductividad eléctrica de 1563 dS/m, y en el tramo que presenta oxidación de 2598; ph alcalino 9.96 y en el tramo que presenta oxidación de 10.19; densidad real de 2.05 a 2.57 gr/cm³. En esta secuencia se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y mecánicas de la muestra **MB-T4-H10-17**. Los resultados anteriores explican que hubo variaciones fisicoquímicas en el lago.

La unidad **T5** (21 a 30 m), presenta materiales limo-arcillosos con aproximadamente 20 % de arenas, con fluctuaciones en la energía de transporte a los 22.50 y 29 m, ya que el aumento de arenas aumenta hasta en un 60 y 30 % respectivamente. Esta unidad se compone de seis horizontes, el primero (**T5-H11**) color café rojizo que presentan con intercalaciones de color verde olivo de los 21 a 23.40 m, muestra contenidos de agua de 260 % a 22.50 m, 307 % a 23 m y 199 a 23.30 m; carbono orgánico a 22.50 m de 3.29 %, a 23 m de 6.45 %, a 23.30 m de 2.84 %; conductividad eléctrica de 3473 dS/m; pH de 10.5; densidad real de 2.23 gr/cm³ a 22.50 m, 2.05 gr/cm³ a 23 m y 2.22 gr/cm³ a 23.30 m. El segundo horizonte de color café oscuro de 23.40 a 24.60 m (T5-H12), continuando



con un tercer horizonte color verde seco de 24.60 a 25.20 m (T5-H13), este horizonte presenta conductividad eléctrica de 3513 dS/m y pH 10.7. La secuencia continúa con un cuarto horizonte color café rojizo hasta los 27 m (T5-H14), que presenta conductividad eléctrica de 2824 dS/m y pH 9.98, subyacente por un quinto horizonte café (T5-H15) hasta los 29 m, con conductividad eléctrica de 2824 dS/m y pH de 9.98. La secuencia termina con un sexto horizonte color verde seco (T5-H16) a los 30 m, este horizonte presenta carbono orgánico de 2.29 %, densidad real de 2.28 gr/cm³, conductividad eléctrica de 1459 dS/m y un pH de 9.89. En esta secuencia se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas, mineralógicas y mecánicas de las muestras **MC-T5-H11-22.55; MD-T5-H11-22.85; ME-T5-H11-23.31**. Como ya se mencionó estas muestras se asocian a condiciones REDOX en el lago, que se observan en los cambios de color presentados colores verdosos a rojizos, y que se ve reflejado en la caracterización fisicoquímica.



Figura 16. Fotografías de la recuperación de muestra alterada (SPT) en Tláhuac a distinta profundidad: (a) 17.40 m, (b) 22.60 m.

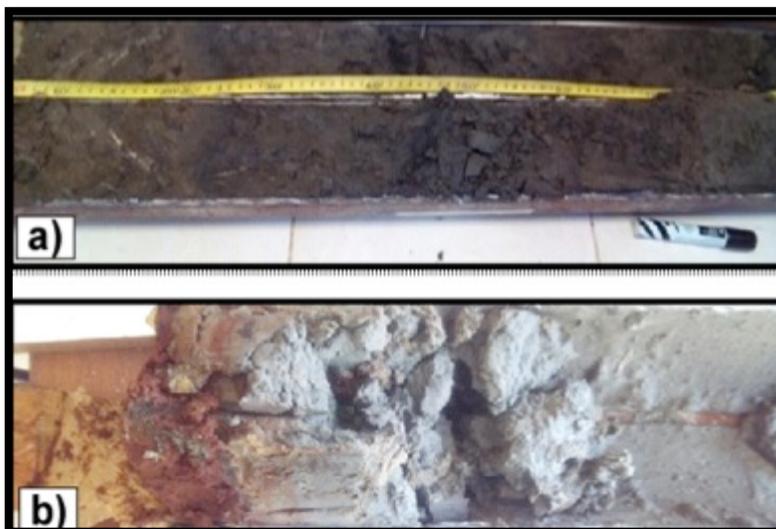


Figura 17. Fotografías de material recuperado de tubo Shelby en Tláhuac a distinta profundidad (a) de 5.5 a 6.4 m, se observa material fracturado; (b) Fotografía de 29.10 a 30 m, se puede observar que la recuperación no fue del 100% debido a que el material se encontraba fracturado.



Tabla 1. Se presentan valores correspondientes a la resistencia en materiales arcillosos dependiendo de su consistencia y numero de golpes (N), por la prueba SPT (Terzaghi y Peck, 1948 en Juárez y Rico 2005).

Consistencia	No de golpes(N)	Resistencia (qu) kg/cm2
Muy blanda	< 2	<0.25
Blanda	2 a 4	0.25-0.50
Media	4 a 8	0.50-1.0
Firme	8 a 15	1.0-2.0
Muy firme	15-30	2.0-4.0
Dura	> 30	> 4.0

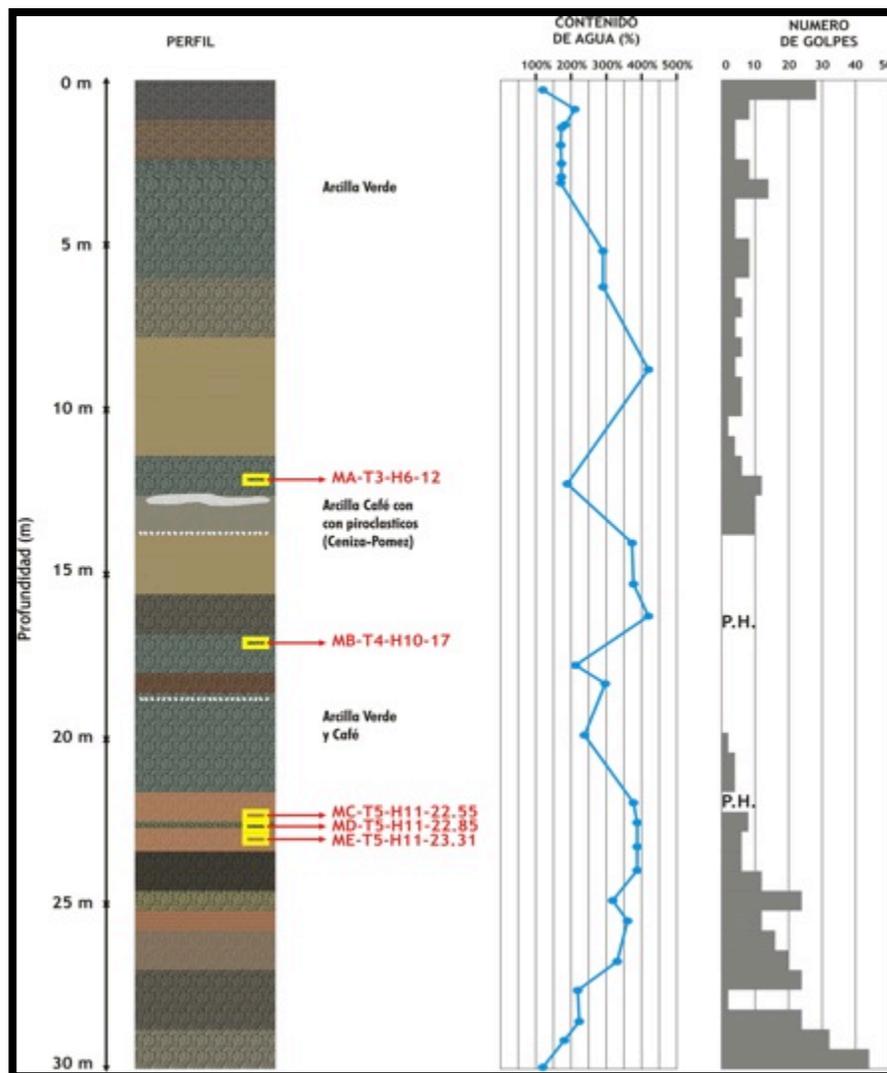


Figura 18. Perfil del sondeo geotécnico realizado en la Tláhuac. Se muestra la variación de la humedad de 135 a 430 % con la profundidad y el número de golpes de hincado. P.H: hincado por peso propio de la herramienta; NF: nivel freático, encontrado a 1.80 m. Los cuadros en amarillo indican la ubicación de las muestras analizadas en este sondeo: MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31.



VII.1.2 Descripción del perfil Irapuato

Se estudió una secuencia de 20.4 metros de profundidad realizada mediante la prueba SPT y se recuperaron 12 tubos de muestra intacta para su análisis en laboratorio. En esta secuencia se caracterizaron fisicoquímica, mineralógica y mecánicamente cinco muestras

(MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80).

La descripción del perfil se basó en las variaciones de la granulometría, presenta materiales arcillo-limosos y areno-limosos en su mayoría (ver Figura 21). En la Figura 19, se muestra el perfil donde se muestran las variaciones de contenido de agua (%) entre 10 a 40 %. El nivel de agua freático (NF) no se encontró a la profundidad perforada por lo que no se indica. El número de golpes al realizar la prueba (SPT) es de 10 hasta 50, por lo que se consideran materiales de mayor resistencia (asociados al incremento de arenas), comparado con el sondeo realizado en Tláhuac. El número de golpes al inicio de la secuencia hasta aproximadamente 3 m presentó una variación de 10 a 18 golpes aumentando a 5.40 m hasta 25 golpes. De 5.40 a 16.25 m tiene variaciones de 35 a 50 golpes teniendo una disminución de 8.35 a 8.80 m de 15 golpes. De 16.25 a 17.03 m disminuye de 35 a 40 golpes. En la Tabla 1 se presentan los valores correspondientes a la resistencia dependiendo de su consistencia y número de golpes (N).

Las propiedades fisicoquímicas analizadas a lo largo de la secuencia son: carbono orgánico que varía de 0 a 0.98%; densidad real de 2.21 a 2.54 gr/cm³; pH alcalino que varía de 7.7 a 8.5; y conductividad eléctrica de 870 a 2900 dS/m.

El sitio donde se realizó el sondeo geotécnico es una zona de descarga principal de dos efluentes, por lo que la secuencia corresponde a distintas descargas de depósitos fluviales, debido a ello la secuencia se describió de abajo hacia arriba. Se identificaron tres principales ciclos de deposición asociados a variaciones de energía, con depósito de los materiales más gruesos en la base cuando la energía de transporte es mayor y disminución de tamaño de grano hacia la parte superior del depósito.

El primer ciclo está representado principalmente por 2 unidades: La primera unidad (**Ir1**) de 20.40 a 17.03 m, depósito de material con una matriz areno arcillosa color café claro y gran cantidad de clastos tamaño guijo (5-6 cm), que presentan una forma subangular a angular. Dichas características podrían estar relacionadas al depósito por un cambio de media a alta energía. La segunda unidad (**Ir2**) de 17.03 a 12.65 m, está representada por material limo-arcilloso de color café con sectores que presentan mayor cantidad de arcilla



(negra). Destaca el tramo de 17.03 a 16.25 m con fragmentos de roca de aproximadamente 2.5 cm y de 13.40 a 13.20 m, el material cambia a una coloración verdosa lo que podría ser el resultado de un cambio en las condiciones químicas del ambiente. En esta secuencia se caracterizaron las propiedades mecánicas y mineralógicas de las muestras **MJ-Ir2-16.80** y **MI-Ir2-15.60**. Lo anterior corresponde a un ciclo natural de un ambiente fluvial hacia la llanura de inundación, esto se explica por el tamaño de grano encontrado en esta unidad.

El segundo ciclo está representado por la tercera unidad (**Ir3**) de 12.65 m a 3.0, se observa una gradación normal, que al inicio de tramo presenta materiales areno-limosos que gradan hasta limo arcillosos. De 12.65 a 10.90 m, materiales areno-limosos con fragmentos de arrastre presenta colores café a rojizos lo que puede indicar cambios químicos de oxidación. De 10.90 a 8.80 m, los materiales siguen siendo areno-limosos pero los cambios en la coloración indican cambios químicos puntuales de reducción ya que los colores cambian de café (10.90 a 10.68 m) a verde (10.68 a 10.23 m) y café (10.23 a 8.80 m). La secuencia continua presentando una disminución de energía puntual de 8.80 a 8.35 m, ya que la cantidad de materiales limo-arcillosos aumenta hasta en un 70 % y disminuyendo la cantidad de arena. De 8.35 a 6.60 m, material de color café, aumenta el contenido de arenas hasta en un 50 % por consiguiente la disminución de los materiales limo-arcillosos. De 6.60 a 5.40 aumenta hasta un 65 % la cantidad de arena. De 5.40 a 3 m se observan intercalaciones de materiales limo-arcillosos y areno-limosos, de 4.20 a 5.08 m destaca arcilla-limosa de color negro con alto grado de compactación. En esta secuencia se caracterizaron las propiedades mecánicas de las muestras: **MH-Ir3-10.85**, **MG-Ir3-8.60** y **MF-Ir3-7.07**. Como se menciona lo anterior podría ser el resultado del decremento en la energía del ambiente fluvial (iniciando de la base) ya que se observa una gradación normal, además de esta asociado a condiciones REDOX (oxido-reducción).

El tercer ciclo fluvial presenta alta energía en el depósito, aquí se define la cuarta unidad (**Ir4**) que comienza de 3 a 1.62 m, con materiales areno-limosos. La secuencia termina con material de relleno antropogénico.

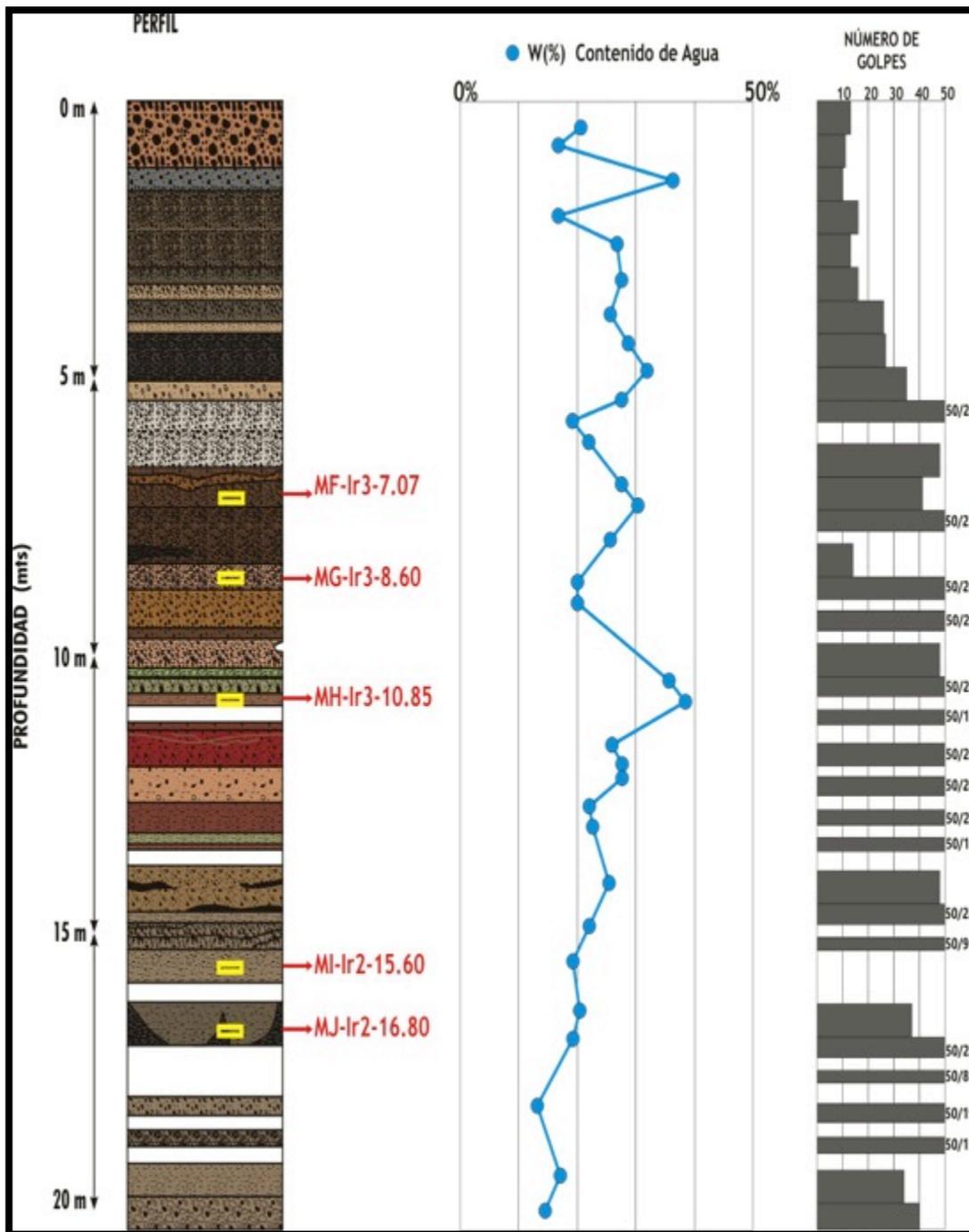


Figura 19. Perfil del sondeo geotécnico realizado en Irapuato. Se muestra la variación de la humedad de 10 a 36 % con la profundidad; el número de golpes de hincado y el nivel freático no se encontró a la profundidad del sondeo. Los cuadros en amarillos indican la ubicación de las muestras analizadas: MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80.



VII.2 Caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica de los materiales granulares de la Ciudad de México (Tláhuac) e Irapuato

VII.2.1 Caracterización fisicoquímica

VII.2.1.1 Sitio Tláhuac

En la Tabla 2, se presentan las propiedades fisicoquímicas en **MTA** de la profundidad correspondiente de cada una de las cinco muestras analizadas en la secuencia perforada (MA-T3-H6-12 MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31). Los resultados en estas muestras presentan humedad natural que varía entre 187 a 290%; una granulometría con tendencias de limo-arenosas, areno-limosas y limo-arcillosas; el carbono orgánico con variación de entre 2.15 a 4.58 %, pH alcalino de 9.66 a 10.5, conductividad eléctrica de 1470 a 3470 dS/m y densidad real entre 2.05 a 2.27 g/cm³.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de las muestras MA-T3-H6-12 MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31, del sondeo realizado en la ciudad de México (Tláhuac), donde: W; humedad natural, C.O.: carbono orgánico, C.E: conductividad eléctrica, D.R: densidad real.

TLÁHUAC	Propiedades Fisicoquímicas							
	W	Granulometría de finos (%)			CO	pH	C.E	D. R.
		Arena	Limo	Arcilla				
Muestra	%				%			
MA-T3-H6-12	187.15	38.27	42.79	18.94	2.15	9.76	1470	2.27
MB-T4-H10-17	227.0	52.45	36.44	11.11	4.58	10.61	2590	2.05
MC-T5-H11-22.55	260.44	22.71	62.44	14.85	3.29	10.5	3470	2.23
MD-T5-H11-22.85	307.70	63.94	25.51	10.55	6.45	10.5	3470	2.05
ME-T5-H11-23.31	199.25	63.94	25.51	10.55	2.84	10.5	3470	2.22

En la Figura 20 se muestra el perfil con la variación de la granulometría de finos del sondeo realizado en Tláhuac. En los primeros 5 m se encuentran materiales limo arcillosos con menor cantidad de arena; de 5-12 m hay un cambio y los materiales tienen una tendencia arena-limosa y poca cantidad de arcilla; de 12-18 m materiales limo-arenosos y de 18 a 30 m, predominan los materiales limosos con cantidades similares de arcilla y arena.

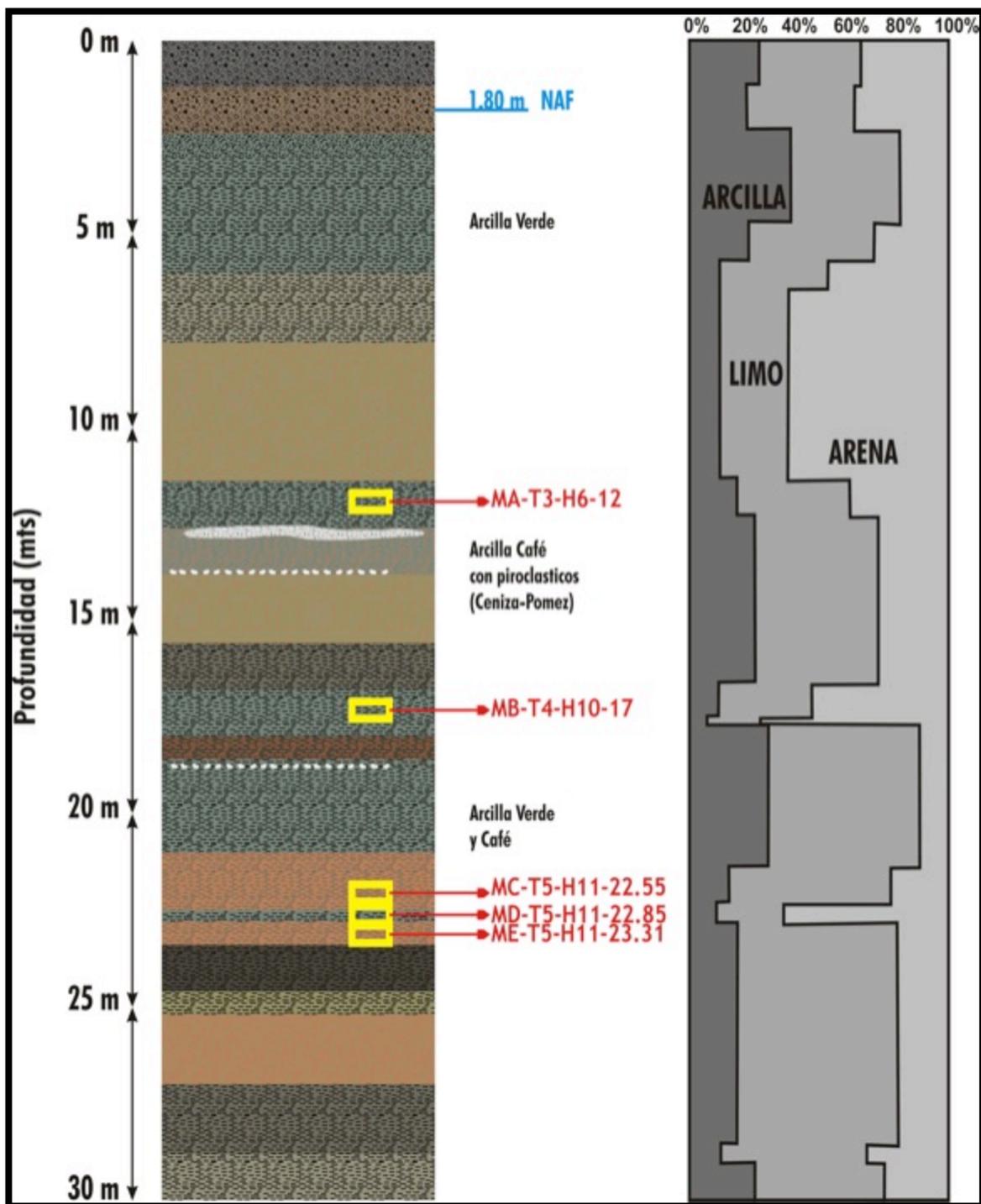


Figura 20. Perfil del sondeo realizado en la Tláhuac, se observa la variación de su granulometría con la profundidad y predomina el contenido de limo.



VII.2.1.2 Sitio Irapuato

En la Tabla 3 se presentan las propiedades fisicoquímicas en **MTA** de la profundidad correspondiente a cada una de las cinco muestras analizadas en la secuencia perforada (MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60, y MJ-Ir2-16.80). Los resultados en estas profundidades muestran humedad natural que varían entre 20 a 33%; una granulometría con tendencias arcillo-limosas, areno-arcillosas y arcillo limosas (Figura 44); el carbono orgánico muestra valores casi nulos el más alto de 0.2 %; pH neutro a ligeramente alcalino de 7.9 a 8.2; conductividad eléctrica de 1137 a 2293 dS/m; y densidad real entre 2.21 y 2.44 gr/cm³.

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, del sondeo realizado en la Ciudad de Irapuato, donde: W; humedad natural, C.O.; carbono orgánico, C.E.; conductividad eléctrica, D.R; densidad real.

Sitio	Propiedades Fisicoquímicas							
	W	Granulometría de Finos (%)			CO	pH	C.E	D. R.
Irapuato	%	Arena	Limo	Arcilla	%		dS/m	gr/cm ³
Profundidad (m)								
MF-Ir3-7.07	29.3	40	11.3	34.69	0.0	7.9	1487.7	2.42
MG-Ir3-8.60	20.5	29.6	35.7	34.6	0.0	7.9	1137.5	2.44
MH-Ir3-10.85	33.2	7.9	19.7	72.4	0.1	8.1	2293.6	2.21
MI-Ir2-15.60	32.5	36.1	25.1	38.8	0.0	8.2	1383.9	2.42
MJ-Ir2-16.80	20.4	53.8	20.3	25.9	0.2	7.8	1259.6	2.37

En la Figura 21 se muestra el perfil con la variación de la granulometría de finos del sondeo realizado en Irapuato. Los resultados muestran materiales de 1 a 5.40 m, se encuentran materiales arcillo-limosos y contenido de arena menor a 20%; de 5.40 a 12.45 m los materiales que predominan son areno-limosos con contenidos de arcilla menor a 25%; de 12.45 a 20.40 m los materiales son arcillo-limosos y conforme aumenta la profundidad aumenta el contenido de arena y los materiales que se presentan son areno-arcillosos con contenidos entre 15 a 20 % de limo.

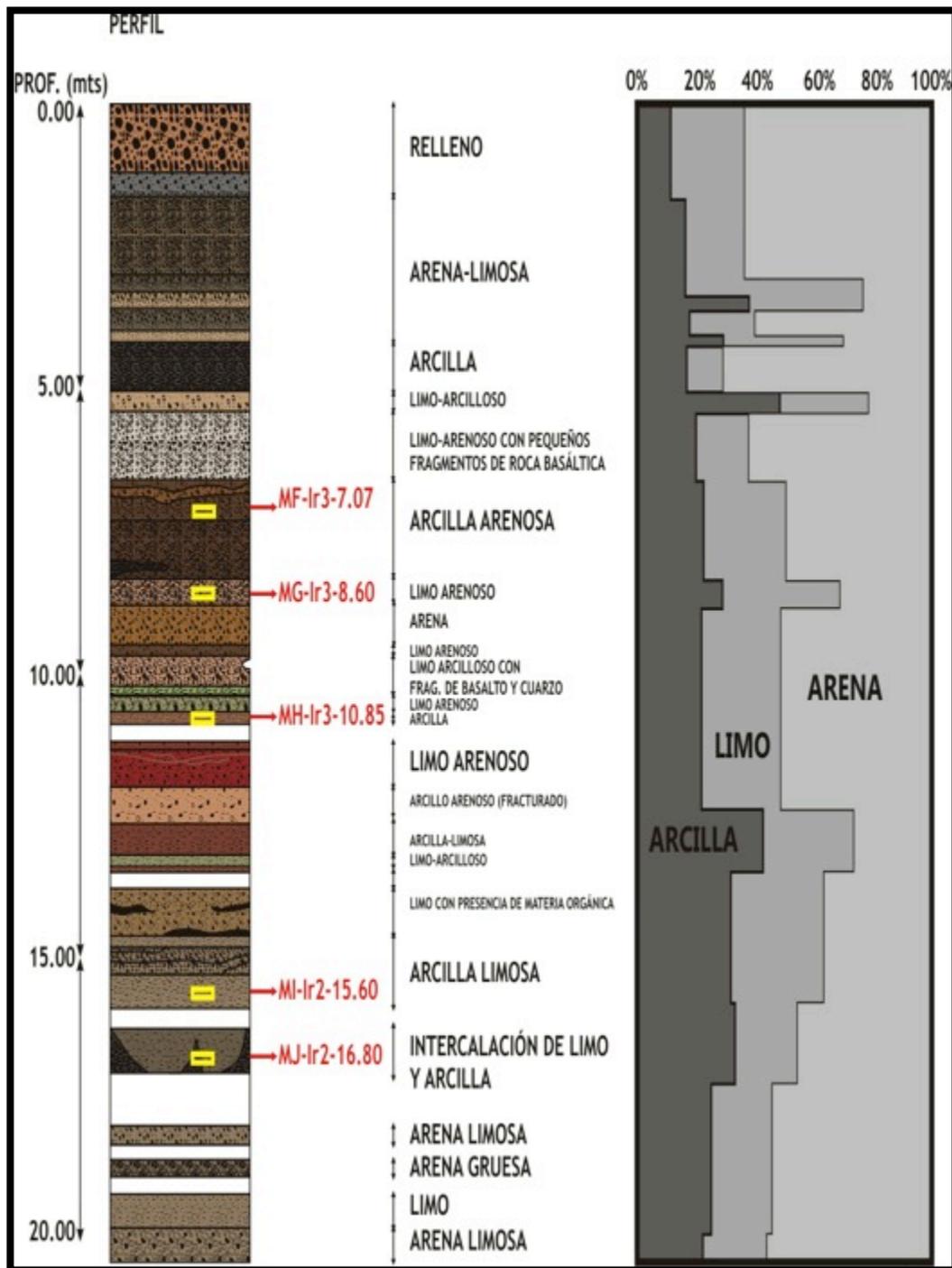


Figura 21. Se muestra el perfil con la variación de la granulometría con la profundidad del sondeo realizado en la Ciudad de Irapuato. La secuencia presenta materiales arcillo-limosos y areno-limosos.



VII.2.2 Caracterización mineralógica

VII.2.2.1 Sitio Tláhuac

A continuación se describen los resultados de la caracterización mineralógica y morfológica de las cinco muestras analizadas para el perfil del sondeo realizado en la Ciudad de México (Tláhuac). Para cada muestra analizada se presenta el perfil a detalle del horizonte al que pertenece, un difractograma de la muestra total representativa del horizonte (**MTA**), que fue tomado en la muestra alterada (SPT) con el fin de saber la mineralogía general contenida en los horizontes y muestras analizadas. También se muestra un difractograma y microfotografías de SEM y/o TEM de la fracción arcillosa que fue separada de la muestra intacta (**FAI**).

Muestra MA-T3-H6-12

La muestra MA-T3-H6-12 se encuentra ubicada en el horizonte H6, entre 11.40 y 12.23 m, que presenta una secuencia arcillosa de color verde con pequeños lentes de color rojizo. En la Figura 22 se presenta la ampliación del horizonte H6 y fotografías de la prueba de consolidación en MA-T3-H6-12.

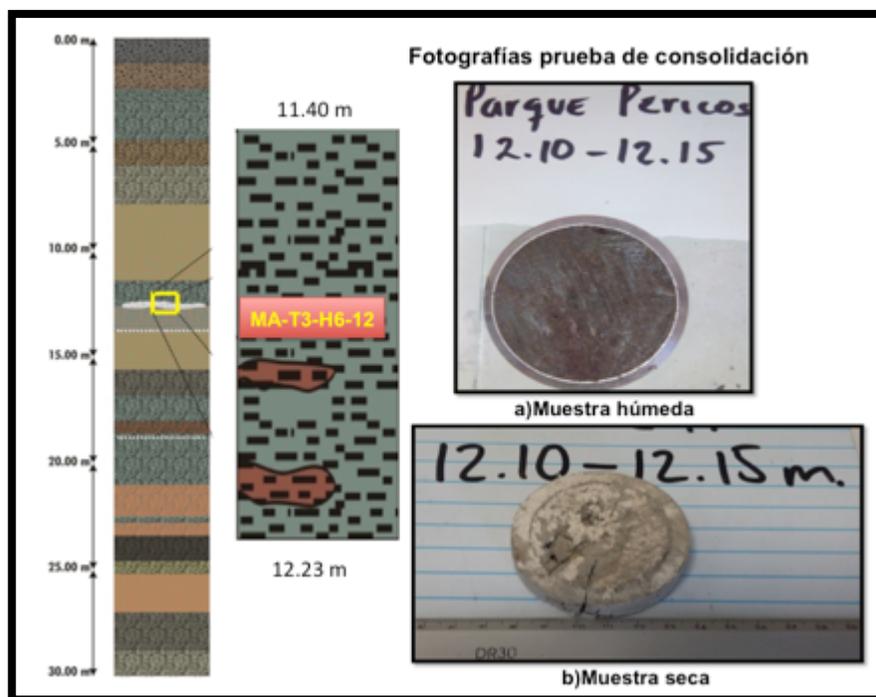


Figura 22. Ampliación del horizonte H6 (11.40-12.23 m) del sondeo realizado en Tláhuac, donde se tomó la muestra MA-T3-H6-12. El horizonte H6 es una secuencia limo-arenosa de color verde con pequeños lentes de color rojizo (oxidación). Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.



El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**), tomada del tramo 11.40-12.23 m, se presenta en la Figura 23. Se identificaron las fases cristalinas calcita (PDF No. 99-000-0548), anortita (PDF No. 99-000-0126), cuarzo (PDF No. 99-000-3084)

y la presencia de una fase arcillosa, posiblemente montmorillonita y/o vermiculita (PDF No. 99-000-2503). Esta fase se identificó en la fracción arcillosa de la muestra (FAI) de la muestra MA-T3-H6-12 y se trata de una fase pobremente cristalina. En la Figura 24 se muestra dos difractogramas donde se hace la interpretación de la fase arcillosa ya que debido a que esta pobremente cristalizada es difícil su interpretación, en a) se muestra la posible presencia de montmorillonita y en b) la posible presencia de vermiculita.

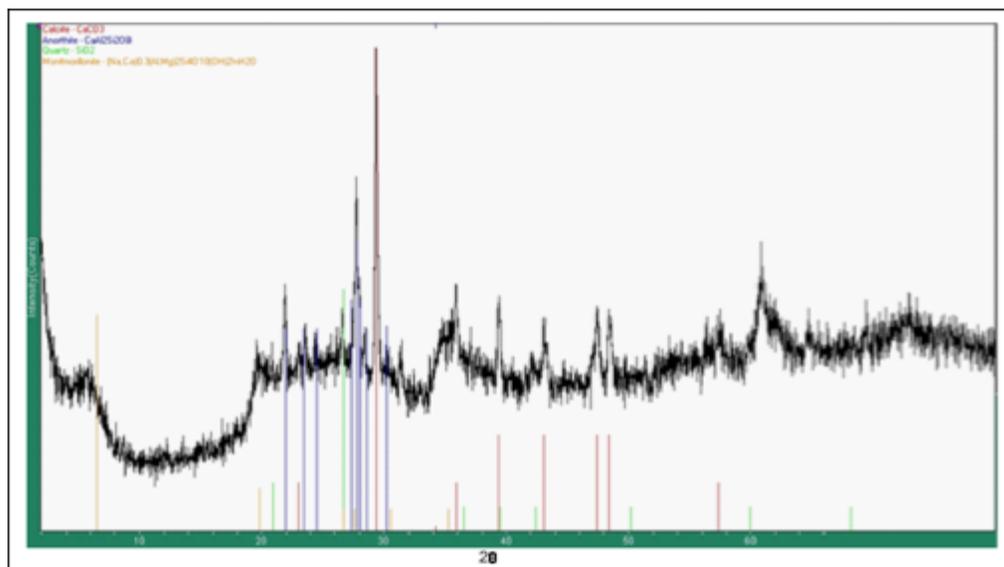


Figura 23. Difractograma en MTA del horizonte H6 donde se encuentra la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificaron las fases minerales calcita (en rojo), anortita (en azul), cuarzo (en verde) y probables arcillas (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

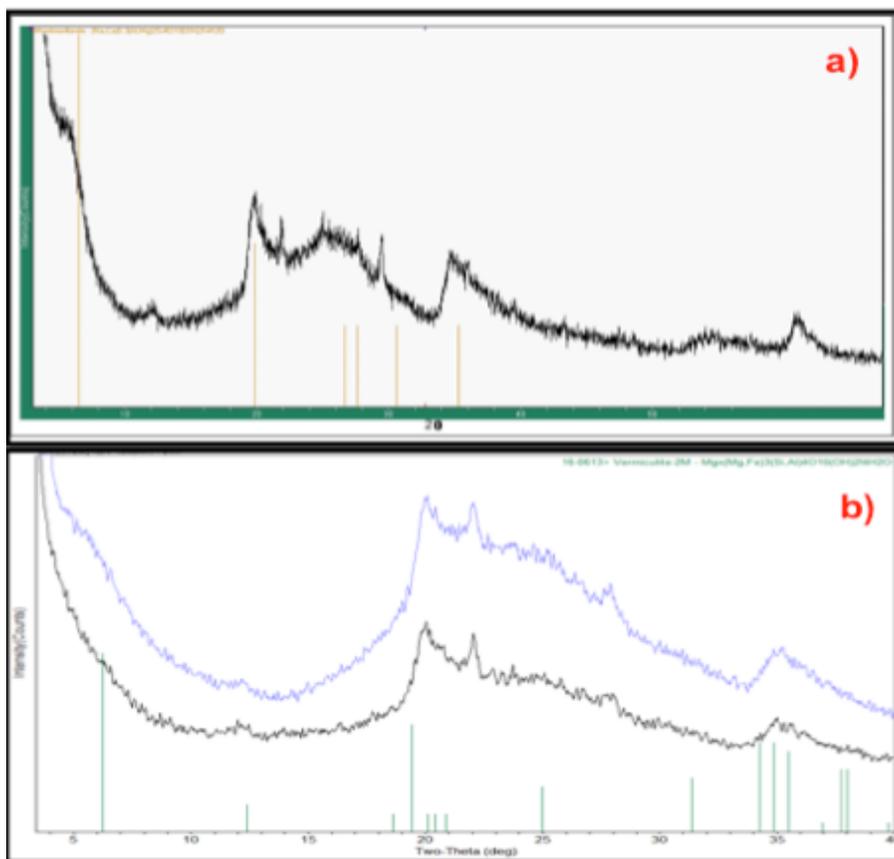


Figura 24. Difractograma en FAI de la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificó la posible arcilla pobremente cristalizada. En a) se muestra la interpretación de montmorillonita y en b) se muestra la posible presencia de vermiculita; en color negro se observa la muestra sin glicolar y en azul la muestra glicolada . En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.)

La observación morfológica de la fracción arcillosa de la muestra MA-T3-H6-12 por SEM (FAI) revela que se encuentra compuesta, en su mayoría, por agregados de partículas de morfología granular gruesa. Las partículas más pequeñas presentan tamaño menor a 2 μm , Figura 25, mientras que los agregados de mayor tamaño alcanzan los 6 μm . Imágenes más detalladas de la muestra obtenidas por TEM, Figura 26, revelan la presencia de partículas esféricas de diámetros 4.1 a 5.6 nm, que corresponden con las características reportadas para el alófono (Parfit 1990 a), es importante mencionar que dichos diámetros no son identificables a las escalas presentadas en las micrografías. Las proporciones Al/Si obtenidas por EDS (acoplado al SEM) fueron 1/1 lo que indica que se trata de una muestra rica en silicio, lo que es congruente con la ausencia de partículas tubulares propias de la imogolita (Wada, 1989; Shoji *et al.*, 1993).

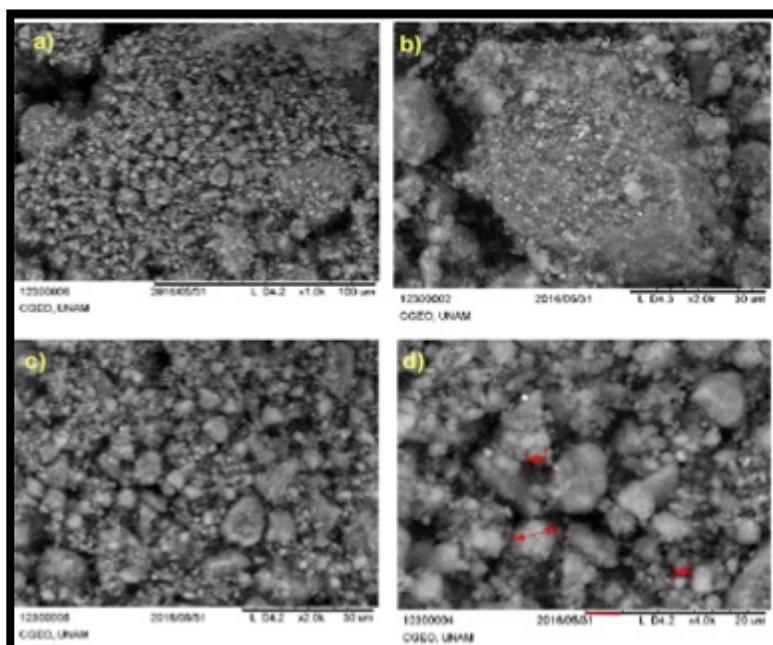
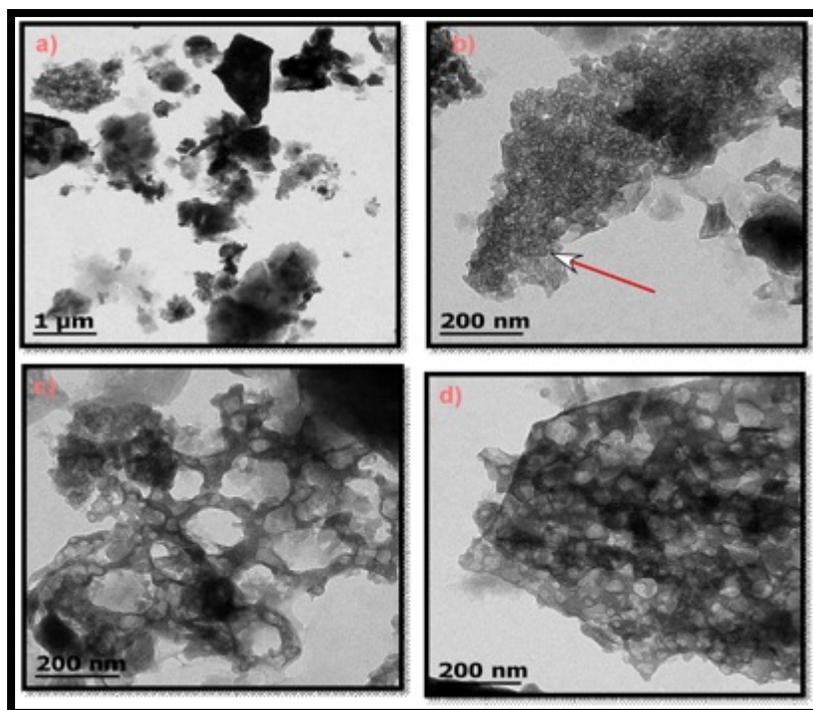


Figura 25. Microfotografías de SEM de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) en la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac, a diferentes ampliaciones. Se observan agregados de partículas de morfología granular gruesa. Las partículas más pequeñas presentan tamaño menores a 2 µm, que se pueden observar en las flechas (rojo).



Figuran 26. Microfotografías de TEM de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) en la muestra MA-T3-H6-12 del sondeo realizado en Tláhuac. Se observan morfologías esféricas similares a las del alófono. Los diámetros encontrados varían entre 4.1 a 5.6 nm que no son identificables a las escalas usadas.



Muestra MB-T4-H10-17

La muestra MB-T4-H10-17 se encuentra ubicada en el horizonte H10, entre 16.80 y 21.00 m, que presenta una secuencia limo-arcillosa de color verde olivo intercalada con arena negra, destaca un lente de arena de 3 cm a los 17.80 m.

En la Figura 27 se presenta la amplificación de un tramo (17.00 a 17.90 m) del horizonte H10 de donde se obtuvo la muestra MB-T4-H10-17 y fotografías de la prueba de consolidación de la muestra antes mencionada.

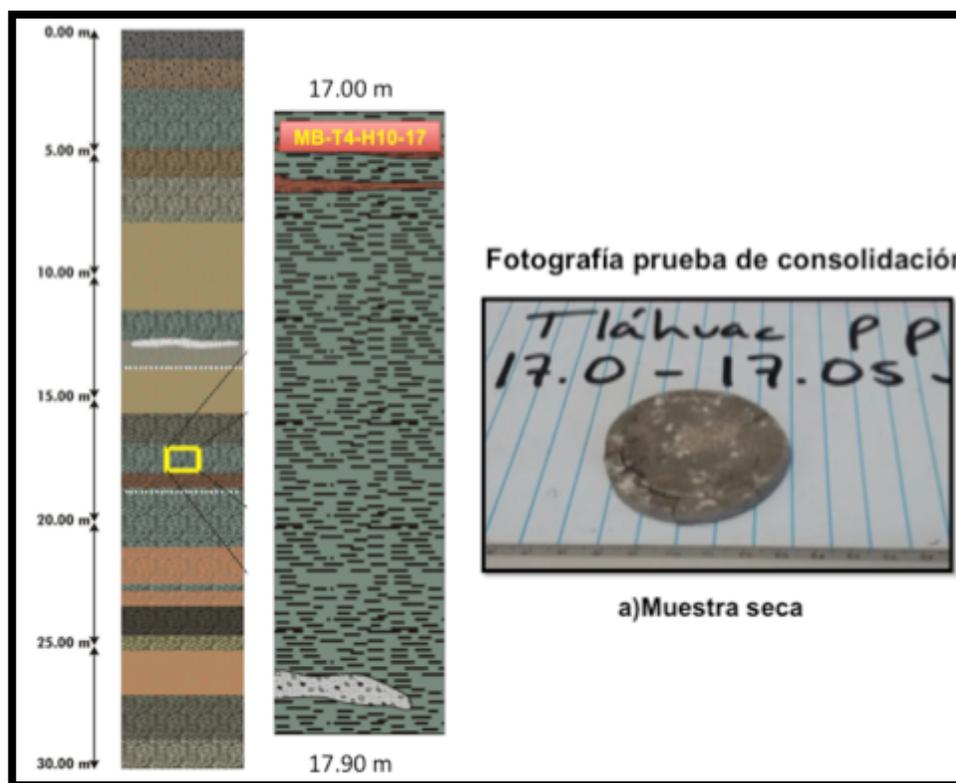


Figura 27. Amplificación de un tramo (17.00-17.90 m) del horizonte H10 del sondeo realizado en Tláhuac, donde se tomó la muestra MB-T4-H10-17. Se observa una secuencia limo-arcillosa de color verde olivo intercalada con arena negra, a los 17.80 m destaca un lente de ceniza de 3 cm. Se muestra una fotografía que corresponde a la muestra (seca) sometida a la prueba de consolidación.

El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (MTA) tomada del tramo 17-17.90, se presenta en la Figura 28. Se identificaron las fases cristalinas calcita, anortita y cuarzo así como la posible presencia de una fase arcillosa. En esta fase se identificó en la fracción arcillosa de la muestra (FAI) de la muestra MB-T4-H10-17 la posible presencia de montmorillonita, cabe mencionar que interpretación no es clara debido a que la fase arcillosa está pobremente cristalizada (ver Figura 29).

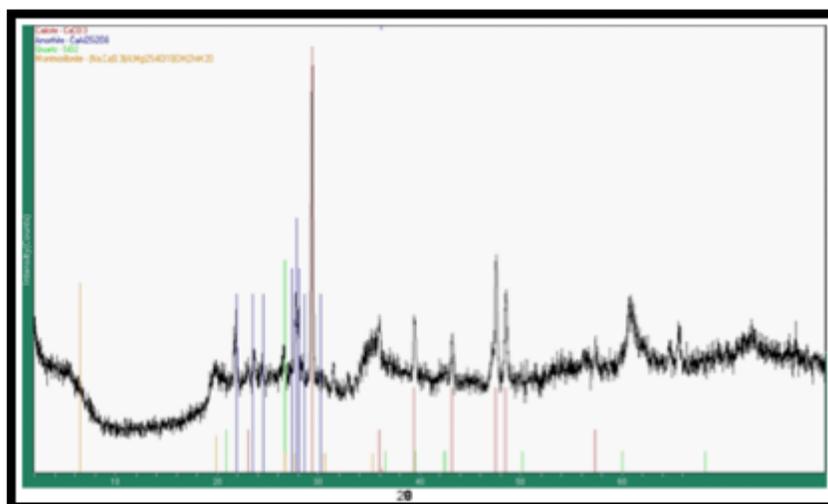


Figura 28. Difractograma en MTA de un tramo (17.00-17.90 m) del horizonte H10, donde se encuentra la muestra MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificaron las fases minerales calcita (en rojo), anortita (en azul), cuarzo (en verde) y probables arcillas (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

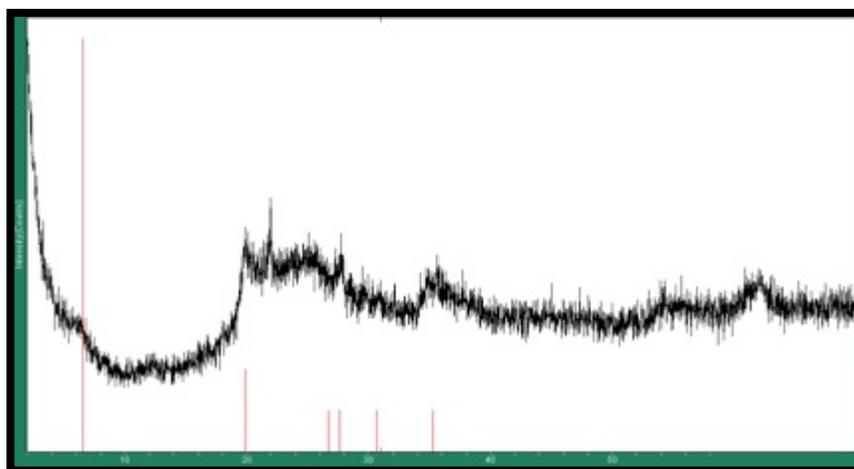


Figura 29. Difractograma en FAI de la muestra MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. Se observa la posible presencia de montmorillonita (rojo) pobremente cristalizada. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

En la Figura 30, se presentan microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) de la muestra MB-T4-H10-17. Se observa una morfología granular fina y fragmentos menores a 5 μm de posibles fragmentos de diatomeas. Cabe mencionar que las diatomeas pueden presentar morfología de filamentos, abanicos, zigzags o estrelladas. En la Figura 31 se presentan microfotografías de TEM de esta fracción (FAI), en donde se observan algunas estructuras esferoides diámetro de 3.5 a 5.2 nm (no observables en la escala mostrada) las cuales pueden corresponder a alófono.

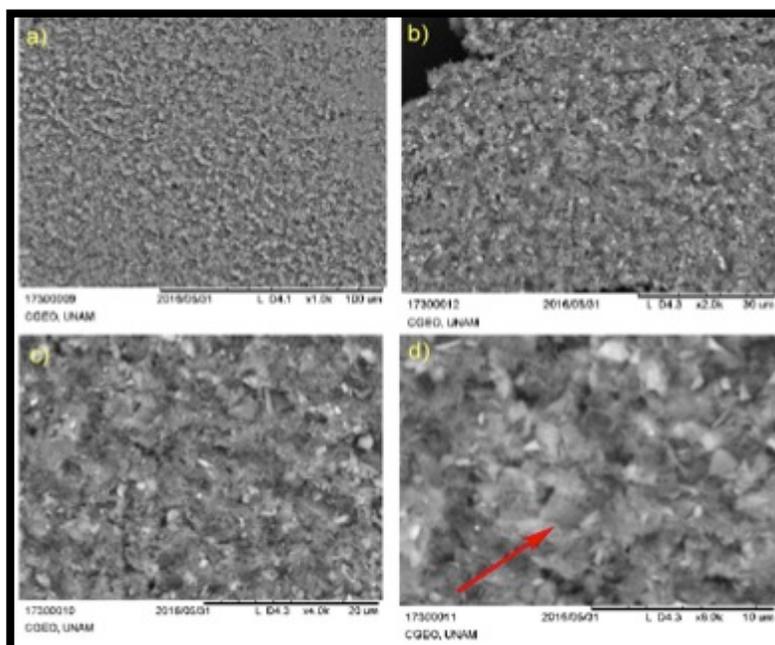


Figura 30. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) de MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) y (b) se observa morfología granular fina, en (c) y en (d) se observan posibles fragmentos de diatomeas (algas silíceas) menores a 5 μm . En (d) se la flecha indica un posible fragmento de diatomea.

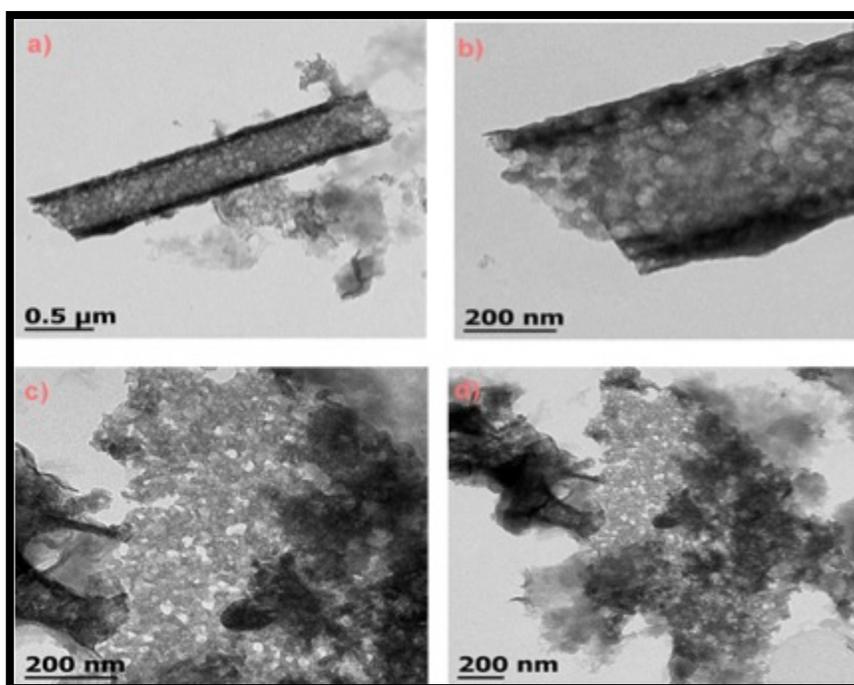


Figura 31. Microfotografías de TEM de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MB-T4-H10-17 del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) se observa una estructura tubular de 20 μm con zonas internas esféricas en b) se observa una ampliación de (a). En (c) y (d) se observan estructuras esféricas de diámetros entre 3.5 a 5.2 nm no identificables a las escalas usadas (posible alófono).

Muestra MC-T5-H11-22.55

Las muestras MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31 se encuentran en el horizonte H11 entre 21.00 y 23.40 m, que presenta una secuencia limo-arcillosa de color café-rojizo con intercalaciones de color verde olivo.

En la Figura 32 se muestra la ampliación de un tramo (22.50 a 23.40 m) del horizonte H11. De 22.50 a 22.75 m se observa una secuencia arcillosa de color verde olivo de donde se obtuvo la muestra MC-T5-H11-22.55, continuando de 22.75 a 23.40 m con una secuencia arcillosa de color café-rojiza con intercalaciones de arcillas de color verde.

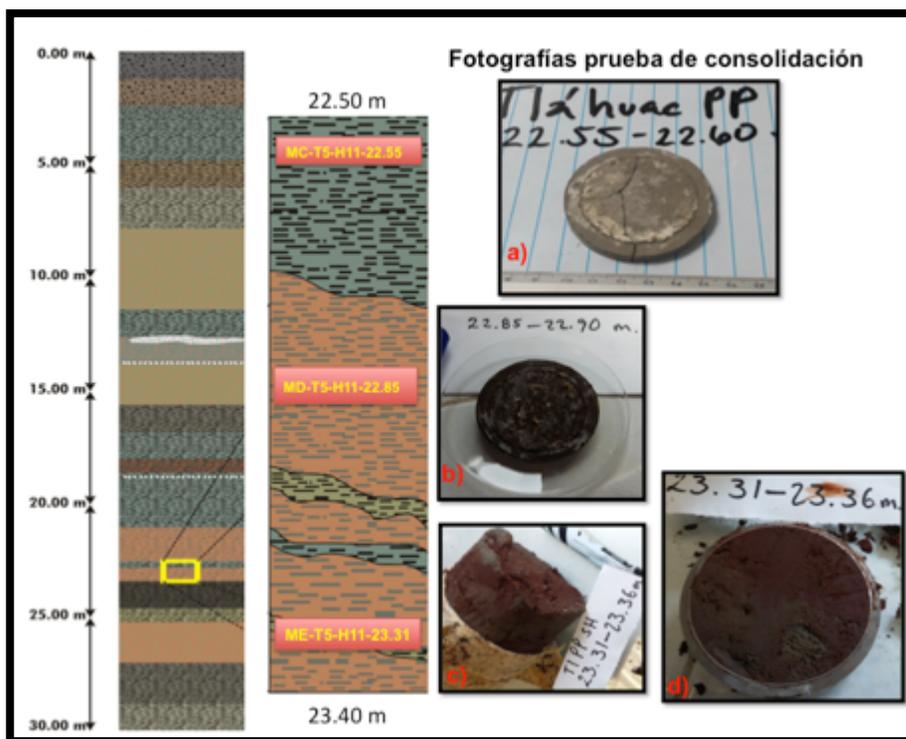


Figura 32. Amplificación de un tramo (22.50 a 23.40 m) del horizonte H11 del sondeo realizado en Tláhuac, donde se tomo las muestras MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. De 22.50 a 22.75 m se observa una secuencia arcillosa de color verde olivo, continuando con una secuencia arcillosa de color café rojiza con intercalaciones de arcillas de color verde. Se presentan fotografías de las muestras antes mencionadas sometidas a la prueba de consolidación; en a) muestra MC-T5-H11-22.55 seca después de la prueba, en b) muestra MD-T5-H11-22.85 húmeda después de prueba, c) muestra intacta de la muestra ME-T5-H11-23.31 y d) muestra ME-T5-H11-23.31 húmeda antes de prueba.

El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (MTA) tomada del tramo 22.50-22.75 se muestra en la Figura 33. Se identificaron las fases cristalinas de calcita, anortita y cuarzo y la posible presencia de una fase arcillosa. En la Figura 34, se muestra la interpretación de las posible fase arcillosa, en a) montmorillonita y en b) vermiculita.

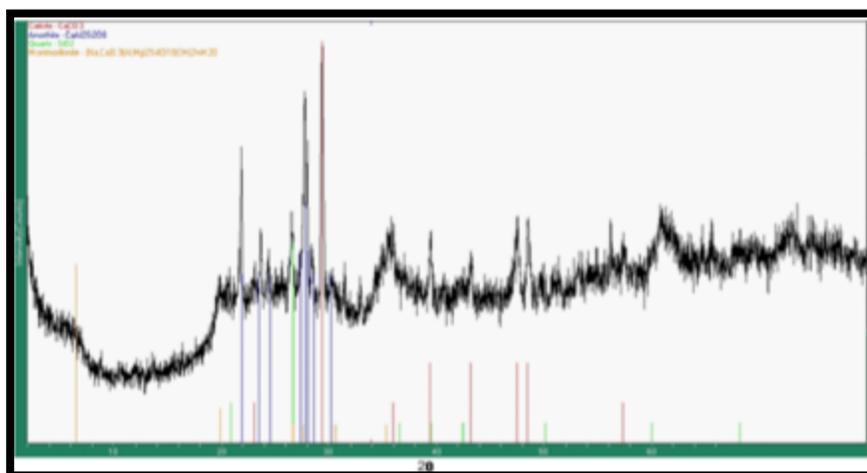


Figura 33. Difractograma en MTA de un tramo (22.50-22.75 m) del horizonte H11, donde se encuentra la muestra MC-T5-H11-22.55 del sondeo realizado en Tláhuac. Se identificaron las fases minerales calcita (en rojo), anortita (en azul), cuarzo (en verde) y probables arcillas (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

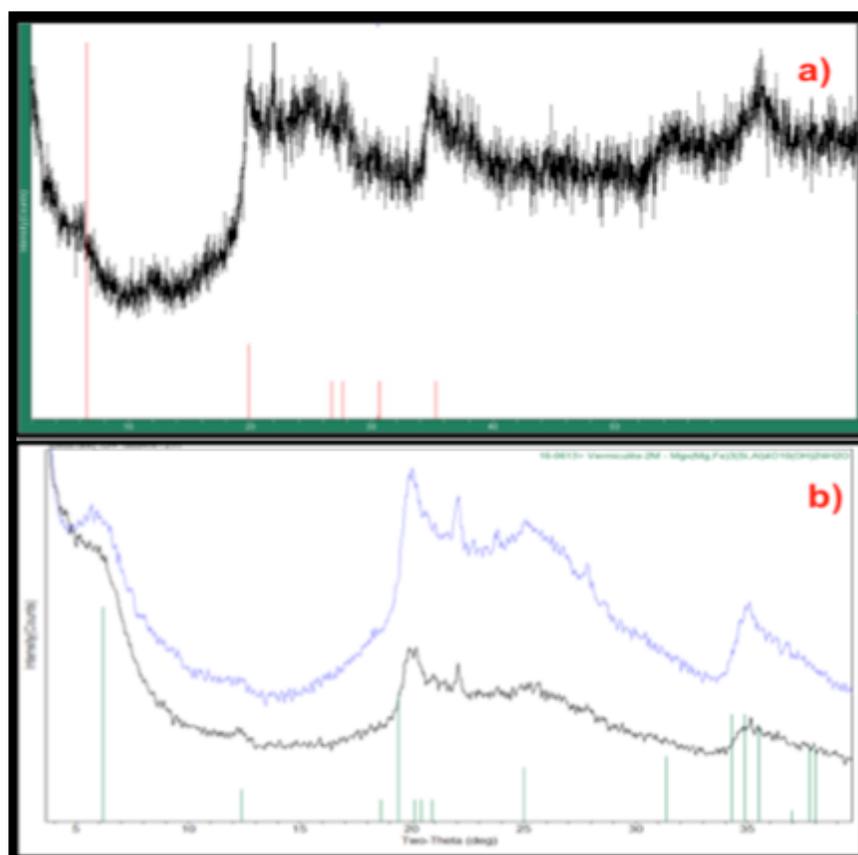


Figura 34. Difractograma de la fracción arcillosa de muestra intacta FAI de la muestra MC-T5-H11-22.55 del sondeo realizado en Tláhuac. En a) observa la interpretación de montmorillonita y en b) la interpretación de la posible presencia de vermiculita; en color negro se observa la muestra sin glicolar y en azul la muestra glicolar. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).



En la Figura 35 se muestran las microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI), apreciándose morfologías granulares muy finas y la presencia de partículas laminares que pueden corresponder a la arcilla identificada por DRX (montmorillonita y/o vermiculita).

En la Figura 36 se muestran microfotografías de TEM que presentan partículas laminares y escasas y escasa a nulas partículas esferoides. Por lo anterior se puede interpretar que en esta muestra hay mayor contenido de arcillas que de amorfos (alófono).

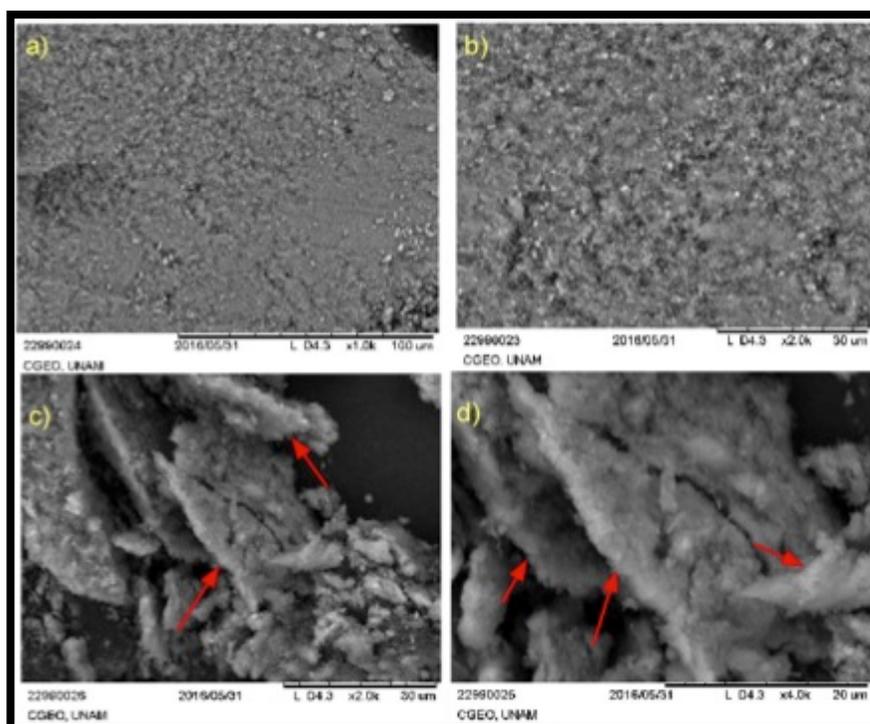


Figura 35. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta del tramo 22.50-22.75 m, en donde se ubica la muestra MC-T5-H11-22.55 del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) y (b) se observan morfologías granulares muy finas, en (c) y (d) se observa morfología laminar (flechas) y escasa morfología granular.

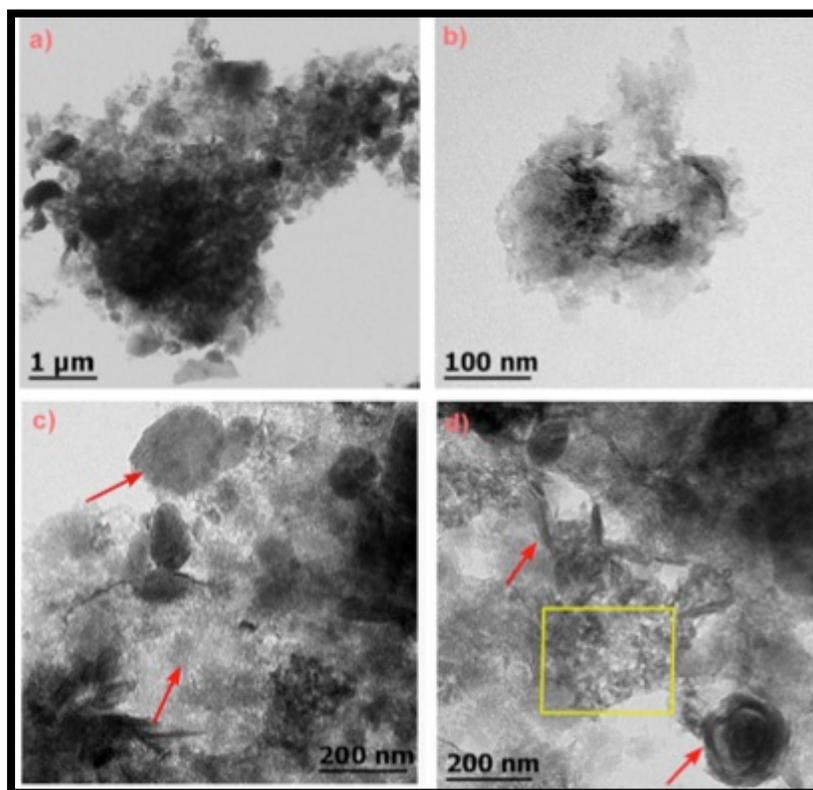


Figura 36. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) del tramo 22.50-22.75 m, en donde se ubica la muestra MC-T5-H11-22.55, del sondeo realizado en Tláhuac. En (a), (b), (c) y (d) se observan estructuras laminares (flechas) y escasa a nula morfología esferoide (cuadro en amarillo).

Muestras MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31

El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**) tomada del tramo 22.75-23.40 se muestra en la Figura 37, este patrón representa a las muestras MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. Se identificaron las fases cristalinas de calcita, anortita, cuarzo y la posible presencia de una fase arcillosa.

En la Figura 38, se muestra los resultados de la FAI para la muestra MD-T5-H11-22.85 en el difractograma se observa el posible registro de montmorillonita y material amorfo que podría corresponder a materia orgánica.

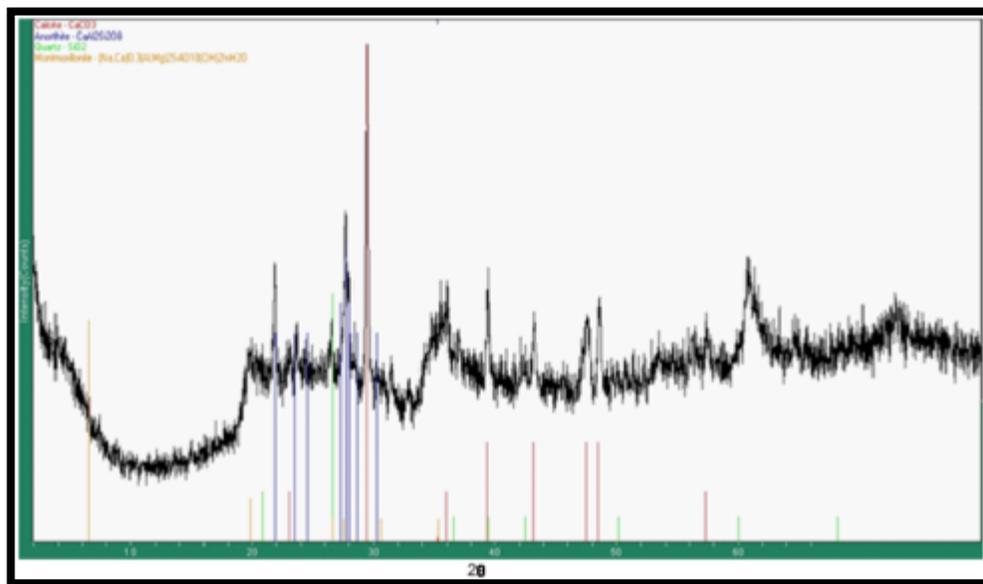


Figura 37. Difractograma de la muestra total alterada MTA del tramo 22.75-23.40 m del sondeo realizado en Tláhuac. Este tramo corresponde a la ubicación de las muestras MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. En el difractograma se observa el registro de calcita, anortita, cuarzo y probables arcillas. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

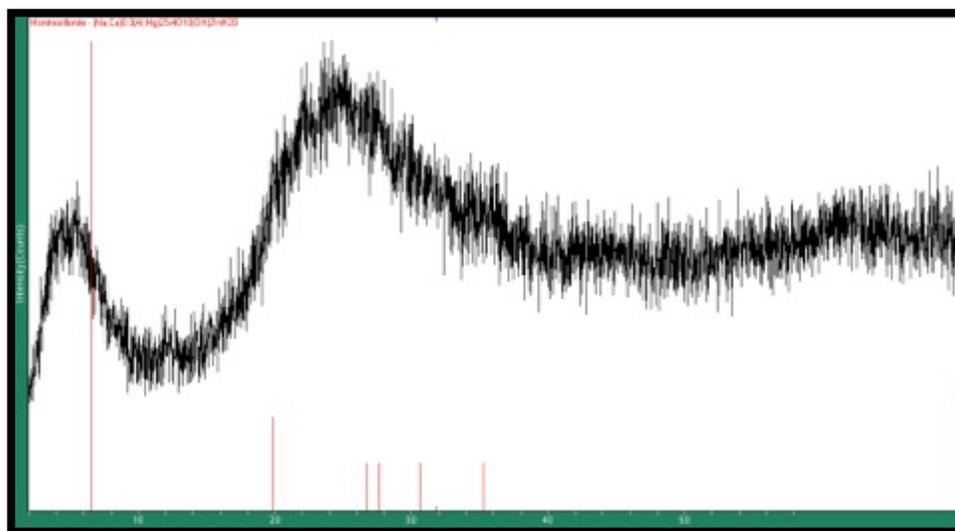


Figura 38. Difractograma de la fracción arcillosa de muestra intacta FAI de la muestra MD-T5-H11-22.85, del sondeo realizado en Tláhuac. Se observa el posible registro de montmorillonita muy poco cristalina y material amorfo. En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).



La Figura 39 presenta microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) tomada de la muestra MD-T5-H11-22.85. Se observa morfología granular gruesa y fragmentos de posibles diatomeas.

La Figura 40 presenta microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MD-T5-H11-22.85. Se observan diatomeas centrales (morfología de filamentos) *Alaucoseira granulata* (Ehrenberg, 1843), de aproximadamente 6 μm de largo y 2 μm de ancho, morfologías laminares, esferoides y escasas tubulares.

Cabe mencionar que no se realizó DRX, SEM y TEM en FAI de ME-T5-H11-23.31 debido a que corresponde al mismo tramo de MD-T5-H11-22.85.

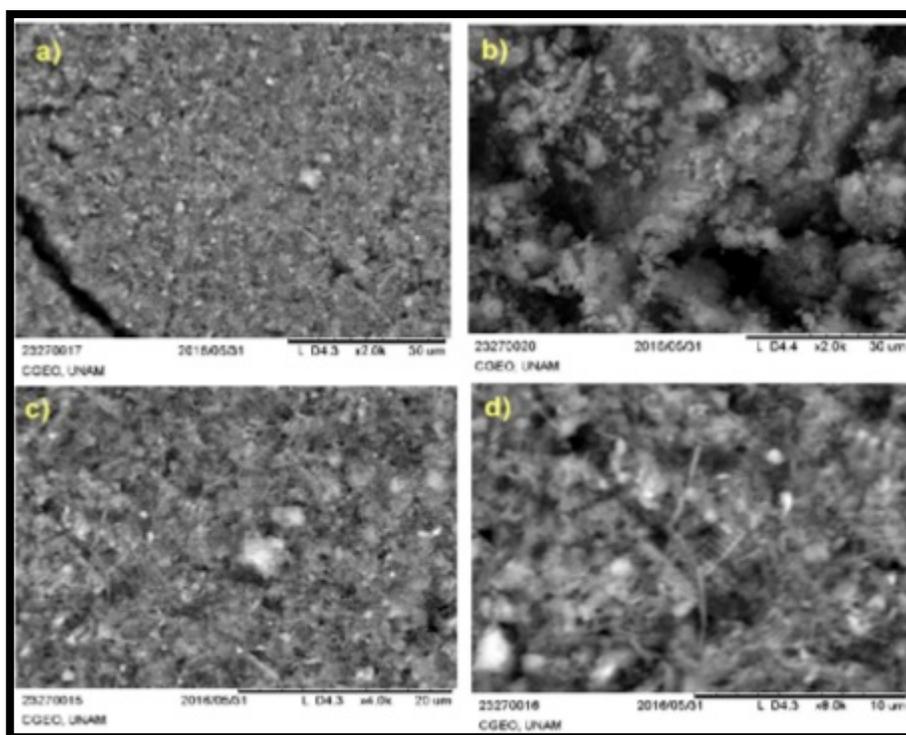


Figura 39. Microfotografías de SEM diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) MD-T5-H11-22.85, del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) y (b) morfología granular gruesa, en (c) y (d) morfología granular gruesa y posibles fragmentos de diatomeas (algas silíceas).

La Tabla 4 resume los resultados indican que los principales minerales que componen a los diferentes muestras analizadas (MA-T3-H6-12 MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31) y son calcita, anortita, cuarzo (en MTA) y la presencia de minerales de arcilla (en FAI) de la familia de las esméctitas (montmorillonita) y/o vermiculita, se observan morfologías similares a las de alófono.

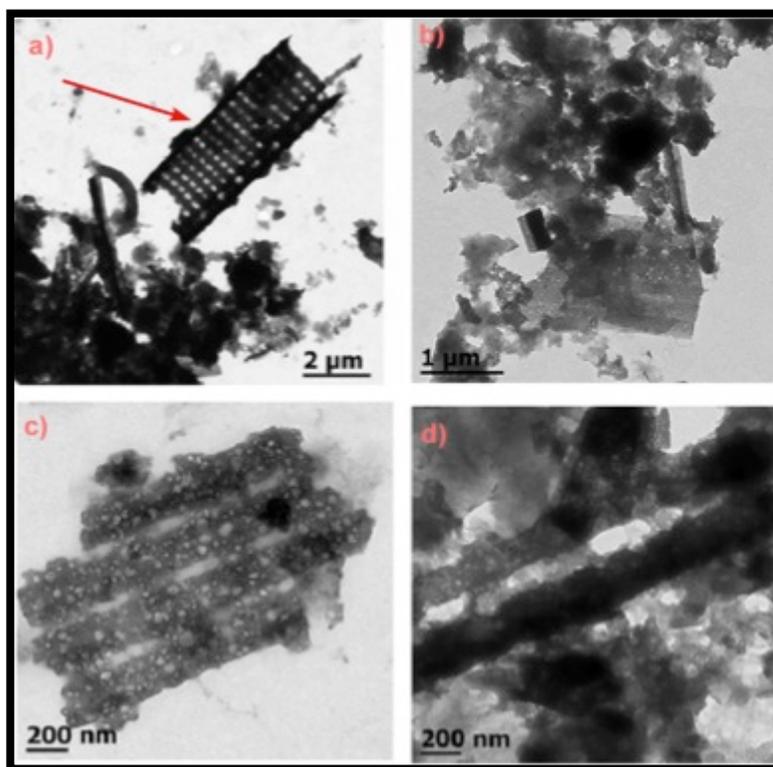


Figura 40. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) MD-T5-H11-22.85, del sondeo realizado en Tláhuac. En (a) se observan diatomeas centrales *Alaucoseira granulata* (Ehrenberg, 1843), de aproximadamente 6 μm de largo y 2 μm de ancho, en (b) morfologías esferoides, laminares y posibles diatomeas, en (c) morfologías esferoides y/o diatomeas con longitudes mayores a 1000 nm, en (d) posibles morfologías de diatomeas.

Tabla 4. Características mineralógicas del sondeo realizado en Tláhuac. La mineralogía se determinó por DRX de MTA y de FAI. La morfología se obtuvo por SEM y TEM de la FAI, para cada una de las muestras analizadas (MA-T3-H6-12 MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31).

Muestra	DRX en MTA	DRX en FAI	Morfología SEM en FAI	Morfología TEM en FAI
MA-T3-H6-12	Calcita, anortita y cuarzo	Posible Montmorillonita y/o Vermiculita.	Predomina morfología granular.	Morfologías esferoides (alófano 4.1 a 5.6 nm)
MB-T4-H10-17			Morfología granular muy fina. Posibles fragmentos de diatomeas (algas silíceas).	Morfología esferoide (posible alófano 3.5-5.2)
MC-T5-H11-22.55			Granos muy finos, Morfologías laminares de aprox. 30 μm de longitud.	Estructuras laminares y escasa a nula morfología esferoide.
MD-T5-H11-22.85			Morfología granular gruesa, se observan fragmentos de diatomeas (algas silíceas).	Se observan diatomeas centrales.
ME-T5-H11-23.31				



VII.2.2.2 Sitio Irapuato

A continuación se describen los resultados de la caracterización mineralógica y morfológica de las muestras analizadas para el perfil del sondeo realizado en la Ciudad de Irapuato. Al igual que el sitio Tláhuac para cada una de las cinco muestras analizadas se presenta el perfil a detalle de la unidad a la que pertenece, un difractograma de la muestra total representativa del horizonte al que pertenece (**MTA**), que fue tomado de la muestra alterada (SPT), con el fin de conocer la mineralogía general contenida en las muestras analizadas. También se muestra un difractograma y microfotografías en SEM y/o TEM de la fracción arcillosa que fue separada de la muestra intacta (**FAI**).

Cabe mencionar que para este sondeo el análisis morfológico de las cinco muestras se realizó en SEM y TEM en otras SEM o TEM, esto debido a que ambos análisis muestran la morfología y solo en algunas muestras se pudieron realizar ambos análisis.

Muestra MF-Ir3-7.07

En la Figura 41 se muestra la amplificación del tramo 6.60-7.32 m, donde se ubica la muestra MF-Ir3-7.07, que presenta una secuencia arcillo-limoso de color café oscuro (fracturado) intercalado con un lente de arena media a gruesa a los 6.75 m con 20 cm de espesor. La Figura también presenta fotografías de la prueba de consolidación en MF-Ir3-7.07.

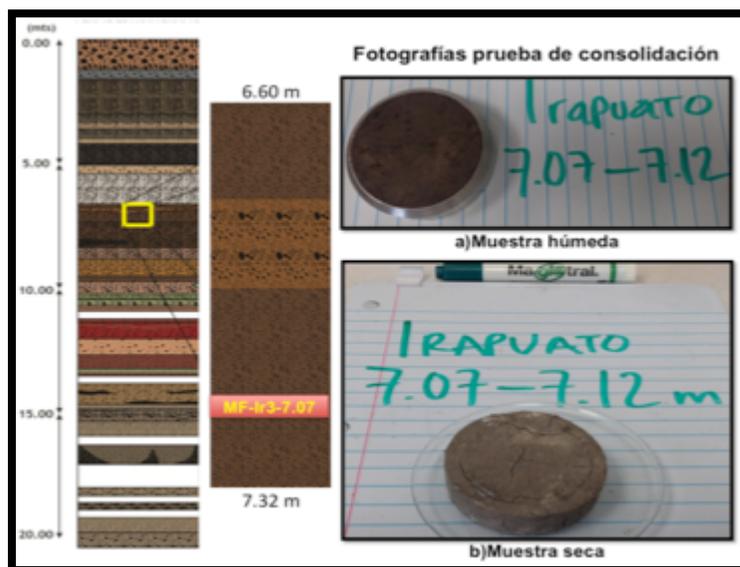


Figura 41. Amplificación del tramo 6.60-7.32 m donde se ubica la muestra MF-Ir3-7.07 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por material arcillo-limoso de color café oscuro (fracturado) intercalado con un lente de arena media a gruesa a los 6.75 m con 20 cm de espesor. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.



El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**), tomada del tramo 6.60-7.32 donde se ubica la muestra MF-Ir3-7.07 se presenta en la Figura 42. Se identificaron las fases cristalinas de cuarzo, albita, anortita y microclina, y la presencia de una fase arcillosa. La fase arcillosa se identificó en **FAI** de la muestra MF-Ir3-7.07 en la cual se observó el registro de montmorillonita y caolinita (ver Figura 43).

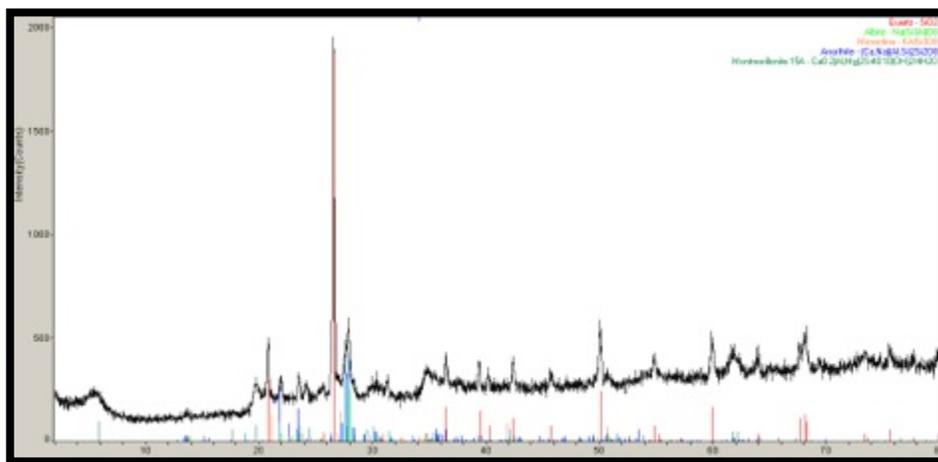


Figura 42. Difractograma en MTA obtenida del tramo 6.60-7.32 m donde se ubica la muestra MF-Ir3-7.07 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

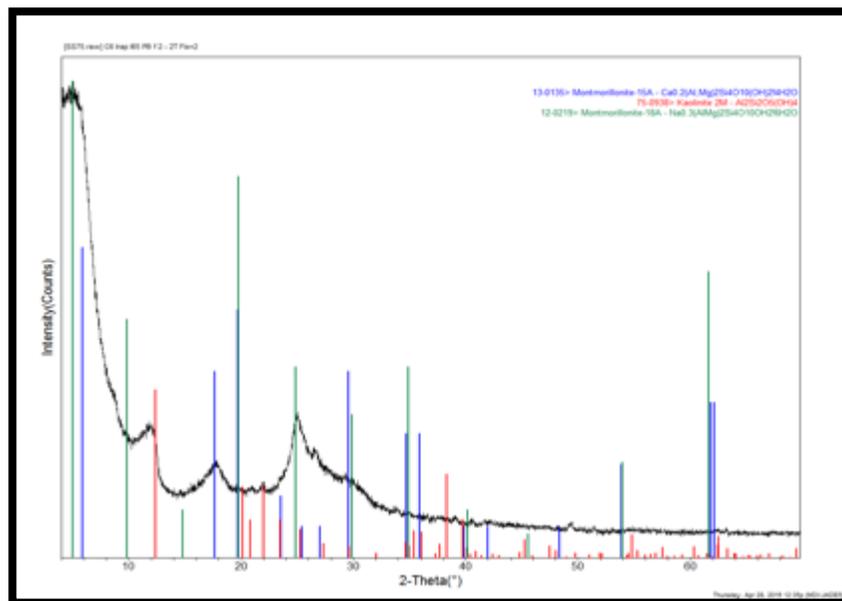


Figura 43. Difractograma en FAI de la muestra MF-Ir3-7.07, del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul y verde) y caolinita (en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).



La observación morfológica a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa (**FAI**) de la muestra MF-Ir3-7.07 por SEM revelan morfologías laminares de 50 a 25 μm de longitud (ver Figura 44), que corresponden a las arcillas identificadas por DRX.

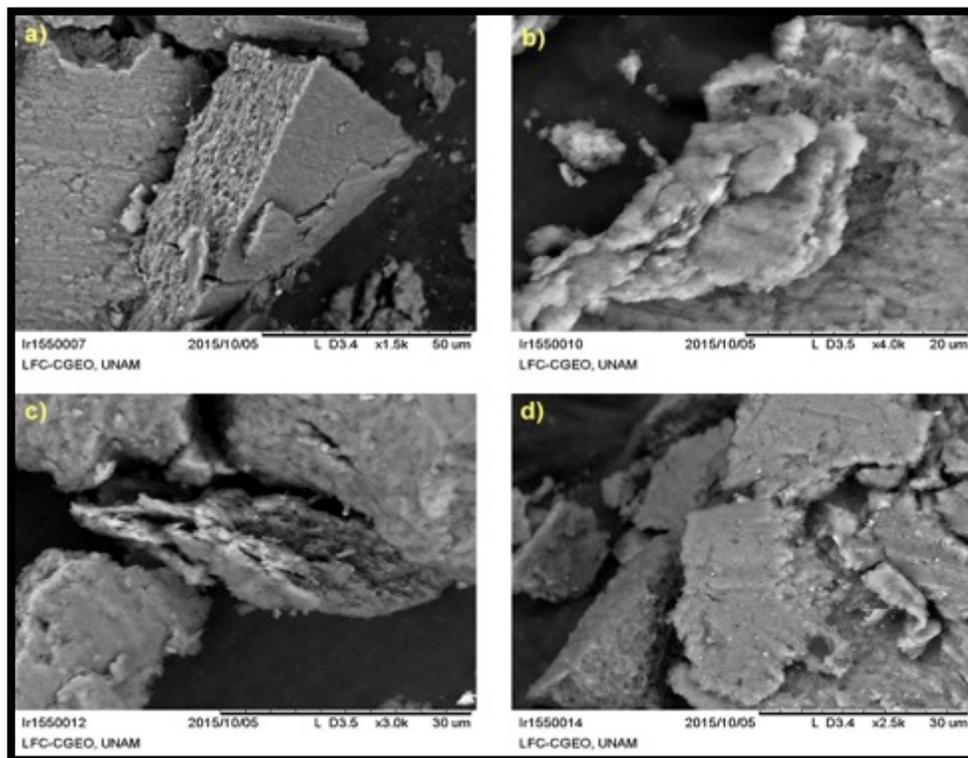


Figura 44. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones en FAI de la muestra MF-Ir3-7.07 del sondeo realizado en Irapuato . En (a), (b), (c), y (d); se observan morfologías laminares de 50 a 25 μm de longitud.

Muestra MG-Ir3-8.60

En la Figura 45 se muestra la ampliación del perfil litológico de 8.35-8.80 m, donde se ubica la muestra MG-Ir3-8.60. El tramo presentado por una secuencia limo-arenoso de color café claro. La Figura también presenta fotografías de la prueba de consolidación en MG-Ir3-8.60; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.

El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**), tomada del tramo 8.35-8.80 m, donde se ubica la muestra MG-Ir3-8.60 se presenta en la Figura 46. Se identificaron las fases cristalinas de cuarzo, albita, anortita y microclina, y la presencia de una fase arcillosa. La fase arcillosa se identificó en **FAI** de la muestra MG-Ir3-8.60 en la cual se observó el registro de montmorillonita y caolinita (ver Figura 47).

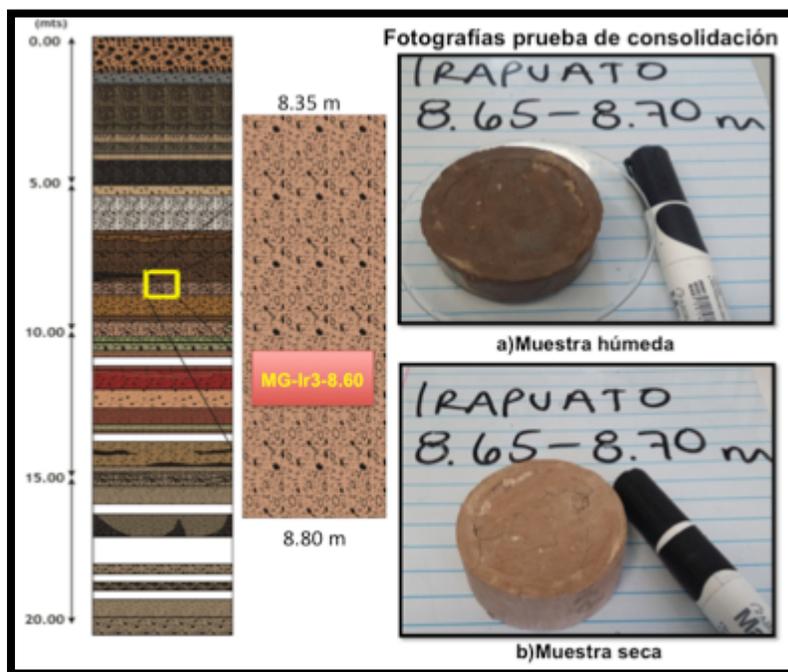


Figura 45. Amplificación del tramo 8.35-8.80 m donde se ubica la muestra MG-Ir3-8.60 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una secuencia limo-arenoso de color café claro. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.

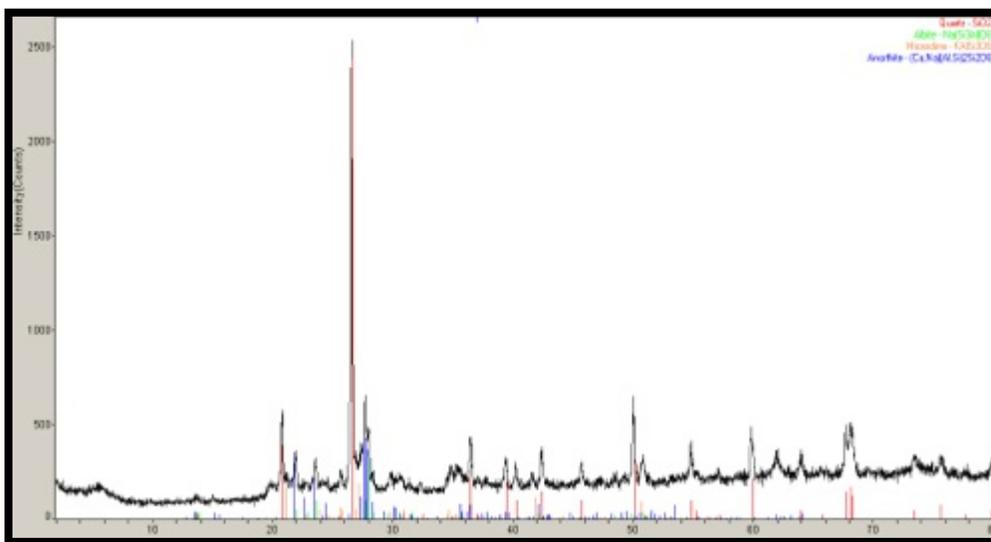


Figura 46. Difractograma en MTA obtenida del tramo 8.35-8.80 donde se ubica la muestra MG-Ir3-8.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

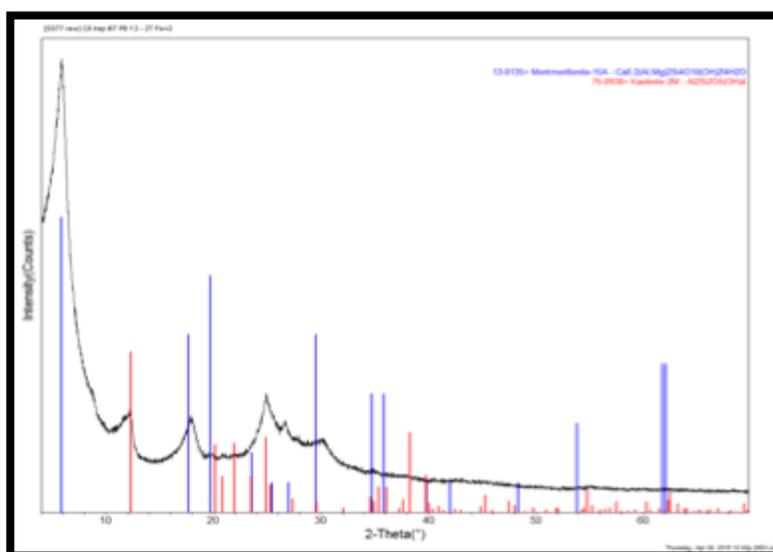


Figura 47. Difractograma en FAI de la muestra MG-Ir3-8.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita(en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

En la Figura 48 se presentan microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la **FAI** de la muestra MG-Ir3-8.60, se observan morfologías laminares menores a 200 nm de longitud, que corresponden a las arcillas identificadas por DRX.

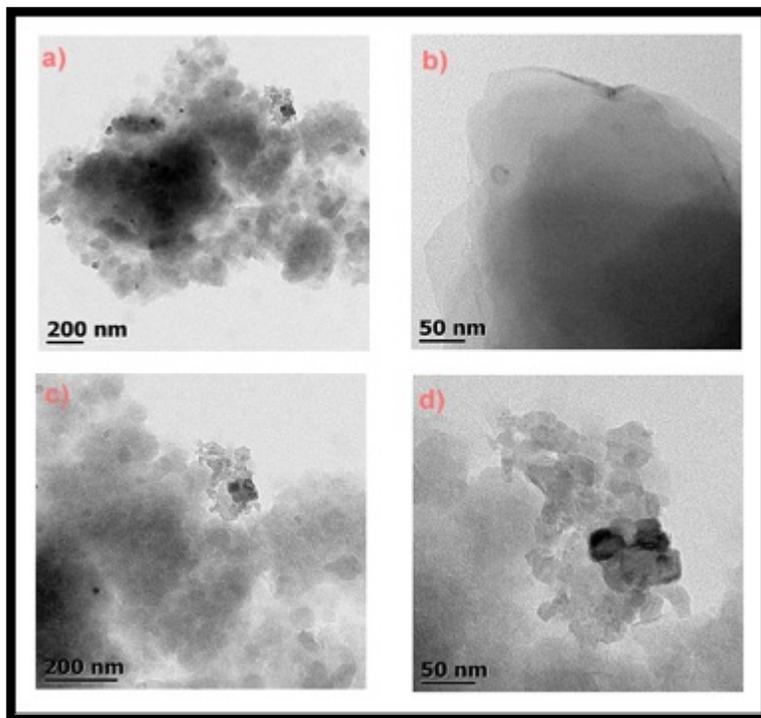


Figura 48. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MG-Ir3-8.60, del sondeo realizado en Irapuato. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares menores a 200 nm de longitud.



Muestra MH-Ir3-10.85

La Figura 49 se presenta la amplificación del tramo 10.70-10.90 m, donde se ubica la muestra MH-Ir3-10.85. El tramo presentado por una secuencia arcillo-limosa de color café. La Figura también presenta fotografías de la prueba de consolidación en MH-Ir3-10.85; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.

El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**), tomada del tramo 10.70-10.90 m, donde se ubica la muestra MH-Ir3-10.85 se presenta en la Figura 50. Se identificaron las fases cristalinas de cuarzo, albita, anortita y microclina, y la presencia de una fase arcillosa. La fase arcillosa se identificó en **FAI** de la muestra MH-Ir3-10.85 en la cual se observó el registro de montmorillonita y caolinita (ver Figura 51).

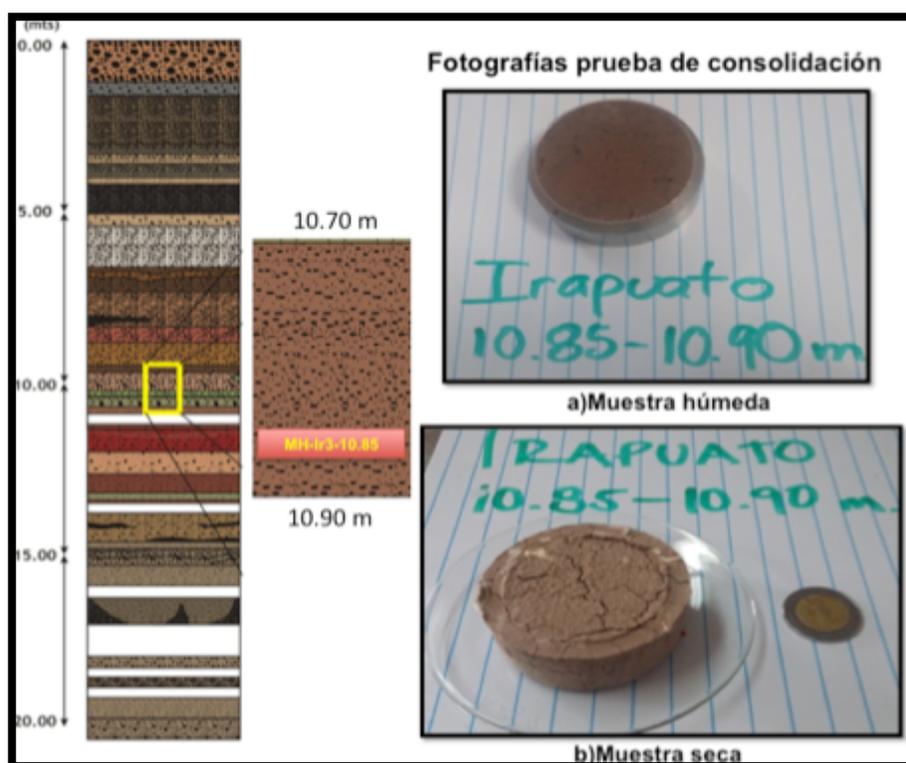


Figura 49. Amplificación del tramo 10.70-10.90 m, donde se ubica la muestra MH-Ir3-10.85 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una secuencia arcillo-limosa de color café. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.

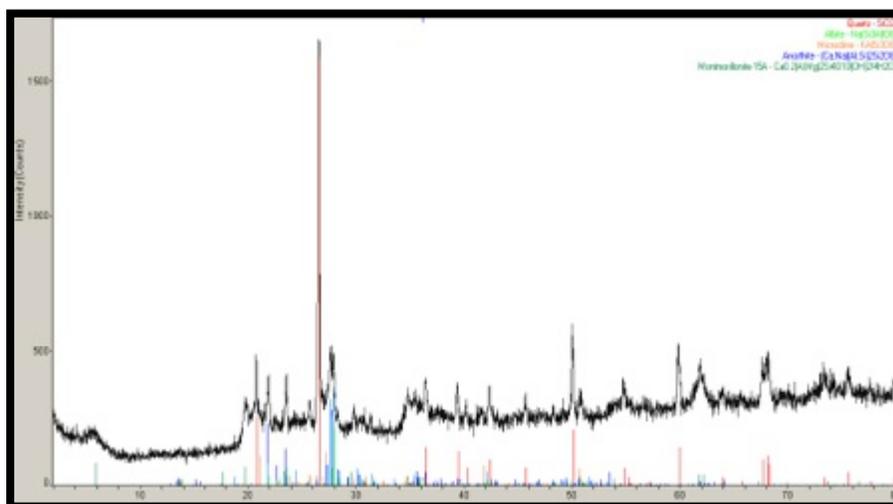


Figura 50. Difractograma en MTA obtenida del tramo 10.70-10.70 donde se ubica la muestra MH-Ir3-10.85 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

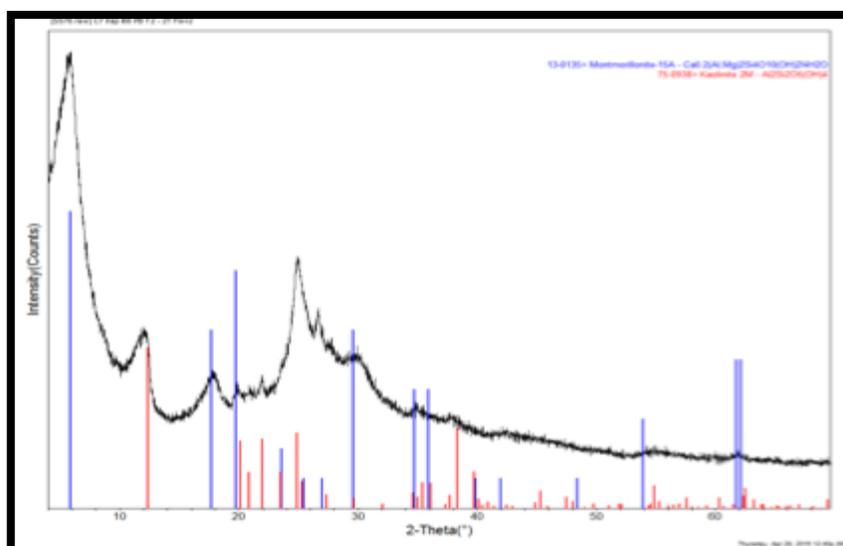


Figura 51. Difractograma en FAI de la muestra MH-Ir3-10.85, del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita (en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

En la Figura 52 se presentan microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la **FAI** de la muestra MH-Ir3-10.85, se aprecian morfologías laminares de 50 a 30 μm de longitud, que corresponden a las arcillas identificadas por DRX.

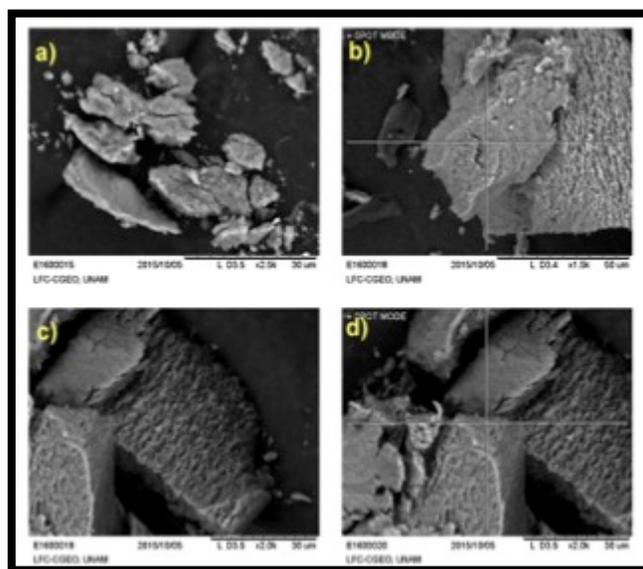


Figura 52. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MH-Ir3-10.85. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares de 50 a 30 μm de longitud.

Muestra MI-Ir2-15.60

En la Figura 53 se presenta la ampliación del tramo 15.12-15.90 m, donde se ubica la muestra MI-Ir2-15.60. El tramo presentado por una secuencia arcillo-limoso de alta compacidad. La Figura también presenta fotografías de la prueba de consolidación en MI-Ir2-15.60; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.

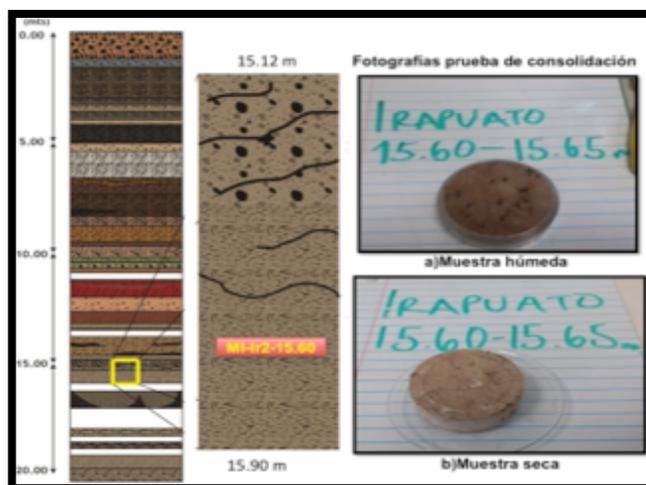


Figura 53. Amplificación del tramo 15.12-15.90 m, donde se ubica la muestra MI-Ir2-15.60 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una secuencia arcillo-limoso color café claro. Se muestran fotografías que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba y en b) muestra seca después de la prueba.



El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**), tomada del tramo 15.12-15.90 m, donde se ubica la muestra MI-Ir2-15.60 se presenta en la Figura 54. Se identificaron las fases cristalinas de cuarzo, albita, anortita y microclina, y la presencia de una fase arcillosa. La fase arcillosa se identificó en **FAI** de la muestra MI-Ir2-15.60 en la cual se observó el registro de montmorillonita y caolinita (ver Figura 55).

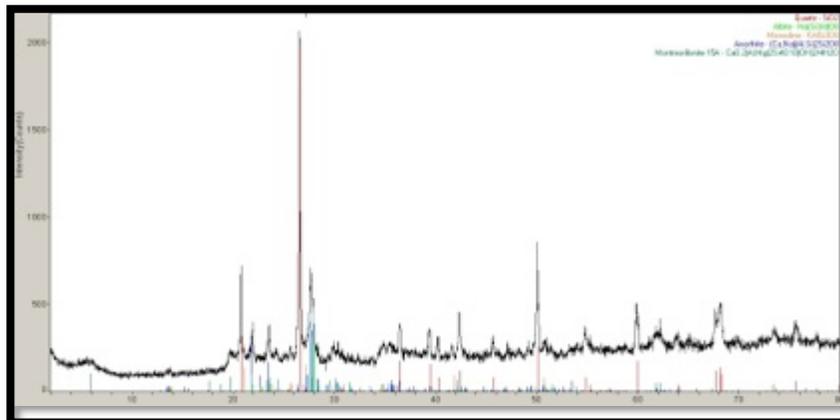


Figura 54. Difractograma en MTA obtenida del tramo 15.12-15.90 m, donde se ubica la muestra MI-Ir2-15.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

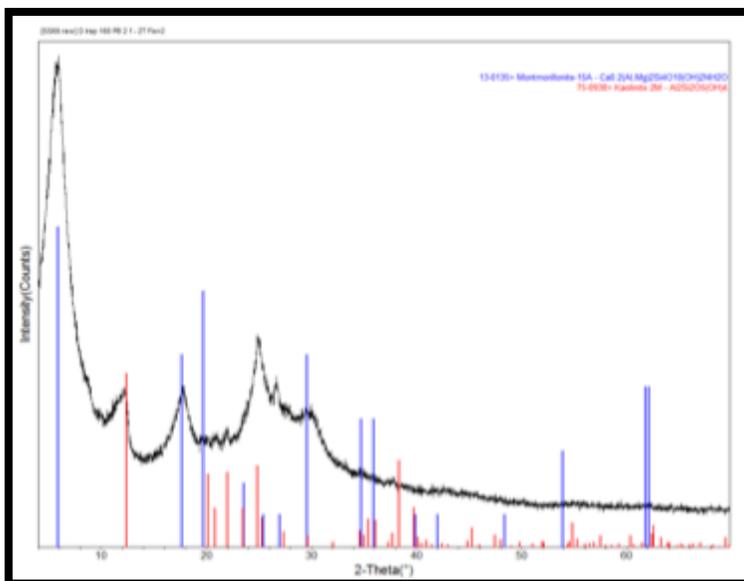


Figura 55. Difractograma en FAI de la muestra MI-Ir2-15.60 del sondeo realizado en Irapuato. Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita(en rojo). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).



En la Figura 56 se presentan microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la **FAI** de la muestra MI-Ir2-15.60 donde se observan morfologías laminares menores a 50 μm .

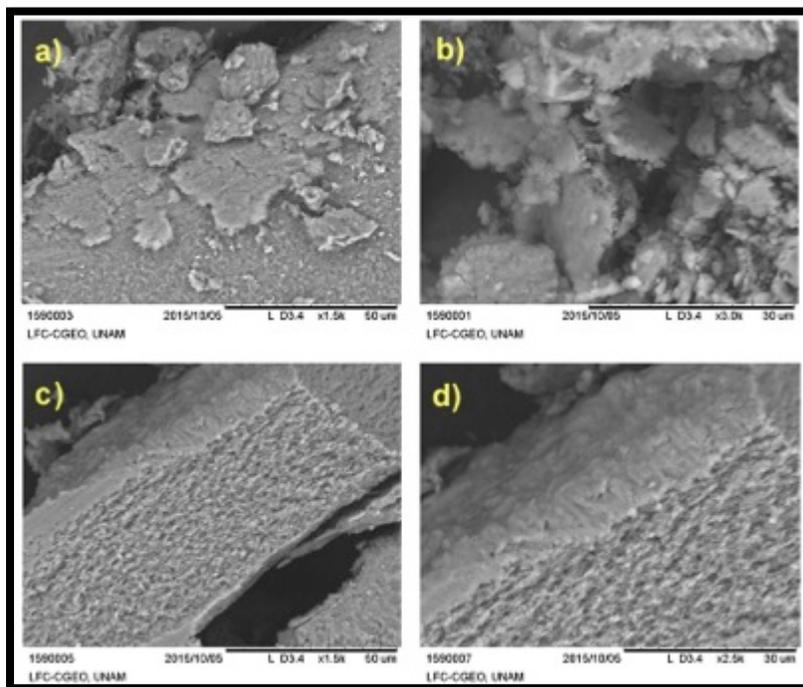


Figura 56. Microfotografías de SEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MI-Ir2-15.60. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares menores a 50 μm .

Muestra MJ-Ir2-16.80

La Figura 57 se muestra la ampliación del tramo 16.25-16.95 m, donde se ubica la muestra MJ-Ir2-16.80. El tramo presentado por una intercalación de limo (café) y arcilla (negra). También se muestra fotografía que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba.

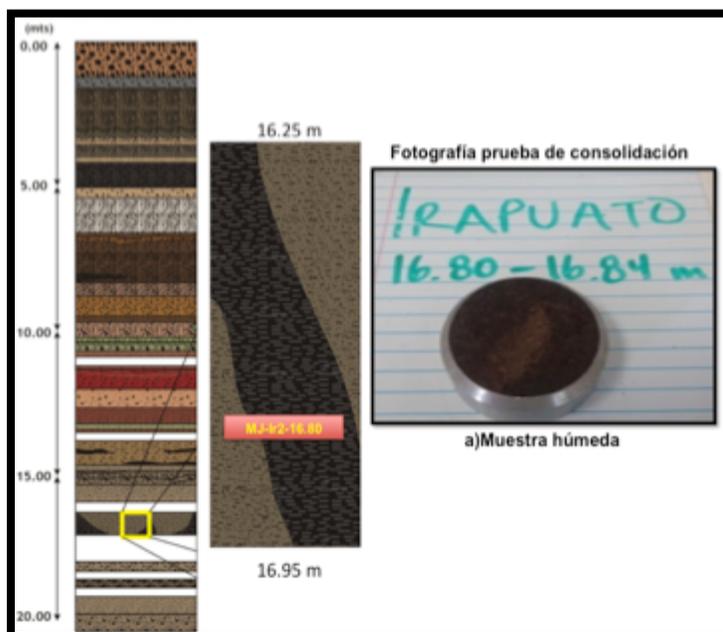


Figura 57. Amplificación del tramo 16.25-16.95 m, donde se ubica la muestra MJ-Ir2-16.80 del sondeo realizado en Irapuato. El tramo presentado por una intercalación de limo (café) y arcilla (negra). Se muestra fotografía que corresponden a la muestra sometida a la prueba de consolidación; en a) muestra húmeda antes de la prueba.

El patrón de difracción de rayos X de la muestra total alterada (**MTA**), tomada del tramo 16.25-16.95 m, donde se ubica la muestra MJ-Ir2-16.80 se presenta en la Figura 58. Se identificaron las fases cristalinas de cuarzo, albita, anortita y microclina, y la presencia de una fase arcillosa. La fase arcillosa se identificó en **FAI** de la muestra MJ-Ir2-16.80 en la cual se observó el registro de montmorillonita y caolinita (ver Figura 59).

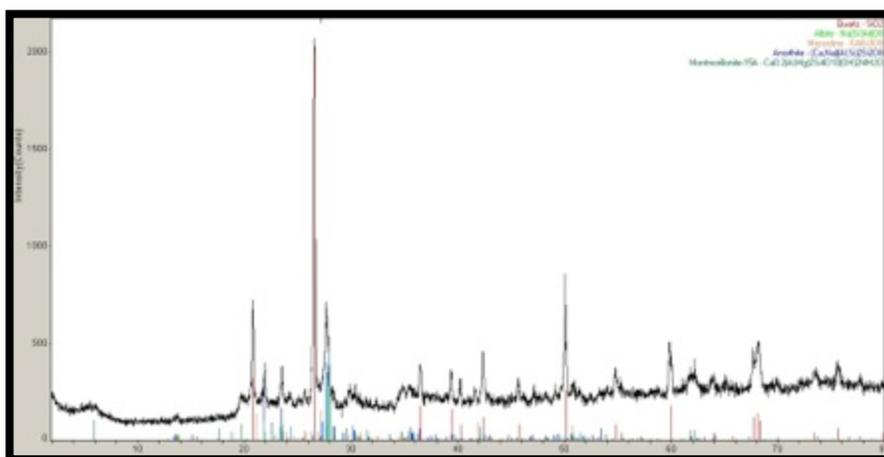


Figura 58. Difractograma en MTA obtenida del tramo 16.25-16.95 m, donde se ubica la muestra MJ-Ir2-16.80 del sondeo realizado en Irapuato. Se identificaron las fases minerales cuarzo (en rojo), anortita (en azul), albita (en verde), microclina (en naranja) y probables arcillas (en verde oscuro). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

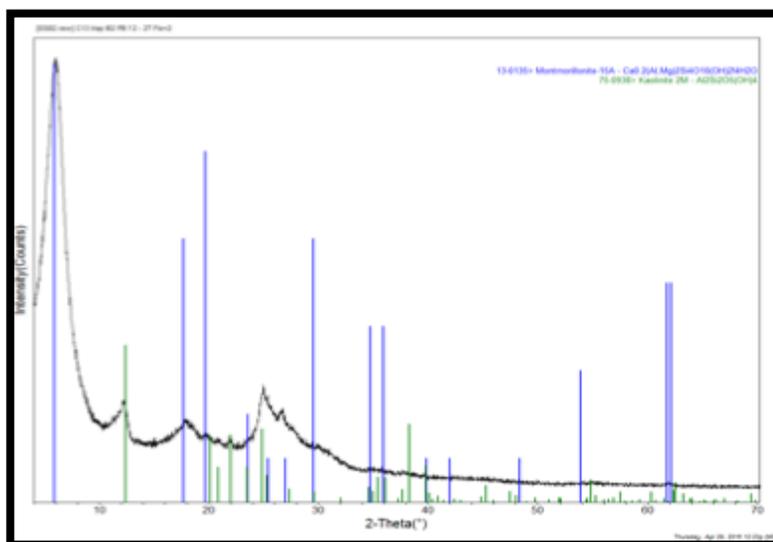


Figura 59. Difractograma en FAI de la muestra MJ-Ir2-16.80, del sondeo realizado en Irapuato. . Se observa la presencia de montmorillonita (en azul) y caolinita(en verde). En el eje de las abscisas se tiene la Intensidad en unidades arbitrarias (u.a.).

La Figura 60 muestra microfotografías de TEM de la muestra MI-Ir2-16.80, observan morfologías de laminares de 50 a 200 nm correspondientes a las arcillas identificadas por DRX.

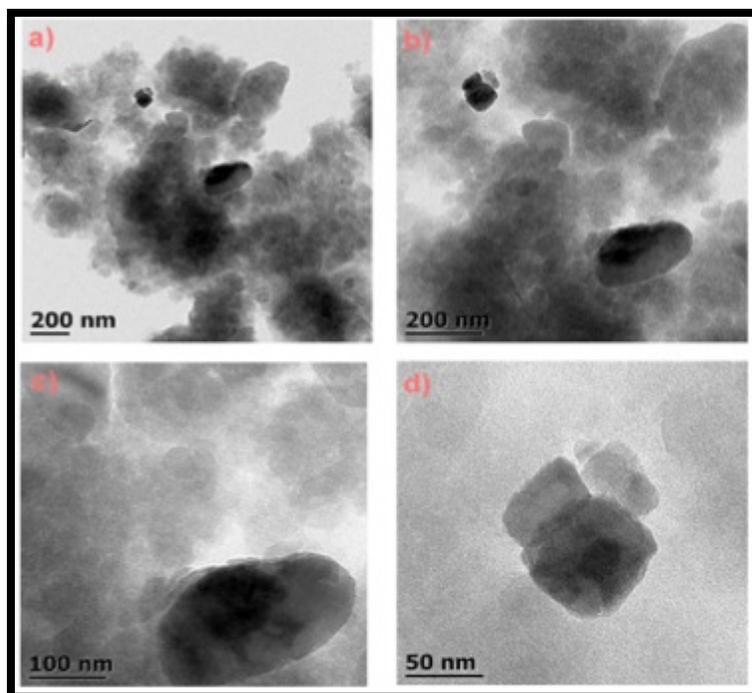


Figura 60. Microfotografías de TEM a diferentes ampliaciones de la fracción arcillosa de la muestra intacta (FAI) MJ-Ir2-16.80. En (a), (b), (c) y (d) se observan morfologías laminares de entre 50 y 200 nm.



La Tabla 5, muestra los resultados e indican que los principales minerales que componen a las cinco muestras analizadas en MTA por DRX son: cuarzo, albita, anortita, microclina y en FAI la presencia de minerales de arcilla de montmorillonita y caolinita. En SEM y/o TEM muestran morfologías laminares.

Tabla 5. Se presentan los resultados de la mineralogía del sondeo realizado en Irapuato para las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, en los análisis de DRX de MTA y de FAI. De igual manera se presentan los resultados de la morfología observada en los análisis de SEM y/o TEM en FAI.

Muestra	DRX en MTA	DRX en FAI	Morfología SEM en FAI	Morfología TEM en FAI
MF-Ir3-7.07	Cuarzo, albita, microclina, anortita y posibles arcillas	Montmorillonita 15 A, caolinita, montmorillonita 18 A.	Laminar de aprox. 50 a 25 μm posiblemente montmorillonita y/o caolinita	No se analizo
MG-Ir3-8.60		Montmorillonita 15 A, caolinita	No se analizo	Laminar menores a 200nm de longitud
MH-Ir3-10.85			Laminar de 30 a 50 μm de longitud.	Laminares de 100 a 300 nm de longitud
MI-Ir2-15.60			Laminar de aprox. 50 μm	Laminares de aprox. 300 nm
MJ-Ir2-16.80			No se analizo	Laminares de aproximadamente 50 y 200 nm

VII.2.3 Caracterización mecánica

VII.2.3.1 Límites de consistencia

VII.2.3.1.1 Sitio Tláhuac

Los resultados de los límites de consistencia y la clasificación SUCS de las cinco muestras analizadas en el sondeo realizado en Tláhuac, se muestran en la Tabla 6. En la Figura 62 se muestra el perfil de la secuencia estudiada (Tláhuac) indicando gráficamente los límites en condiciones de humedad natural y cuando se secan al aire libre y se rehumedecen según la norma ASTM D4318-95a, 98.

Los resultados indican variaciones en el índice de plasticidad en condiciones de humedad natural de 61 a 238 % y después de dejarse secar al aire libre y rehumedecerse con variaciones de 18 a 45 % , lo que indica disminuciones de hasta 81%. En la Figura 61, se muestra la Carta de Plasticidad para la clasificación SUCS, que indica que todos los materiales de las muestras analizadas se encuentran dentro de la clasificación MH (limos de alta plasticidad), pero su alto contenido de materia orgánica (ver Tabla 2), indica que son materiales orgánicos de alta plasticidad(OH).



Tabla 6. Resultados de los límites de consistencia de las cinco muestras analizadas en condiciones de humedad natural y según la norma ASTM D4318-95a, 98 (seco y rehumedecido), del sondeo realizado en Tláhuac. Donde; LL: límite líquido, LP: límite plástico e IP: es índice de plasticidad. Los resultados presentan variaciones de índice de plasticidad de húmedo a seco con disminuciones de hasta 81 %. La clasificación SUCS indica que todos los materiales son orgánicos de alta plasticidad (OH).

Tláhuac	Propiedades Mecánicas							
	Límites de Consistencia (Húmedo) en (%)			Límites de Consistencia (Seco) en (%)			IP Disminución (%)	SUCS Seco/Húmedo
	LL	LP	IP	LL	LP	IP		
Muestra								
MA-T3-H6-12	133.50	72.33	61.17	76.00	57.07	18.93	69.00	OH/OH
MB-T4-H10-17	335.00	157.50	177.50	122.80	89.28	33.52	81.10	OH/OH
MC-T5-H11-22.55	213.00	98.87	114.13	95.25	67.43	27.82	75.60	OH/OH
MD-T5-H11-22.85	405.00	167.00	238.00	136.20	90.46	45.74	80.78	OH/OH
ME-T5-H11-23.31	222.50	99.71	122.79	123.60	81.96	41.64	66.00	OH/OH

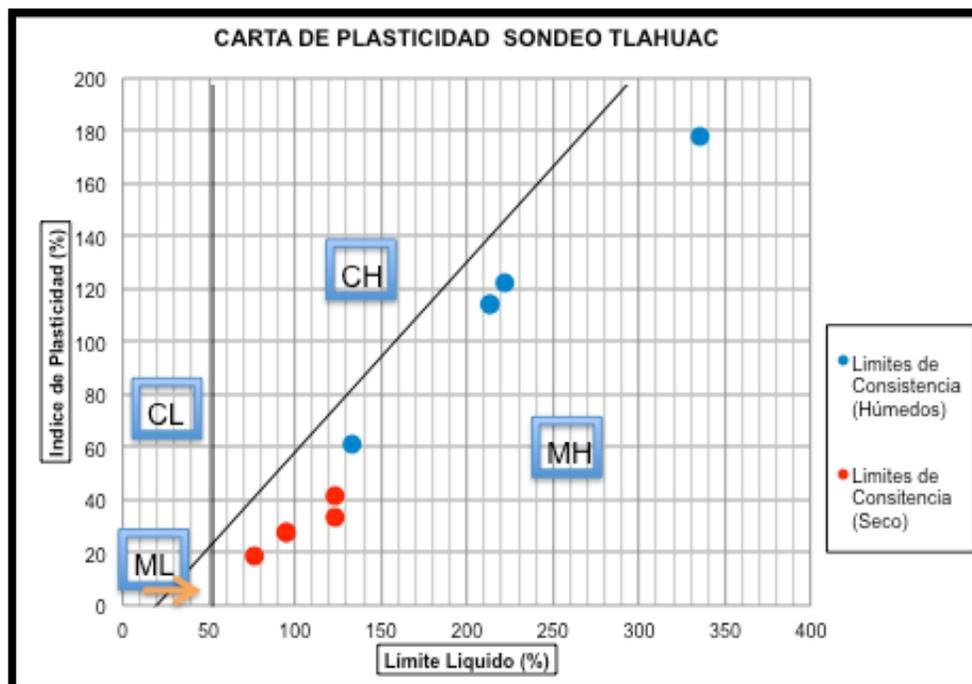


Figura 61. Límites de consistencia del sondeo realizado en Tláhuac, ubicados en la Carta de Plasticidad para su clasificación SUCS. Todos los materiales de las muestras analizadas se encuentran dentro de la clasificación de MH (limos de alta plasticidad), pero su alto contenido de materia orgánica indica que son materiales orgánicos de alta plasticidad (OH).

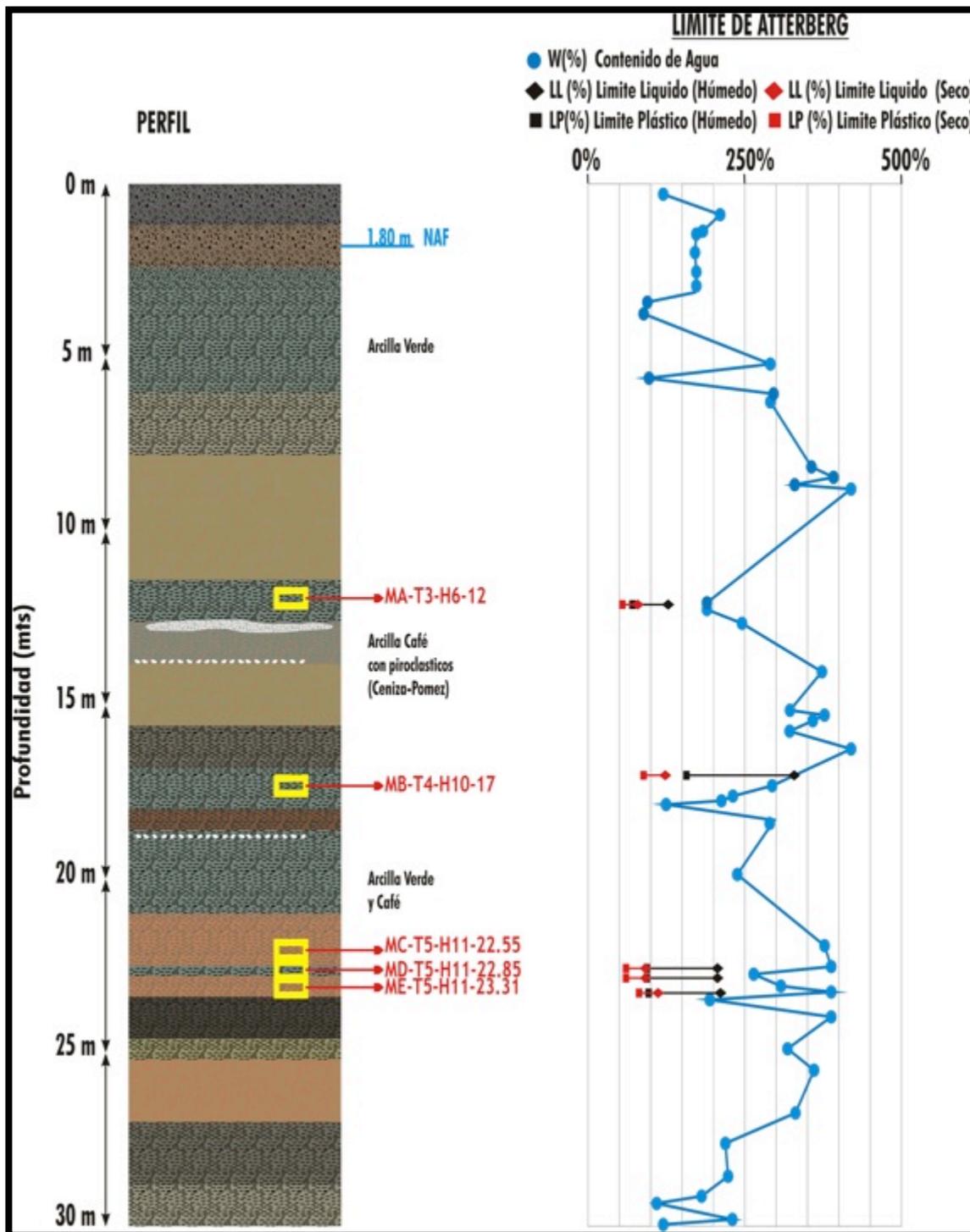


Figura 62. Perfil del sondeo realizado en Tláhuac con la variación de límites de consistencia a diferentes profundidades bajo condiciones de humedad natural (línea negra) según la norma ASTM (línea roja). Los límites líquidos se marcan con un cuadro y los plásticos con un rombo. Se puede observar la disminución general del índice de plasticidad al realizar los análisis según la norma ASTM, que en condiciones de humedad natural en prácticamente toda la secuencia es mayor a su límite líquido.



VII.2.3.1.2 Sitio Irapuato

En la Tabla 7, se muestran los resultados de los límites de consistencia de las cinco muestras analizadas del sondeo realizado en Irapuato. En la Figura 64, se muestra el perfil de la secuencia estudiada indicando gráficamente los límites en condiciones de humedad natural y según la norma ASTM D4318-95a, 98 (la muestra se deja secar al aire libre y se rehumedece).

Los resultados muestran índices de plasticidad en húmedo con valores de 10 hasta 27 % y en según la norma ASTM D4318-95a, 98 de 18 hasta 63 %. Como se muestra en la Tabla 7, se observa un aumento del IP de hasta 150 % para la muestra MH-Ir3-10.85. Los resultados obtenidos según la clasificación SUCS en condiciones de humedad natural como materiales arcillosos de baja plasticidad a excepción de la muestra MH-Ir3-10.85, que son arcillas de alta plasticidad. La clasificación SUCS según la norma D4318-95a, 98 (secos y rehumedecidos), se clasifican como arcillas de alta plasticidad a excepción de la muestra MG-Ir3-8.60 que son arcillas de baja plasticidad (ver Figura 63).

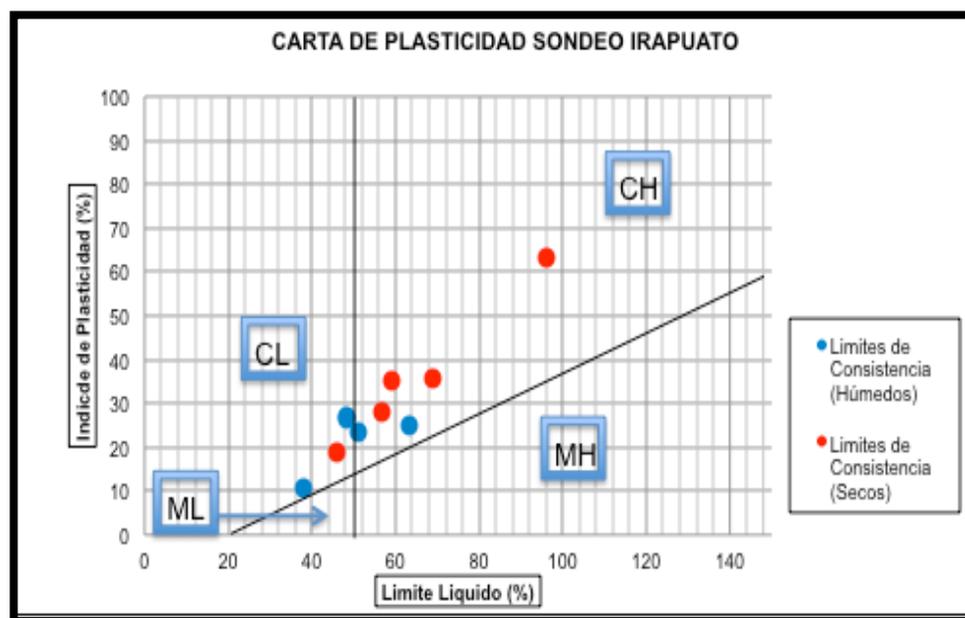


Figura 63. Límites de consistencia del sondeo realizado en Irapuato ubicados en la Carta de Plasticidad para su clasificación SUCS. Los materiales de las muestras analizadas se encuentran dentro de la clasificación de arcillas de baja plasticidad en estado húmedo a excepción de la muestra MH-Ir3-10.85 que es un arcilla de alta plasticidad y arcillas de alta plasticidad a excepción de la muestra MG-Ir3-8.60.

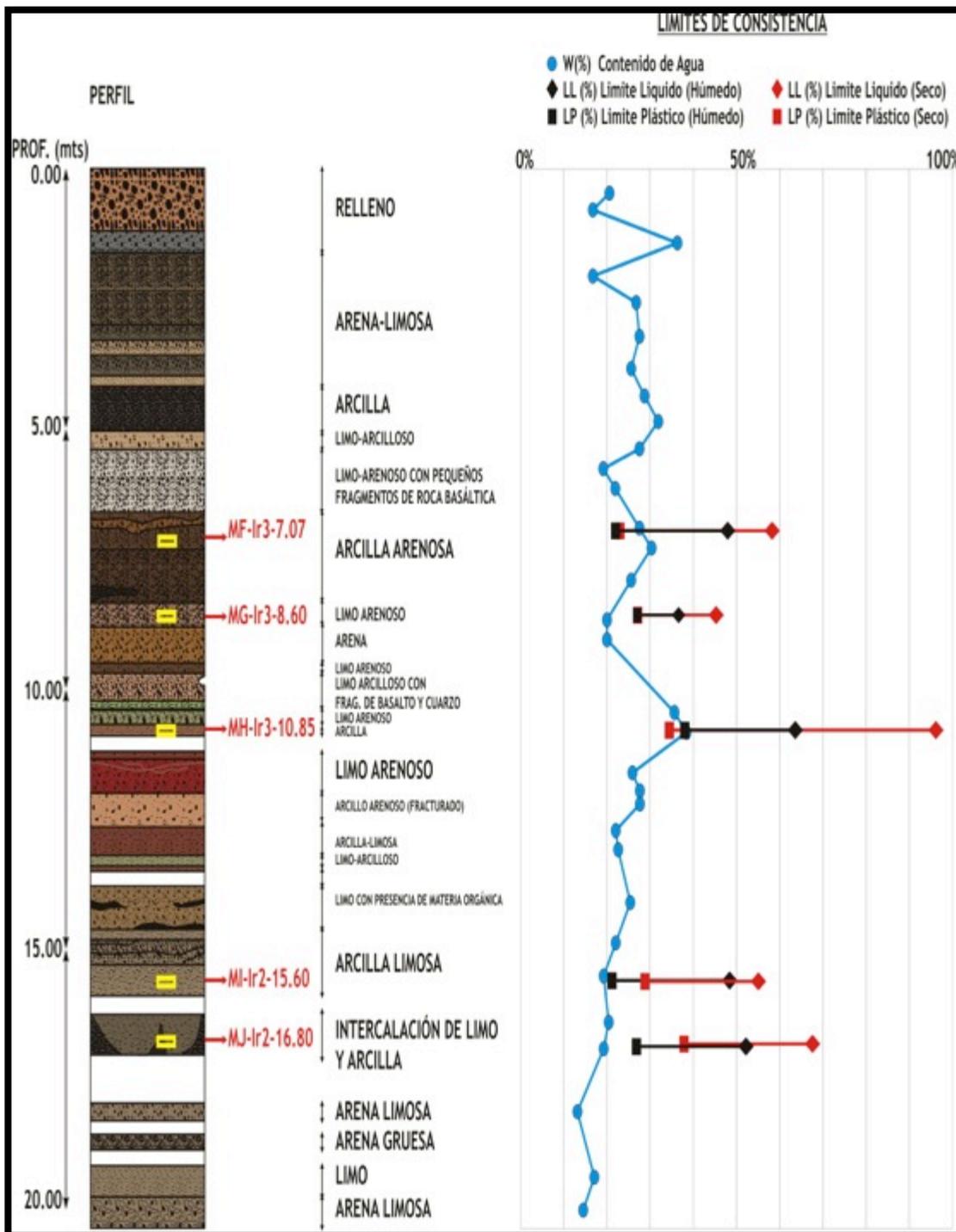


Figura 64. Perfil del sondeo realizado en Irapuato que presenta la variación de límites de consistencia de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, bajo condiciones de humedad natural (línea negra) y según la norma ASTM (línea roja). Los límites líquidos se marcan con un rombo y los plásticos con un cuadro. Se puede observar el aumento general del índice de plasticidad según la norma ASTM, que las muestras en condiciones de humedad natural en prácticamente toda la secuencia es menor a su límite líquido.



Tabla 7. Resultados de las pruebas de límites de consistencia de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80, en condiciones de humedad natural y según la norma ASTM D4318-95a, 98, así como su clasificación SUCS. Donde; LL es límite líquido, LP es límite plástico e IP es índice de plasticidad. Presentan variaciones de índice de plasticidad de seco (rehumedecidas) a húmedo con aumentos de hasta 150 %, la clasificación SUCS indica que los suelos son CL y CH.

IRAPUATO	Propiedades Mecánicas						Aumento %	SUCS Húmedo/ Seco
	Límites de consistencia (Húmedo) en (%)			Límites de consistencia (Seco) en (%)				
Profundidad (m)	LL	LP	IP	LL	LP	IP		
MF-Ir3-7.07	48.1	21.75	26.3	59.2	23.88	35.3	17	CL/CH
MG-Ir3-8.60	37.9	27.42	10.5	46.0	27.1	18.9	40	CL/CL
MH-Ir3-10.85	63.2	38.02	25.2	96.2	33.2	63.0	150	CH /CH
MI-Ir2-15.60	48.5	21.45	27.1	56.6	28.8	27.9	1.4	CL/CH
MJ-Ir2-16.80	51.5	27.64	23.9	68.9	33.6	35.4	48	CL/CH

VII.2.3.2 Propiedades índice

VII.2.3.2.1 Sitio Tláhuac

El análisis de propiedades índice, se realizó a partir de las muestras total intactas (MTI). En la Figura 65, se muestran fotografías de las muestras utilizadas (MTI) para el cálculo de estas propiedades.

Como ya se menciona, las propiedades índice son propiedades de uso ingenieril. En este trabajo se calculo la porosidad (%), relación de vacíos (adimensional), contenido de agua volumétrica (%), y contenido de agua gravimétrico o humedad (%).

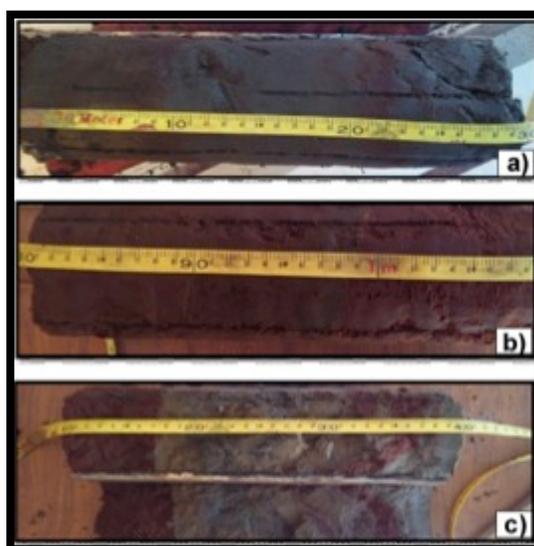


Figura 65. Fotografías de material recuperado en tubo Shelby (MTI) del sondeo realizado en Tláhuac a distintas profundidades (a) 17.0-17.30 m; (b) 22.8-23.10 m; y (c) 23.10-23.40 m.



En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para porosidad (n), relación de vacíos (e), agua volumétrica (Wv) y humedad natural de las cinco muestras analizadas con humedad natural al abrir el núcleo, los resultados reflejan variaciones en porosidad de 73% a 88%; relaciones de vacíos de 2.72 a 5.65; contenido de agua volumétrica entre 75 y 87%; y humedad natural de 187 a 307 % (Ver Figura 66).

Tabla 8. Propiedades índice en muestras con humedad natural al abrir el núcleo del sondeo realizado en Tláhuac; donde n: porosidad, e: relación de vacíos, %Wv: contenido de agua volumétrica y humedad natural.

Tláhuac	Propiedades Índice			
Muestra	n (%)	e	% Wv	Humedad (%)
MA-T3-H6-12	79.50	3.88	82.81	187.15
MB-T4-H10-17	81.03	4.27	81.39	227.0
MC-T5-H11-22.55	82.36	4.75	76.00	260.44
MD-T5-H11-22.85	88.40	5.65	87.00	307.70
ME-T5-H11-23.31	73.10	2.72	75.16	199.25

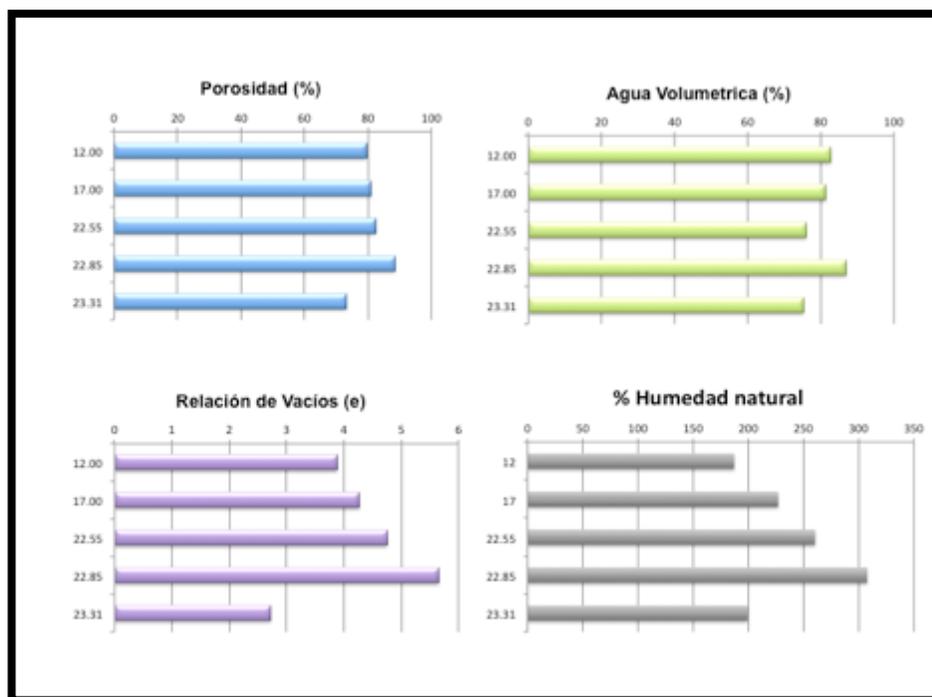


Figura 66. Gráficos de propiedades índice de las muestras analizadas (MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31) del sondeo realizado en Tláhuac, donde se muestra la variación con la profundidad de la porosidad, contenido de agua volumétrica en %; la relación de vacíos (sin unidades) y humedad natural (%).



VII.2.3.2.2 Sitio Irapuato

Al igual que el sitio de estudio Tláhuac, las propiedades índice se realizaron de muestra total intacta (MTI), en la Tabla 9 y Figura 67, se muestran los resultados de porosidad (n) con valores entre 32.8 y 41.15; relaciones de vacíos (e) entre 0.49 y 0.7; agua volumétrica entre 33 y 40 %; y humedad natural de 20 a 33.2 %.

Tabla 9. Propiedades índice en muestras con humedad natural al abrir el núcleo donde n : porosidad, e : relación de vacíos, %Wv: contenido de agua volumétrica; y humedad natural, para las muestras analizadas en el sitio de Irapuato.

Irapuato	Propiedades Índice			
	n (%)	e	% Wv	Humedad (%)
Profundidad (m)				
MF-Ir3-7.07	40.1	0.67	40.29	29.3
MG-Ir3-8.60	38.3	0.62	35.65	20.5
MH-Ir3-10.85	32.8	0.49	33.02	33.2
MI-Ir2-15.60	40.0	0.67	34.93	32.5
MJ-Ir2-16.80	41.1	0.7	38.07	20.4

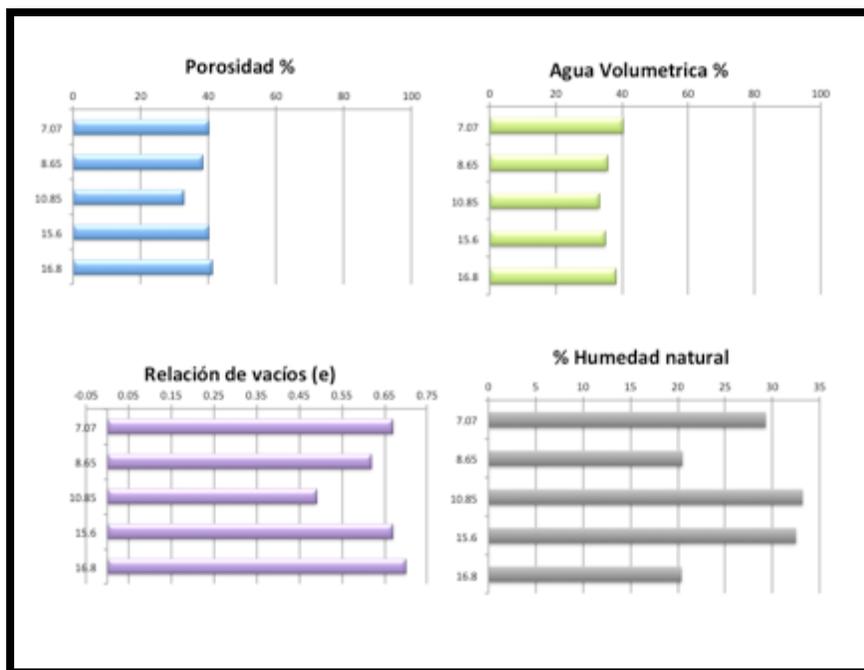


Figura 67. Gráficos donde se muestra la variación con la profundidad de la porosidad y contenido de agua volumétrica en %; la relación de vacíos y humedad natural, para las muestras analizadas del sondeo realizado en Irapuato.



VII.2.3.3 Compresibilidad

VII.2.3.3.1 Sitio Tláhuac

Las pruebas mecánicas se realizaron para cada una de las muestras analizadas MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. Se realizó para cada muestra su curva de compresibilidad y se calculó el índice de compresibilidad (C_c) y la razón de sobreconsolidación (*Over Consolidated Ratio*, OCR); las muestras presentan C_c de 0.04 a 3.48 y OCR de 1 a 3.1 (ver Tabla 10).

En la Figura 68, se muestran las curvas de compresibilidad de las muestras MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. En a) se muestra la curva de MA-T3-H6-12 que tiene un tramo de pre-consolidación de 0.52 Kg/cm^2 , un índice de compresibilidad de 0.04 y un OCR de 2.77, lo que indica que es un material pre-consolidado. En b) la curva de MB-T4-H10-17, esta no presenta tramo de pre-consolidación, tiene un índice de compresibilidad de 0.62 y un OCR de 1, lo que indica que es un material normalmente consolidado. En c) la curva de MC-T5-H11-22.55, no presenta tramo pre-consolidación, tiene un índice de compresibilidad de 1.56, lo que indica que es compresible comparado con los materiales de MA-T3-H6-12 y MB-T4-H10-17. Tiene un OCR de 1 por lo que es un material normalmente consolidado. En d) la curva de la muestra MD-T5-H11-22.85, no presenta tramo de pre-consolidación, tiene un índice de compresibilidad de 3.48, lo que indica que es compresible comparado con los materiales de MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17 y MC-T5-H11-22.55. Tiene un OCR de 1 por lo que es un material normalmente consolidado. En e) la curva ME-T5-H11-23.31 tiene un tramo de pre-consolidación de 0.28 Kg/cm^2 , tiene un índice de compresibilidad de 0.98, lo que indica que es compresible comparado con los materiales de MA-T3-H6-12 y MB-T4-H10-17 pero menos compresible que los materiales de las profundidades MC-T5-H11-22.55 y MD-T5-H11-22.85. Tiene un OCR de 10.6, y se considera un material pre-consolidado.

Tabla 10. Se muestran los resultados de los índices de compresibilidad (C_c) y la razón de sobre consolidación (OCR) las muestras analizadas del sondeo Tláhuac.

Muestra	Compresibilidad	
	C_c	OCR
MA-T3-H6-12	0.04	2.7
MB-T4-H10-17	0.62	1
MC-T5-H11-22.55	1.56	1
MD-T5-H11-22.85	3.48	1
ME-T5-H11-23.31	0.98	10.6

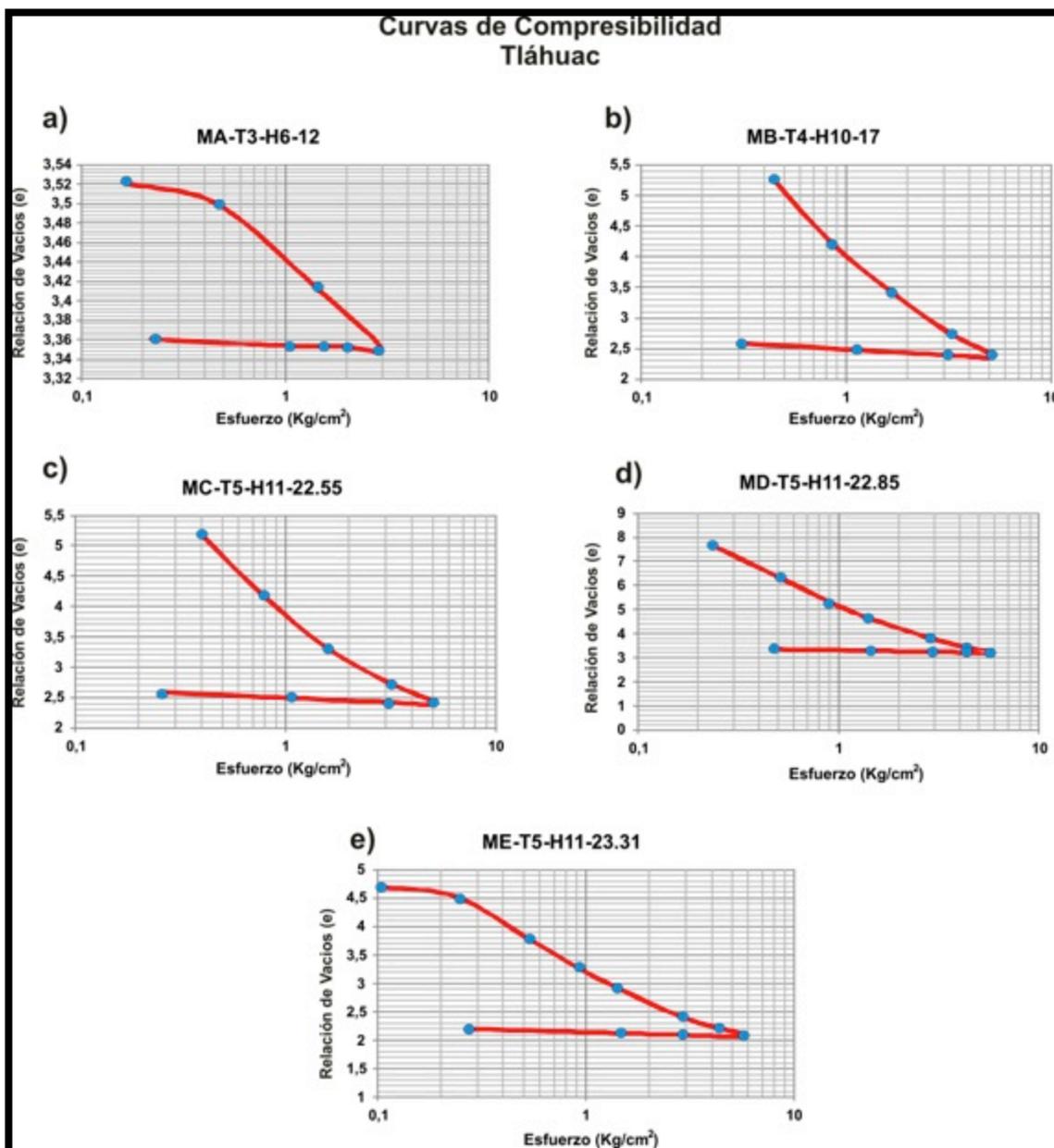


Figura 68. Curvas de compresibilidad de las muestras analizadas en el sitio Tláhuac; en a) MA-T3-H6-12, b) MB-T4-H10-17, c) MC-T5-H11-22.55, d) MD-T5-H11-22.85 y e) ME-T5-H11-23.31. Las graficas presentan en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm²) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos. Las curvas (a) y (e) con una presión de consolidación es de 0.52 y 0.28 Kg/cm² respectivamente. Las curvas (b), (c) y (d) no presentan tramo de preconsolidación.



En la Figura 69 se muestran las curvas de compresibilidad de las muestras MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31. En esta figura todas las curvas de compresibilidad en el eje de las abscisas tienen la misma escala con el fin de observar claramente las diferencias de compresibilidad. Como se puede observar en a) la muestra MA-T3-H6-12 es la menos compresible y en d) la muestra mas compresible MD-T5-H11-22.85.

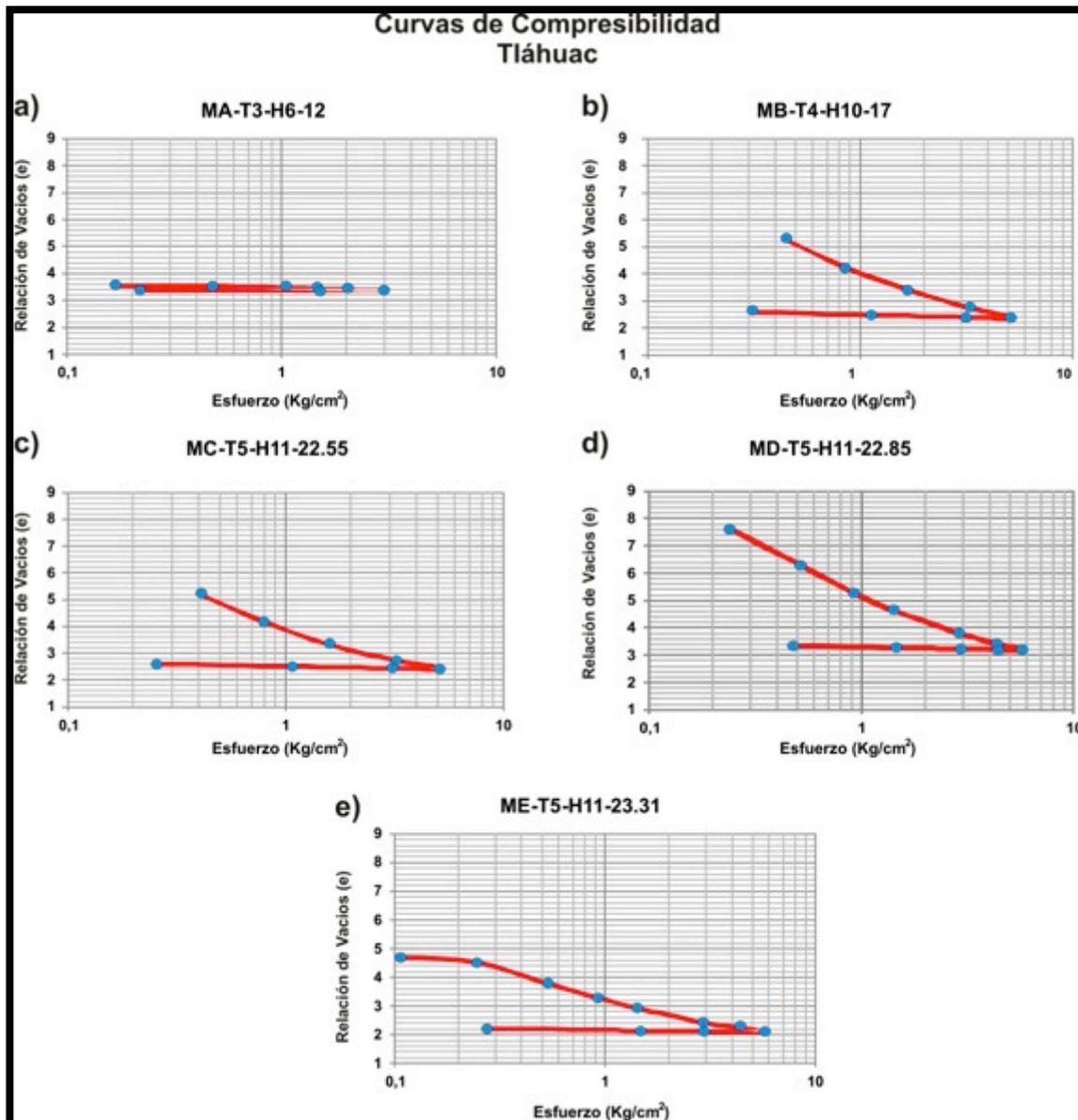


Figura 69. Curvas de compresibilidad de las muestras analizadas en el sitio Tiáhuac; en (a) MA-T3-H6-12, (b) MB-T4-H10-17, (c) MC-T5-H11-22.55, (d) MD-T5-H11-22.85 y (e) ME-T5-H11-23.31. Las graficas presentan en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm²) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos (en el mismo rango). Como se puede observar la curva de MA-T3-H6-12, es la menos compresible y la curva de MD-T5-H11-22.85 es la mas compresible.



VII.2.3.3.2 Sitio Irapuato

Al igual que el sondeo realizado en Tláhuac las pruebas mecánicas se realizaron para cada una de las muestras analizadas MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80. Se realizó para cada muestra su curva de compresibilidad y se calculó el índice de compresibilidad (C_c) y la razón de sobreconsolidación (*Over Consolidated Ratio*, OCR); que presentan C_c con variaciones de 0.02 a 0.486 y OCR de 1 a 3.6 (ver Tabla 11). Todas las muestras a excepción de MF-Ir3-7.07, indican que el esfuerzo actual es menor que algún esfuerzo de la historia geológica de estos materiales.

En la Figura 70, se muestran las curvas de compresibilidad de las muestras analizadas: en MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80. En a) se muestra la curva de MF-Ir3-7.07, la curva no presenta tramo de pre-consolidación; tiene un índice de compresibilidad de 0.48 y un OCR de 1 por lo que es un material normalmente consolidado. En b) se muestra la curva de MG-Ir3-8.60, la curva tiene una presión de pre-consolidación de 1.3 Kg/cm²; un índice de compresibilidad de 0.03 y un OCR de 1.26, por lo que es un material pre-consolidado. En c) se muestra la curva de MH-Ir3-10.85, la curva tiene una presión de pre-consolidación de 1.1 Kg/cm²; un índice de compresibilidad de 0.1 y un OCR de 1.8, por lo que es un material pre-consolidado. En d) se muestra la curva de MI-Ir2-15.60, la curva tiene una presión de pre-consolidación de 1.1 Kg/cm²; un índice de compresibilidad de 0.02 y un OCR de 2.6, por lo que es un material pre-consolidado. En e) se muestra a la curva de MJ-Ir2-16.80, la curva tiene una presión de pre-consolidación de 1.1 Kg/cm²; un índice de compresibilidad de 0.02 y un OCR de 2.7, por lo que es un material pre-consolidado.

Tabla 11. Se muestran los resultados de los índices de compresibilidad (C_c) y la razón de sobreconsolidación (OCR) las muestras analizadas del caso Irapuato.

Muestra	Compresibilidad	
	Índice de Compresibilidad (C_c)	OCR
MF-Ir3-7.07	0.48	1.0
MG-Ir3-8.60	0.03	1.2
MH-Ir3-10.85	0.10	1.8
MI-Ir2-15.60	0.02	2.6
MJ-Ir2-16.80	0.02	2.7

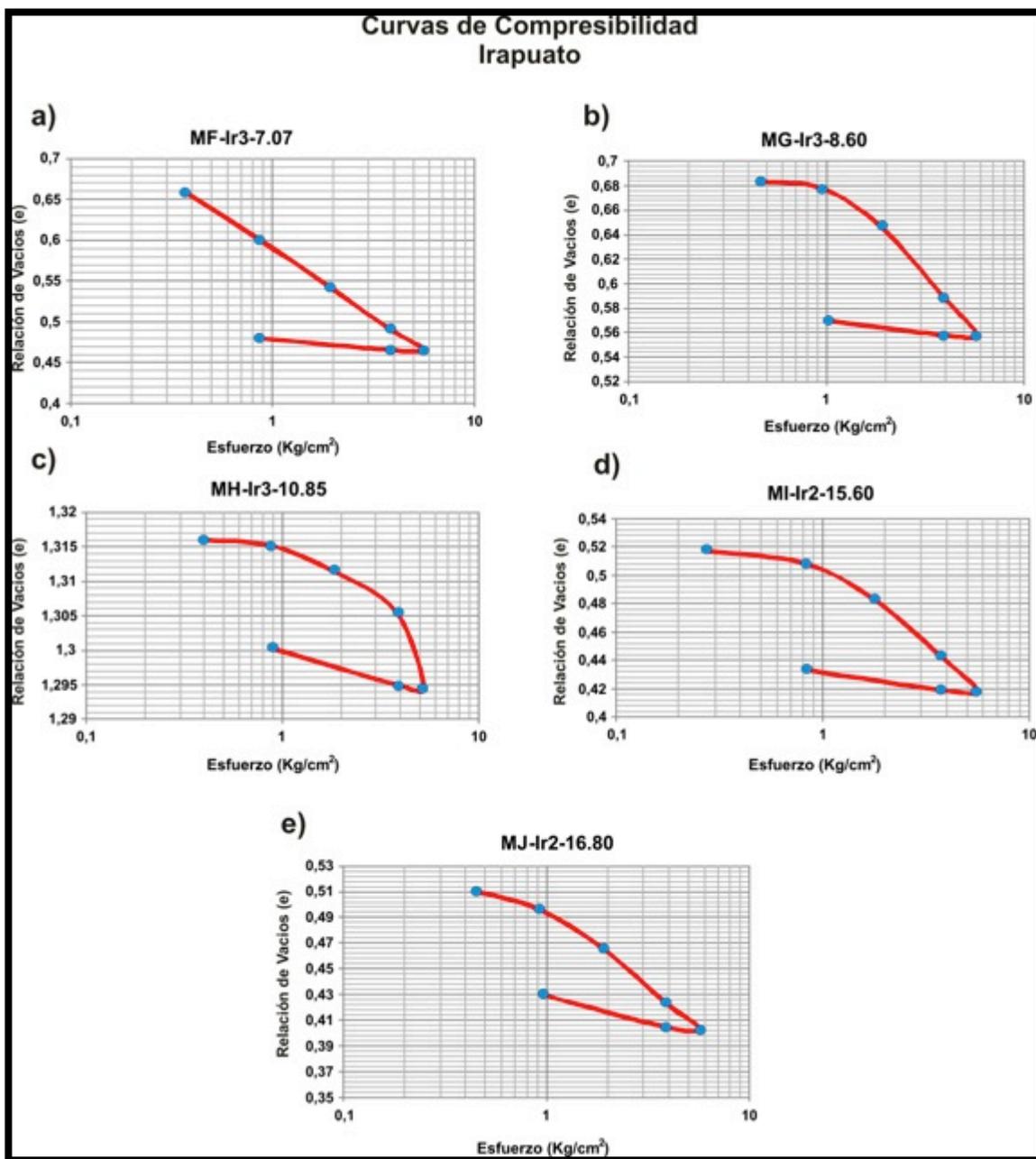


Figura 70. Curvas de compresibilidad de las muestras en a) MF-Ir3-7.07, b) MG-Ir3-8.60, c) MH-Ir3-10.85, d) MI-Ir2-15.60 y e) MJ-Ir-16.80 del sitio Irapuato. Las graficas presenta en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm²) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos. La curva a) no presenta tramo de pre-consolidación. En b), c), d) y e) las curvas con una presión de consolidación de 1.3, 1.2, 1.0 y 1.2 Kg/cm² respectivamente.



En la Figura 71 se muestran las curvas de compresibilidad de las muestras MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80. En esta figura todas las curvas de compresibilidad en el eje de las abscisas tienen la misma escala con el fin de observar claramente las diferencias de compresibilidad, aunque la secuencia de Irapuato presenta bajos C_c comparados con Tláhuac.

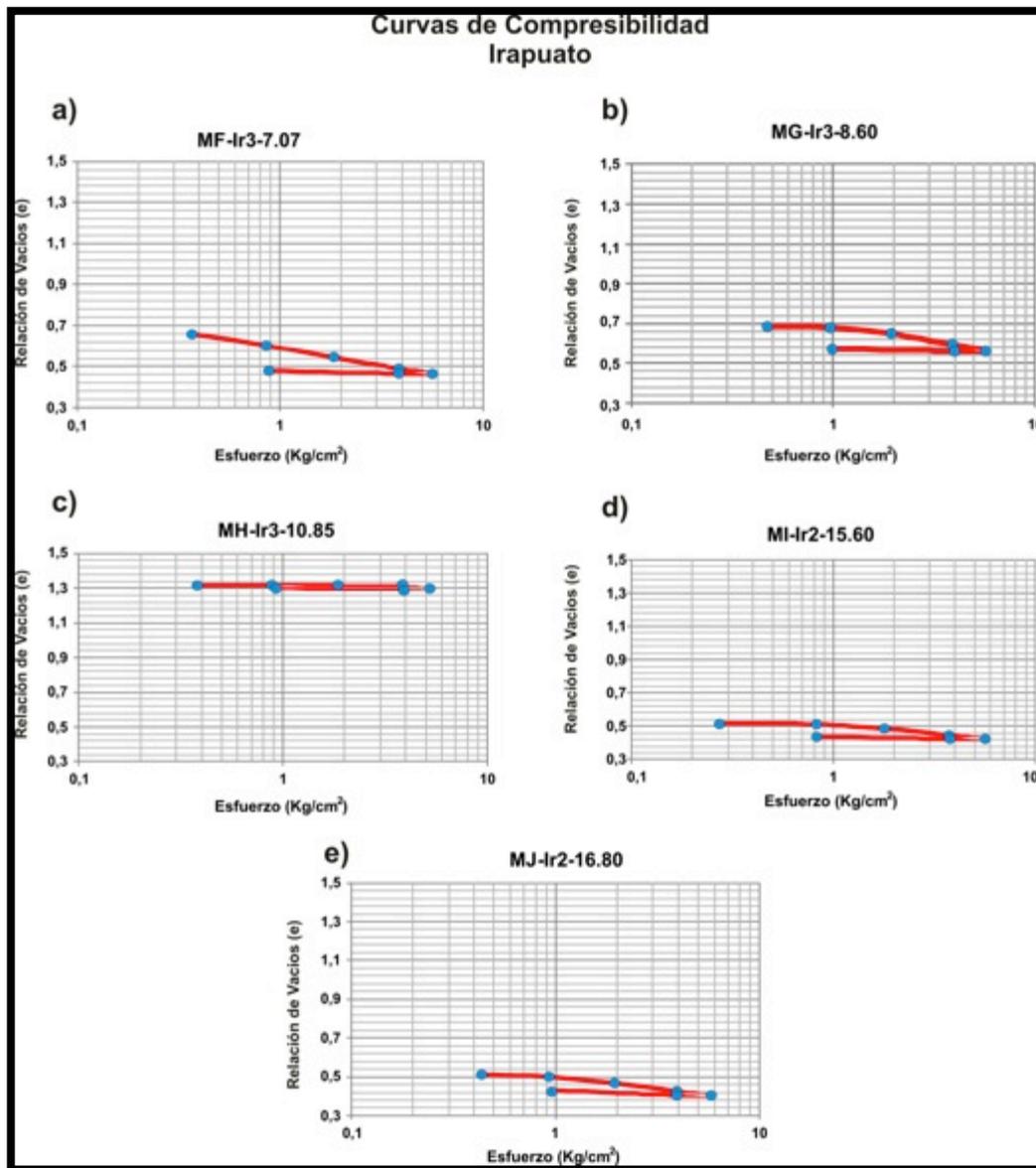


Figura 71. Curvas de compresibilidad de las muestras analizadas en el sitio Irapuato; en a) MF-Ir3-7.07, b) MG-Ir3-8.60, c) MH-Ir3-10.85, d) MI-Ir2-15.60 y e) MJ-Ir2-16.80. Las graficas presenta en el eje de las abscisas al esfuerzo (Kg/cm²) y el eje de las ordenadas la relación de vacíos (en el mismo rango). Se muestra que las curvas de compresibilidad a la misma escala con el fin de observar las diferencias de compresibilidad.



Capítulo VIII Discusión

En el presente trabajo se realizó la caracterización de dos secuencias fluvio-lacustres con el fin de hacer énfasis en su origen como factor determinante para su comportamiento mecánico. Se realizó la caracterización física, fisicoquímica, mineralógica y mecánica de cinco muestras para cada sitio de estudio (Tláhuac e Irapuato).

La secuencia estudiada de 30 m de profundidad en la Ciudad de México en la Delegación Tláhuac es principalmente de origen lacustre que tuvo periodos en los que el nivel del lago disminuía o aumentaba causado por lluvias y/o sequias además de estar asociado a posibles depósitos fluviales que se relacionan a las distintas variaciones de las condiciones de oxido reducción (REDOX) a lo largo de la secuencia por lo que los materiales esperados y encontrados son en su mayoría limos (limo-arenosos a limo-arcillosos, ver Tabla 2. Es importante remarcar que las arenas identificadas en esta secuencia pueden corresponden a cenizas volcánicas y otros materiales piroclásticos que están constituidos principalmente por sílice, esta composición afecta la velocidad de intemperismo (Herrera, 2007) debido a que estos minerales tienen menor resistencia por lo tanto es mas fácil su desintegración. Uno de los principales componentes en la ceniza volcánica es el vidrio, y en una secuencia de meteorización típica, el vidrio volcánico se transforma en alófono, halloysita, metahalloysita, caolinita y montmorillonita (Fisher y Schmincke, 1984).

La caracterización fisicoquímica de las muestras estudiadas en la secuencia MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31, presentan humedad natural alta, que varía de 187 a 307 %, por lo que se consideran materiales saturados; pH de 9.66 a 10.5 y conductividad eléctrica de 1470 a 3470 dS/m que están asociados al alto contenido de sales, en todas las muestras analizadas a excepción de la muestra MA-T3-H6-12, tienen el mismo comportamiento por lo que se puede decir que estas propiedades se mantienen en la secuencia estudiada; carbono orgánico de 2.15 a 6.45 % se considera alto y congruente de acuerdo a su origen (lacustre) y densidad real de 2.05 a 2.27 gr/cm³, que indica que los materiales provienen de materiales de composición acida, esto puede estar asociado a la baja resistencia de los materiales cuando se realizó la prueba SPT

Los resultados de la caracterización mineralógica de las cinco muestras estudiadas por DRX en muestras totales alteradas (MTA), presentan registros minerales que componen a los diferentes horizontes principalmente de calcita, anortita y cuarzo. El



análisis de DRX de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) para cada muestra analizada indica la presencia de fases minerales pobremente cristalizadas que presentaron reflexiones de muy baja intensidad. Las pocas reflexiones que presentaron las muestras se interpretaron como posibles arcillas esmécticas (montmorillonita) y/o vermiculita. Cabe mencionar que los difractogramas en **FAI** de las muestras MA-T3-H6-12 y MB-T4-H10-17, presentan picos cercanos a los 26.5 y 39.5° en 2θ , lo que se puede relacionar a alófono, ya que estudios en alófono sintético presentados por Arai y coautores (2005) mencionan que el alófono sintético presenta picos cercanos a 26.5 y 39.5° en 2θ .

Los análisis de SEM y TEM en la **FAI** se realizaron con el fin de identificar la morfología para una mejor interpretación de los minerales contenidos en cada muestra. En los análisis de SEM de MA-T3-H6-12 y MB-T4-H10-17 (ver Figura 25 y Figura 30) muestran morfología granular, aunque en MB-T4-H10-17 se observa la posible presencia de diatomeas; para los análisis de TEM en estas muestras (MA-T3-H6-12 y MB-T4-H10-17 ver Figura 26 y Figura 31) se identificaron partículas de morfología esferoide que presentaron diámetros entre 3.5 a 5.6 nm. Lo anterior se puede asociar al alófono ya que los diámetros que presentan las esferas corresponden a los que presenta el alófono (Wada 1987; Moore&Reynolds, 1989), además que morfológicamente se identifican por medio de imágenes encontradas en la literatura (Henmi y Wada, 1976; Wada and Wada, 1977; y Wesley, 2009; ver Figura 1). Para la muestra MC-T5-H11-22.55 en SEM se identificó material granular y estructuras laminares (ver Figura 35), en TEM también se encuentran estructuras laminares y escasa a nula morfología esferoide (ver Figura 36). Para SEM las muestras MD-T5-H11-22.85 y ME-T5-H11-23.31 (ver Figura 39) se identificó la presencia de diatomeas que fueron corroboradas en TEM (ver Figura 40) y escasa a nula presencia de alófono. Los resultados obtenidos en SEM y TEM de las cinco muestras analizadas dan una explicación de las pocas reflexiones encontradas en DRX de la **FAI**, ya que esta fracción se encuentra en mezcla con alófono (amorfo) y materia orgánica.

La secuencia (Tláhuac) estudiada de origen principalmente lacustre a pesar de presentar el mismo registro mineral general en **MTA** (calcita, anortita y cuarzo), presenta cambios en el registro mineral de su **FAI** (alófono y arcillas), granulometría y el contenido carbono orgánico (%), que se ve reflejado en sus propiedades mecánicas. A continuación se hace



una asociación de los minerales con su caracterización mecánica (límites de consistencia, propiedades índice e índices de compresibilidad).

Los índices de plasticidad (IP) en condiciones de humedad natural en las muestras analizadas son altos y varían de 61 a 238 %, por lo que se consideran materiales altamente plásticos. En estos materiales el límite líquido (LL) está muy cercano al contenido de agua natural, lo que significa que los materiales presentan un comportamiento líquido in situ. De acuerdo a Zentar y coatures (2009) las variaciones en los límites líquidos dependen de las propiedades físicas de cada horizonte, como el porcentaje de carbono orgánico ya que este asociado con minerales amorfos.

Los resultados de los IP de las cinco muestras analizadas según la Norma ASTM D4318-95a, 98 en condiciones de humedad natural varían entre 61.17 a 238 %; seco y re-humedecido según la Norma varían de 18 a 45 %, por lo que algunas muestras se reducen hasta en un 81 %. Por ejemplo la muestra MA-T3-H6-12 cambia de un IP de 61.17% en condiciones de humedad natural a 18.93 % seco y rehumedecido según Norma ASTM; MD-T5-H11-22.85 con un IP de 238 % se reduce a 45.74 %, o ME-T5-H11-23.31 con un IP de 122.79 % se reduce a 41.64 % (ver Tabla 6).

Los cambios contrastantes reflejados en los índices de plasticidad (IP) en condiciones de humedad natural y secos y re-humedecidos según la Norma ASTM D4318-95a 98, se debe a los minerales de alófono presentan morfologías esferoides, en las que el agua forma parte de la estructura de estos minerales, lo que explica el alto contenido de agua o humedad (Saarenketo, 1999) encontrados en estos materiales, al perder esa agua el mineral se transforma y ya no recupera sus propiedades iniciales aún cuando se vuelva a agregar agua. Otro factor importante a mencionar de los IP cuando se realizan secos y re-humedecidos según la Norma ASTM, estos materiales se alteran cuando se re-trabajan y modifican las propiedades perdiendo su estructura, debido a que el agua formaba parte entre la unión de las partículas, por lo que el comportamiento de los materiales granulares de cenizas volcánicas se ve afectado (Herrera *et al.*, 2007; Andrade *et al.*, 2011). Esto pasa con estos minerales no solo en México sino en diferentes partes del mundo por ejemplo, se ha documentado que minerales amorfos de Nueva Guinea varían en sus índices de plasticidad de 30 a 80 en su estado natural y se convierten en no plásticos cuando se secan y se vuelven a rehumedecer (Frost, 1967; Wesley, 2009). La clasificación SUCS (según Casagrande, 1926), de las cinco muestras analizadas se definen como materiales limos de alta plasticidad (MH) pero como hay gran cantidad de



carbono orgánico en todas las muestras analizadas (ver Tabla 2) se consideran orgánicos de alta plasticidad (OH).

Los resultados de las pruebas de compresibilidad muestran índices de compresibilidad (Cc) variables que no dependen de la profundidad. Por ejemplo MC-T5-H11-22.55 (Cc de 1.56) y MD-T5-H11-22.85 (Cc de 3.48), presentan Cc mayores, en comparación con la muestra ME-T5-H11-23.31 (Cc de 0.98) que proviene de una mayor profundidad en comparación con las muestras antes mencionadas. Las muestras MA-T3-H6-12 y ME-T5-H11-23.31 presenta presión de consolidación, lo que indican que el esfuerzo actual es menor a algún esfuerzo recibido en la historia de estos materiales, cabe mencionar que las muestras que ya han recibido una carga mayor a la actual son más difíciles de deformarse al recibir una carga (estructura, carretera, pastoreo), por lo contrario las muestras donde el esfuerzo actual es el máximo que ha recibido en la historia son más susceptibles a deformarse, como lo es el caso de las muestras MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85.

La muestra MA-T3-H6-12 que presentan un Cc de 0.04, humedad natural de 187.15 %, C.O de 2.15 %, porosidad (n) 79.5 % y relación de vacíos (e) de 3.88; el alto contenido de humedad, % CO, porosidad (n) y relación de vacíos (e) puede estar relacionado al alófono, pero el bajo índice de compresibilidad puede relacionarse a que esta muestra ya ha tenido un mayor esfuerzo que el actual.

La muestra MB-T4-H10-17 presenta un Cc de 0.62, humedad natural de 227, % CO de 4.58, (n) de 81, (e) de 4.27; La muestra MC-T5-H11-22.55 presenta un Cc de 1.56, humedad natural de 260, % CO de 3.29, (n) de 82, (e) de 4.75. Los valores de las dos muestras son muy similares pero el cambio en el Cc puede relacionarse a la granulometría de cada muestra, la muestra MB-T4-H10-17 presenta mayor contenido de arena (52.5 %) seguido de limo (36.5) y solo un 11 % de material del tamaño de arcilla, en cambio la muestra MC-T5-H11-22.55 presenta mayor contenido de limo 62.4 % seguido de arena 22.8 % y 14.8 % arcilla (ver Tabla 2)

El alto índice de compresibilidad (Cc 3.48) de la muestra MD-T5-H11-22.85 se puede relacionar con el contenido de carbono orgánico ya que este se une fuertemente a alófono (Parfit, 2009), ya que Perrot (1978) en Parfit, 2009; mostraron que la absorción de carbono orgánico tiene grupos funcionales cargados negativamente, por lo que aumenta la carga superficial negativa de alófono. Además esta muestra presenta una porosidad (n) de 88.4 %, una relación de vacíos (e) de 5.65 (en MTI), humedad natural de 307 %.



La muestra ME-T5-H11-23.31 presentan un Cc de 0.98, humedad natural de 199.25 %, C.O de 2.84 %, n 73 % y (e) de 2.72; las propiedades mencionadas pueden estar relacionadas al carbono orgánico (diatomeas) (ver Figura 40). El bajo Cc de esta muestra comparado con MD-T5-H11-22.85 puede estar relacionado con que este es un suelo pre-consolidado por lo que ya ha recibido una carga mayor a la actual por lo tanto es mas difícil deformarse además de esta principalmente constituido por arenas (64 %) seguido por limo (25.5 %) y arcillas (10.55 %).

Por otra parte en los 20.4 m analizados de la secuencia estudiada en la Ciudad de Irapuato es principalmente de origen fluvial. Se observaron tres eventos fluviales principales asociados a variaciones de energía con deposito de materiales gruesos en la base cuando su energía de transporte fue mayor y disminuyendo hacia la parte superior con granos mas finos (normalmente graduada). El primer evento puede corresponder a un evento natural de ambiente fluvial hacia la llanura de inundación (debido al tamaño de granos). El segundo evento se observa gradación normal, este evento pudo ser el resultado del decremento en la energía (tamaño de granos) y el tercer evento, presentando alta energía en el depósito fluvial, además de presentar condiciones oxido-reducción.

Al igual que el caso Tláhuac se caracterizaron cinco muestras a lo largo de la secuencia (MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60, MJ-Ir2-16.80). Debido a que la secuencia es de origen fluvial y su granulometría corresponde a materiales arcillo-arenosos y areno-limosos los materiales presentan mayor resistencia. Estos materiales presentan una porosidad y contenido de agua volumétrica medios de 36 %; su relación de vacíos es en general menor de 1 (varia 0.49 a 0.7); la humedad natural varía entre 20 y 33 %, el carbono orgánico es menor del 1 % por lo que no esta propiedad no tiene relevancia en esta secuencia; la densidad de sólidos promedio es de 2.3 gr/cm³; tienen un pH alcalino bajo a medio que varía de 7.7 a 8.2; y una conductividad eléctrica de 1137 a 2293 dS/m (ver Tabla 3). Los materiales de las muestras estudiadas se consideran no saturados y es importante mencionar que el contenido de humedad que ellos presentan varía dependiendo de la precipitación (Stirling *et al.*, 2015), ya que la humedad varia en tiempo de sequía y de lluvia. El sondeo realizado en este sitio se realizo en época de lluvia por lo que los materiales pudieron aumentar su contenido de humedad.



Los resultados de la caracterización mineralógica de las cinco muestras estudiadas por DRX en muestras totales alteradas (**MTA**), presentan registros minerales que componen a los diferentes horizontes principalmente de cuarzo, albita, microclina y anortita. El análisis de DRX de la fracción arcillosa de muestra intacta (FAI) para cada muestra analizada indica la presencia de fases minerales de montmorillonita y caolinita. Los análisis de SEM y/o TEM en la **FAI** muestran morfologías laminares que pueden corresponder a montmorillonita o caolinita. Cabe mencionar que las arcillas esmécticas se consideran de alta actividad que tienden a expandirse al hacer contacto con el agua (Wesley, 2009), y las arcillas caoliniticas se consideran de baja actividad (Wesley, 2009) ya que no presentan grandes cambios al combinarse con el agua.

Los IP varían de 10 a 27 % en condiciones naturales de humedad y de 18 a 63 % secos y rehumedecidos según la norma ASTM. Cabe mencionar que todas las muestras presentan aumentos en los índices de plasticidad realizados según la norma ASTM, esto debido a que el tipo de arcillas registradas fueron esméctita (montmorillonita) y caolinita.

Las arcillas esmectitas presentan una estructura bien cristalizada y cuando se encuentran en ambientes con poco contenido de agua (ambientes no saturados), mantienen un equilibrio pero cuando estas se secan y se rehumedecen tienen la capacidad de adsorción de moléculas de agua entre sus capas, debido a sus grandes superficies específicas (Hillier, en Velde, (1995); Carreón *et al.*, 2006; Wesley, 2009; Carbajal *et al.*, 1997).

Lo anterior se observa en los resultados de las muestras analizadas ya que todas las muestras presentan un índice de plasticidad (IP) menor en estado seco que en estado húmedo, por ejemplo la muestra MF-Ir3-7.07 presenta un IP de 26.3 % cuando esta se realiza con humedad natural y cuando se seca y rehumedece según la norma ASTM su IP aumenta hasta 35.3 % o la muestra MH-Ir3-10.85 que presenta IP con humedad natural de 25.2 % a 63 % según la ASTM (Ver Tabla 7).

La clasificación SUCS de las cinco muestras analizadas se clasifican en arcillas de baja y alta plasticidad (CL-CH), las muestras estudiadas en estado de humedad natural MF-Ir3-7.07, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80 se clasifican como arcillas de baja plasticidad pero cuando se dejan secar al aire y se rehumedecen cambian a arcillas de alta plasticidad esto debido a que cuando no se dejan secar mantienen su estructura y cuando se les agrega agua esta se adhiere a las partículas bien cristalizadas integrándola a su estructura laminar por el potencial de adsorción que desarrollan al tener contacto con



agua, por consiguiente su plasticidad aumentara. La muestra MG-Ir3-8.60 se clasifica como arcilla de baja plasticidad al analizarse en estado natural y al secarse y volver a rehumedecer, caso contrario de la muestra MH-Ir3-10.85, que en condiciones de humedad natural/según norma ASTM, se clasifica como una arcilla de alta plasticidad lo que se puede relacionar con su contenido de material arcilloso ya que presenta 72 % de material arcilloso, o posiblemente que hay mayor cantidad de arcillas activas (esmeclitas) que inactivas (caolinita) por lo que presenta dicho comportamiento. Lo anterior se puede deber a que en algunas muestras puede haber mayor contenido de montmorillonita que de caolinita lo que hará al suelo más plástico.

Los materiales analizados en esta secuencia presentan índices de compresibilidad bajos que varían de 0.02 a 0.48, sin tener relación directa con la profundidad. Todas las muestras analizadas a excepción de la muestra MF-Ir3-7.07 son materiales preconsolidados presentando OCR's de 1.2 a 2.7, los cuales indican que recibieron carga anterior a la actual, aunque otro factor que se puede considerar es que los minerales de presentes generen una fuerza de tensión interna. Las muestras presentan porosidad (n) que varían de 32 a 41% y (e) de 0.49 a 0.7.

Comparación (Tláhuac-Irapuato)

Uno de los factores principales que intervienen en la composición granulométrica de los materiales en las secuencias estudiadas es su origen. El sitio de Tláhuac es de origen lacustre (reciente) por lo que los materiales son en su mayoría limos; seguido por arenas (muy finas) que pueden corresponder en su mayoría a cenizas volcánicas y otros minerales piroclásticos constituidos por sílice y que se asocian a minerales amorfos como el alófono; y en menor cantidad de arcillas. Por lo anterior se puede entender la baja resistencia de los materiales en la prueba SPT. Esta resistencia se relaciona directamente con la mineralogía general de la secuencia ya que los principales minerales encontrados son en su mayoría calcita seguido de anortita y cuarzo en menor cantidad. Cabe mencionar que debido a que se encuentra mayor cantidad de calcita es probable que los materiales sean de menor resistencia ya que la calcita tiene una dureza baja (3).

El sitio de estudio Irapuato a diferencia del sitio Tláhuac es de origen fluvial y los materiales encontrados son arcillo-limosos y areno-limosos (arenas de medias a gruesas de origen volcánico) que presentan mayor resistencia a la penetración (SPT). La alta resistencia de los materiales al igual que el sitio Tláhuac se relaciona directamente con la mineralogía general de la secuencia ya que los principales minerales encontrados son en



su mayoría cuarzo, albita, anortita y microclina. Por lo anterior la resistencia de los materiales puede estar relacionada al mayor contenido de cuarzo, ya que a diferencia de la calcita tiene una dureza alta (7).

La caracterización de las propiedades de las secuencias estudiadas indica que dependiendo la mineralogía de los materiales dependerá su resistencia, contenido de agua y su comportamiento mecánico. La caracterización de los límites de consistencia muestra claramente la diferencia de la composición de los materiales estudiados en Tláhuac de origen lacustre e Irapuato de origen fluvial principalmente. La Figura 72 muestra que la plasticidad será mayor en materiales que contengan cenizas volcánicas alteradas (Tláhuac) con humedad natural y disminuirán contrastantemente cuando se secan y se re-humedecen (según la norma ASTM) ya que la relación con el agua es directa (forma parte de su estructura), al contrario, cuando los materiales arcillosos se encuentra bien cristalizados (Irapuato) y además de esto se encuentren en la familia de las esmectitas los materiales tienden a ser poco plásticos cuando están en condiciones de baja humedad, no saturados, cuando el nivel freático es profundo, y aumenta su plasticidad al mezclarse con agua.

Los índices de compresibilidad no están directamente relacionados con la profundidad como se muestra en la Figura 73, si no que dependerá de la mineralogía y de la granulometría de los materiales que se componga. Las propiedades fisicoquímicas como lo es el carbono orgánico en ocasiones influyen en la relación de los materiales y su variación con el contenido de agua, ya que el carbono se une fuertemente a alófono (Parfit, 2009) donde el agua forma parte de su estructura.

Irapuato se considera un suelo parcialmente saturado por ello es menos compresible ya que el déficit de agua lo mantiene contraído y aunque los minerales laminares como la montmorillonita puede retener mucho agua el nivel freático es profundo por lo que el suelo se equilibra con la atmosfera y tiende a expandirse cuando hay agua y se contrae cuando este se seca. Irapuato también depende de la fluctuaciones de las precipitaciones (Stirling *et al.*, 2015) para el contenido de humedad natural. En la Tabla 12 muestra una comparación de las propiedades mas importantes de los dos sitios caracterizados.

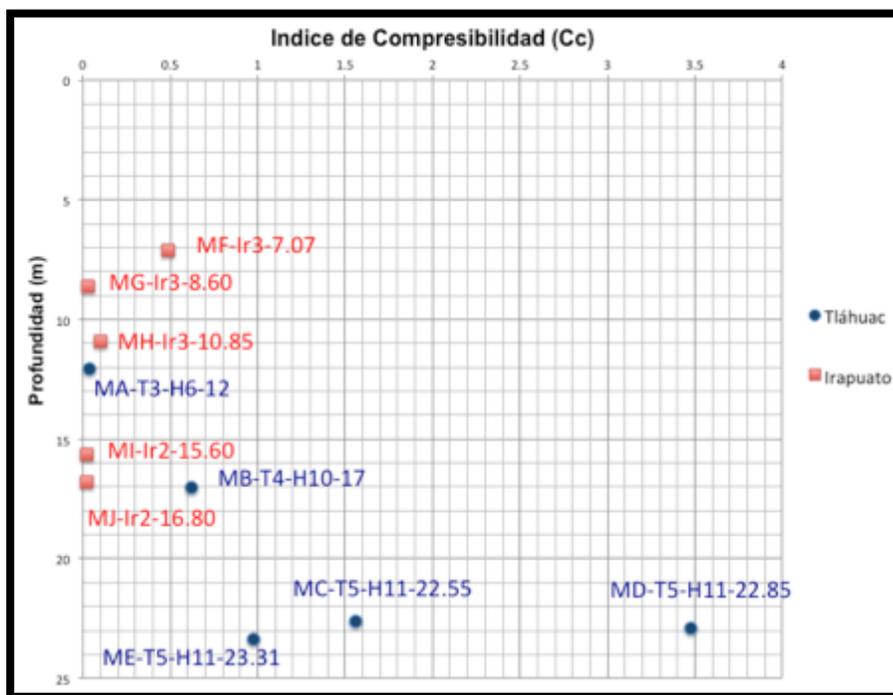


Figura 73. Gráfica que muestra los índices de compresibilidad (Cc) para los sondeos realizados en Tláhuac e Irapuato (MA-T3-H6-12, MB-T4-H10-17, MC-T5-H11-22.55, MD-T5-H11-22.85, ME-T5-H11-23.31; MF-Ir3-7.07, MG-Ir3-8.60, MH-Ir3-10.85, MI-Ir2-15.60 y MJ-Ir2-16.80). Los resultados indican que Tláhuac presenta Cc mayores en comparación con Irapuato y no están asociados con la profundidad.

Tabla 12. Tabla donde se muestra la comparación de las propiedades más importantes de los sitios de estudio: Tláhuac e Irapuato.

Propiedades Importantes	Sitio	
	Tláhuac	Irapuato
Humedad (%)	187-307	20-33.2
Granulometría	Limo-arenosos y limo arcillosos	Arcillo-arenosos y arcillo-limosos
C.O (%)	2.15-6.45	0.0-0.2
D.R.(gr/cm ³)	2.05-2.27	2.21-2.44
Mineralogía en MTA	Calcita, anortita, cuarzo	Cuarzo, albita, microclina, anortita
Mineralogía en FAI	Alófono, estructuras laminares y diatomeas	Montmorillonita, caolinita
IP húmedo (%)	61-238	10.5-27
IP seco (%)	18-45	18.9-63
Clasificación SUCS	OH (húmedo/seco)	CL/CH, CL/CL y CH/CH (húmedo/seco)
Relación de vacíos (e)	2.72-5.65	0.5-0.7
Porosidad(%)	73-88	32.8-40
Índice de compresibilidad(Cc)	0.04-3.48	0.02-0.48



Capítulo IX Conclusiones

La caracterización de las muestras estudiadas en el sitio de Tláhuac presentan materiales de baja resistencia que se refleja en su baja densidad real ($2.05-2.27 \text{ gr/cm}^3$) y composición mineral (calcita, anortita y cuarzo), presentan pH básico y conductividades eléctricas altas lo cual se relaciona el alto contenido de sales minerales, alto contenido de carbono orgánico (2.15-6.45 %) y alto contenido de agua (humedad natural) por lo que se consideran materiales saturados. Las muestras presentaron en su FAI fases minerales pobremente cristalizadas de arcilla de la familia de las esméctitas (montmorillonita) y/o vermiculita; y morfológicamente (SEM y TEM) fueron identificados, diatomeas y minerales amorfos (nanominerales) como el alófono (esferoides). Los altos contenidos de agua están asociados principalmente a los minerales amorfos, y en algunos casos al alto contenido de carbono orgánico que también se asocia a alta porosidad (73-88 %) y relaciones de vacíos (2.72-5.65). Las propiedades mecánicas de los materiales presentan IP altos en condiciones de humedad natural por lo que se consideran materiales muy plásticos pero cuando se secan y se re-humedecen el IP disminuyen de manera importante. La clasificación SUCS de estos materiales con humedad natural y secos y rehumedecidos son limos de alta plasticidad (MH) pero por su alto contenido de carbono orgánico se clasifican como orgánicos de alta plasticidad (OH). El comportamiento de los materiales se puede explicar debido a que en los nanomateriales (amorfos) en relación con altos contenidos de carbono orgánico el agua forma parte de su estructura, la cual pierden cuando se secan y aunque se agrega agua nuevamente ya no recupera sus propiedades iniciales. Las pruebas de compresibilidad de las muestras analizadas presentan distintos grados de pre-consolidación. Los índices de compresibilidad (C_c) son variables de 0.04 a 3.48 que no dependen de la profundidad.

La caracterización de las muestras estudiadas en Irapuato presentan materiales de alta resistencia que se refleja en su alta densidad real ($2.21-2.44 \text{ gr/cm}^3$) y composición mineral (cuarzo, albita, anortita y microclina) presentan pH neutro a ligeramente básico y conductividades eléctricas variables lo cual se relaciona a la variabilidad en el contenido de sales minerales, alto contenido de carbono orgánico (2.15-6.45 %) y bajo contenido de agua (20-33 %) por lo que se consideran materiales no saturados. Las muestras presentaron en su FAI fases minerales bien cristalizadas de arcillas (montmorillonita) y caolinita. Es importante hacer notar que, contrariamente a lo que sucedió con lo



materiales del sitio de Tláhuac, estas muestras presentan IP menor en condiciones de humedad natural (10 a 27 %), que cuando se secan y se re-humedecen, su IP se incrementa (18 a 63 %). Lo anterior se explica porque las arcillas esmécticas bien cristalizadas tienen la capacidad de integrar las moléculas de agua entre sus capas debido a sus grandes superficies específicas y cuando se rehumedecen recuperan su plasticidad. La clasificación SUCS de estos materiales en condiciones de humedad natural y cuando se secan y se re-humedecen es de arcillas de alta (CH) y baja plasticidad, lo que se podría asociar a un contenido menor montmorillonita y caolinita, aunque se requieren estudios complementarios para comprobarlo. Las pruebas de compresibilidad de las muestras analizadas en Irapuato indican que en su mayoría son principalmente materiales pre-consolidados. Los índices de compresibilidad (C_c) son bajos en comparación con Tláhuac y varían de 0.02 a 0.48, que al igual que el sitio de estudio Tláhuac, no aumentan con la profundidad. Los bajos índices de compresibilidad en esta secuencia pueden estar asociados a que el suelo está parcialmente saturado (no saturados) por lo que es menos compresible ya que el déficit de agua lo mantiene contraído.

El trabajo desarrollado permite corroborar la hipótesis inicial sobre que la influencia de las condiciones de formación y evolución de secuencias fluvio-lacustres en zonas volcánicas determinan en su comportamiento mecánico. Las variaciones mineralógicas en estas secuencias muestran el contraste en la composición de los materiales estudiados en Tláhuac e Irapuato que está relacionado a su origen. Los materiales del sitio Tláhuac son de origen lacustre en una cuenca cerrada en la que el nivel freático está a 1.8 m de profundidad asociado a depósitos piroclásticos constituidos principalmente por sílice que inciden directamente en los materiales encontrados (arcillas pobremente cristalizadas, alofano y diatomeas-algas silíceas). En cambio los materiales del sitio de Irapuato corresponden a una cuenca abierta drenada lo que tiene una relación directa con minerales arcillosos encontrados. Es importante mencionar que el sitio de Irapuato también está asociado a materiales volcánicos que provienen de los depósitos fluviales.



Referencias

- American Society for Testing and Materials, 1998a. D2216-92 standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock.
- American Society for Testing and Materials, 1998b. D422-63 (1990) standard test method for particle-size analysis of soils.
- American Society for Testing and Materials, 1998c. D854-92 standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer.
- American Society for Testing and Materials, 1998. D4318-95a standard test method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils.
- American Society for Testing and Materials, 1998. D2435-96 standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils.
- American Society for Testing and Materials D1586 – 11 standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.
- Andrade F., Al-Qureshi H., Hotza D., (2011); "**Measuring the plasticity of clays: A review**" Applied Clay Science, 51 1–7 doi:10.1016/j.clay.2010.10.028
- Arai Y., Sparks D., y Davis J., 2005. **Arsenate Adsorption Mechanisms at the Allophane-Water Interface**. Environ. Sci. Technol. 2005, 39, 2537-2544
- Barbosa R., y Overstreet, C. (2011). **What is soil electrical conductivity**. Baton Rouge, LA, USA: LSU Ag Center publication pub.3185.
- Beroya M., Aydin A., Katzenbach R., 2009; **Insight into the effects of clay mineralogy on the cyclic behavior of silt–clay mixtures**. Engineering Geology 106 (2009) 154–162. <http://dx.doi:10.1016/j.enggeo.2009.03.006>.
- Birkeland P.W.(1984); **Soils and geomorphology**: Oxford University Press, New York., 372 p.
- Brownell, W.E., 1977. **Structural clay products**. Applied Mineralogy, vol. 9. Springer, Berlin.
- Calabi-Floody, M., Theng, B.K.G., Reyes, P., Mora, M.L., 2009. **Natural nanoclays: applications and future trends — a Chilean perspective**. Clay Miner. 44, 161–176.
- Campos-Castoreno A., Oleschko K., Cruz-Huerta L., Etchevers J., Hidalgo C., 2001; "**Estimation of Allophane and its Relationship with Other Chemical Parameters in Mountain Andisols of the Volcano Cofre de Perote**. Terra Latinoamericana, vol. 19, núm 2, pp. 105-116.



- Carbajal G., Isradel., Espinoza M., Serrato J., Negron A., Ramos S., Albarran G., Reyes J., 1997; **Structural characterization of the montmorillonite clay nanometric particles**. NanoStructures Materials, Vol 9. pp 335-338.
- Carreón D., Cerca M., Hernández M., 2003. **Correlation of near-surface stratigraphy and physical properties of clayey sediments from Chalco Basin, Mexico, using Ground Penetrating Radar**. Journal of Applied Geophysics 53 (2003) 121–136.
- Carreón D., Hidalgo C., Hernández 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 la Geología Urbana. Tomo LVIII, núm. 2, 2006, p.237-25.
- Casagrande A., 1926. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance, Proc., 1st Intl. Conf. Soil Mechanics. Found. Eng., p.60-64.
- Crawford C. B., 1986. **State of the art: Evaluation and interpretation of soil consolidation test, en Consolidation of soil: Testing and evaluation**. (eds Young y Townsend), ASTM SPT 892, p. 71-103.
- Cerca Martínez, L.M., Aguirre Díaz, G., López Martínez, M., 2000. **The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato Mexico: A documental example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt**. International Geology Review Vol. 42. pp. 131-151. Ed. V.H. Winston and Son, Inc.
- Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG), 2012. Reporte Interno de la Delegación Iztapalapa de la Ciudad de México. 254 p.
- Cui, Y.J., Yahia-Aissa, M., Delage, P., 2002. **A model for the volume change behaviour of heavily compacted swelling clays**. Eng. Geol. 64 (2–3), 233–250.
- Das, 1997, Braja M., 1997. **Advanced Soil Mechanics**, segunda edición. Taylor & Francis, U.S.A., 457 p.
- Di Maio C., Santoli L., Schiavone, P., 2004. **Volume change behavior of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state**. Mech. Mater. 36, 435–451.
- Díaz J., Lozano R., Dávila V., Vallejo E., and Girón P., 1998. **Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective** Can. Geotech. J. 35: 600–610.



- Ehrenberg, C.G. (1843). Verbreitung und Einfluß des mikroskopischen Lebens in Süd und Nord-Amerika. *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1841: 291-445, 4 Tafel*. Tomado de la pagina (https://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/aulacoseira_granulata).
- Farmer V.C., Russell J.D. y Berrow M.L. (1980). **Imogolite and protoimogolite allophane in spodic horizons: evidence for a mobile aluminum silicate complex in podzol formation**. *Journal of Soil Science*, 33, 673-684.
- Fisher, R. y Schmincke, H. 1984. **Pyroclastic Rocks**. Springer-Verlag, Berlin.
- Frost, R.J. 1967. **Importance of correct pre-testing preparation of some tropical soils**. Proc. First Southeast Asian Regional Conf. on Soil Engineering, Bangkok: 44-53
- Gajo, A., Loret, B., 2007. **The mechanics of active clays circulated by salts, acids and bases**. *J. Mech. Phys. Solids* 55, 1762–1801.
- Gama J., Carreón D., Palacios M., Solleiro E., 1998. **Guía para la Identificación de Suelos Residuales**. Aplicación a la Construcción de Vías Terrestres. Ed. Instituto Mexicano del Transporte. 156 p.
- Gutiérrez Ma., Stoops G., Ortiz C., Lopez G. 2005; **Amorphous silica materials in soils and sediments of the Ex-Lago de Texcoco, Mexico: An explanation for its subsidence**. *Catena* 60 (2005) 205-226.
- Herrera M., Lizcano A., and Santamarina J., 2007; **Colombian Volcanic Ash Soils**; characterisation and engineering properties of natural soils. Volumen 3.
- Hilgard, E.W., 1892. **A report on the relations of soil to climate**. U. S. Dept. Agr. Weather Bull, 3: pp-1-59.
- Juárez E. y Rico A., 2005. **Mecánica de suelos**; Tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelos. Ed. LIMUSA. p.615.
- Jefferson, I., Rogers, C., 1998. **Liquid limit and the temperature sensitivity of clays**. *Eng. Geol.* 49 (2), 95–109.
- Kimiaghalam N., Clark S., Ahmari H., 2015; **An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate**. *International Journal of Sediment Research* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.01.001>
- Lambe T.W., 1951. **Soil Testing for Engineers**, John Wiley & Sons, New York.
- Lambe , T. y Whitman. R. 1969; **Soils mechanics**. John Wiley & Sons, Inc. New



York.

- Le, T., Cui, Y., Munoz, J., Delage, P., Tang, A., Li, X., 2011. **Studying the stress-suction coupling in soils using an oedometer equipped with a high capacity tensiometer.** *Front. Archit. Civ. Eng. China* 5 (2), 160–170.
- Lo Wei-Cheng y Lee Jhe-Wei, 2015. **Effect of water content and soil texture on consolidation in insaturated soils.** *Advances in water resources* 82 (2015) 51-69.
- Lyon, T.L., Buckman, H.O., 1937. **The Nature and Properties of Soils.** Macmillan, New York, p. 391. de Marsily, C., 1986. *Quantitative Hydrogeology.* Academic Press, San Diego, p. 440.
- Mitchell, J. y Soga K., 2005. **Fundamentals of Soil Behavior.** John Wiley & Sons, Inc.
- Moore and Reynolds R. Jr., 1989. **X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals.** Oxford University Press. New York.
- Munsell Color Company, 1975
- Nguyen X., Cui Y., Tang A., Deng Y., Li X., Wouters L., 2013; **Effects of pore water chemical composition on the hydro-mechanical behavior of natural stiff clays.** *Engineering Geology* 166 (2013) 52–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.009>
- Nguyen X., Cui Y., Tang A., Li X., Wouters L., 2014; **Physical and microstructural impacts on the hydro-mechanical behaviour of Ypresian clays.** *Applied Clay Science* 102 (2014) 172–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2014.09.038>
- Ohtsubo, M., Takayama, M. y Egashira, K., 1983. Relationships of consistency limits and activity to some physical and chemical properties of Ariake marine Clays. *Soils and foundations.* 23 (1): 38-46.
- Parfitt R.L, Furkert R., Henmi T., 1980. **Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and tephra.** *Clays and Clay Minerals*, 28, 328-334.
- Parfitt R., y Henmi T., 1980. **Structure of some allophanes from New Zealand.** *Clays and Clay Minerals*, 28, 285-294.
- Parfitt R. y Henmi T., 1982. **Comparison of an oxalate-extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays.** *Soil*



Science and Plant Nutrition, 28, 183-190.

- Parfitt R. y Childs C., 1988. **Estimation of forms of Fe and Al: a review, and analysis of contrasting soils by dissolution and Moessbauer methods.** Australian Journal of Soil Research, 26, 121-144.
- Parfitt R.L., 1989. **Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite.** Journal of Soil Science, 40, 359-369.
- Parfitt R., y Kimble J.. 1989. **Conditions for formation of allophane in soils.** Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 971-977.
- Parfitt R.L., 1990a. **Allophane in New Zealand A Review.** Australian Journal of Soil Research, 28, 343-360.
- Parfitt R.L. 1990b. **Estimation of imogolite in soils & clays by DTA.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, 21, 623-628.
- Parfitt R., Yuan G., Theng B., 1999. **A study of the interactions of soil organic matter with aluminium and allophane in podzols.** European Journal of Soil Science, 50, 695-700.
- Parfitt R. L., 2009. **Allophane and imogolite: role in soil biogeochemical processes** Clay Minerals, 44, 135–155. doi: 10.1180/claymin.2009.044.1.135.
- Perkins, W.W., 1995. **Ceramic Glossary.** The American Ceramic Society, Westerville, OH.
- Reznik Yakov M., 2007; **Influence of physical properties on deformation characteristics of collapsible soils.** Engineering Geology 92 (2007) 27–37. <http://dx.doi:10.1016/j.enggeo.2007.03.001>
- Rico R., y Del Castillo H., 1996; **La Ingenieria de Suelos en las Vías Terrestres: Vol 1.** México, D.f. Edit Limusa; 459 p.
- Rodriguez-Castillo R. and Schroeder-Aguirre A., 2010. **Structural control on the subsidence faults alignment in Irapuato - Mexico** AQUAmundi (2010) - Am01007: 045 – 049 DOI 10.4409/Am-009-10-0007.
- Rogers J. D., 1998. **Hydrocompresion and Hydroswellling**-New term in the Geotechnical Dictionary, James W. Borchers, (eds.) Land Subsidence, Case studies and current reseach. Proceiding of the Dr. Josep F. Poland Symposium on Land Subsidence, p 119-145.
- Saarenketo T., 1998; **"Electrical properties of water in clay and silty soils".** Journal of Applied Geophysis 40; 73-88.



- Shoji, S. y T. Ono. 1978. **Physical and chemical properties and clay mineralogy of andosols from Kitakami, Japan**. Soil Sci. 126: 297-312.
- Shoji, S., M. Nanzyo y R.A. Dahlgren. 1993. **Volcanic ash soil: Genesis, properties and utilization**. Developments in Soil Science 21. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Schmitz R., Schroeder C., Charlier R., 2004; **Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits**. Applied Clay Science 26 (2004) 351–358. <http://dx.doi:10.1016/j.clay.2003.12.015>
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)
- Sridharan A., Nagaraj H. 2000; Compressibility behaviour of remoulded, **fine-grained soils and correlation with index properties**. Can. Geotech. J. 37: 712-722.
- Stirling R., Hughes P. Davie C., Glendinning S., 2015; **Tensile behaviour of unsaturated compacted clay soils — A direct assessment method**. Applied Clay Science 112–113 (2015) 123–133 <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.011>
- Tait, J., Yoshinaga N. y Mitchell B. 1978. **The occurrence of imogolite in some Scottish soils**. Soil Sci. Plant Nutr. 24: 141-151.
- Teruo H. and Koji W., 1976; **"Morphology and composition of allophane"** American Mineralogist, vol. 61 pp 379-390.
- Terzaghi, K. y Peck, R. (1948) **Soil mechanics in engineering practice**. Wiley, New York.
- Theng B., Russell M., Cgurchman J. and Parfitt L., 1982; **Surface properties of allophane, halloysite and imogolita**. Clays and Clay Minerals, Vol 30, No 2, 143-149, 1982.
- Urry, D.W., 1995. **Elastic Biomolecular Machine**. Sci. Am., January 1995, 64–69.
- Velde, B., 1995. **Origin and Mineralogy of Clays**. Clays and the environment. Springer-Verlag.
- USDA, 1996. 8A: saturated paste, mixed. United States Department of Agriculture. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigation Report No. 42. National Soil Survey Center, USA. 693 pp.
- Velde, B. y Meunier, A., 2009. **The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks**. Springer, Berlin.



- Wada S. y Wada K., 1977. Density and structure of allophane. *Clay Minerals* (1977) 12, 289.
- Wada, K. 1989. **Allophane and imogolite**. pp. 1051-1081. *In*: G.B.Dixon y S.B. Wedd (eds.). *Minerals in soil environments*. SSSA, Madison, WI.
- Wada, K. 1989. **Allophane and Imogolite**. *Minerals in Soil Environments* (2nd Edition), SSSA Book Series No 1, pp. 1051-1087
- Warren C., y Rudolph D., 1997; **Clay mineral in basin of Mexico Lacustrine Sediments and their influence on ion mobility in groundwater**. *Journal of Contaminant Hydrology* 27 (1997) 177-198
- Wei-Cheng Lo and Jhe-Wei Lee 2015; **Effect of water content and soil texture on consolidation in unsaturated soils**. *Advances in Water Resources* 82 (2015) 51–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.04.004>
- Wesley, L.D., 2001. **Consolidation behaviour of allophane clays**. *Géotechnique* 51(10), 901-904.
- Wesley, L. (2003). **Geotechnical Properties of Two Volcanic Soils**. University of Auckland.
- Wesley, L. (2009). **Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays**. *Revista de ingeniería civil Obras y Proyectos* 6, 5-10. ISSN0718-2813. Indizada en Scielo Chile Dialnet Latindex
- Wilson, M.J., 1999. **The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives**. *Clay Miner.* 34, 7–25.
- Wilson M.J., 2004. **Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates**. *Clay Minerals* (2004) 39,233-266.
- Zbik M., Williams D., Fang Y., Chieh C., 2015; **Smectite clay microstructural behaviour on the Atterberg limits transition**. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 467 (2015) 89–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.11.042>
- Zhang Z., Huang L., Liu F. Kuang M, Ling Fu Q., Zhu J., 2016 ; **Characteristics of clay minerals in soil particles of two Alfisols in China**. *Applied Clay Science* 120 (2016) 51–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.018>