



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Estudio de secuencias sedimentarias en el graben de  
Querétaro y evaluación de su comportamiento  
mecánico**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**P R E S E N T A:**

**CAROLINA ORTEGA CERVANTES**



**TUTORA:**

**DRA DORA CELIA CARREÓN FREYRE**

**Juriquilla, Qro., 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

1. Datos de la alumna

Ortega  
Cervantes  
Carolina  
55 21 70 19 81  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Licenciatura en Ciencias de la Tierra  
311589018

2. Datos de tutora

Dra.  
Carreón  
Freyre  
Dora Celia

3. Datos de sinodal 1

Dra.  
Alaníz  
Álvarez  
Susana Alicia

4. Datos de sinodal 2

Dr.  
Cerca  
Martínez  
Luis Mariano

5. Datos de sinodal 3

M. en C.  
Juárez  
Arriaga  
Edgar

6. Datos de sinodal 4

M. en C.  
Solís  
Valdez  
Sara

7. Datos del trabajo escrito

Estudio de secuencias sedimentarias en el graben de Querétaro y evaluación de su  
comportamiento mecánico  
136 p.  
2020

# Dedicatoria

*A la Familia Ortega Cervantes*

# Agradecimientos

A mi segunda casa, la Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradezco a la Dra. Dora Carreón, por permitirme ser su estudiante, por sus enseñanzas y ser mi guía para finalmente terminar este trabajo.

A los miembros de mi jurado: Dra. Susana Alaniz, Mtra. Sara Solís, Mtro. Edgar Juárez y Dr. Mariano Cerca por apoyarme en la revisión y mejora de mi trabajo.

Al Dr. Timothy Lawton por haber aceptado trabajar conmigo y darme sus consejos en campo y laboratorio. A la Dra. Berlaine Ortega por apoyarme en la revisión de mis resultados.

Al proyecto PAPIIT IN 114714 “Estudio de las propiedades mineralógicas y geomecánicas de materiales arcillosos” por el apoyo para el desarrollo de este trabajo.

Al Laboratorio de Mecánica de Geosistemas del Centro de Geociencias y a mi amigo Ricardo Carrizosa por enseñarme a emplear el material y apoyarme en todo momento con las pruebas de laboratorio. A la Mtra. Vania Ferrer por su apoyo y sus consejos. A los estudiantes Víctor Vidaña, Leonardo Niño, Alejandro Solís y César García por ayudarme con la realización de pruebas.

Al Laboratorio de Edafología del Centro de Geociencias, a la Mtra. Sara Solís y a Mauricio por auxiliarme durante los análisis y proporcionarme el material necesario.

Al Laboratorio de Difracción de Rayos X en el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada y a la Dra. Beatriz Millán; al Laboratorio de Microscopía Electrónica en el Centro de Geociencias y a la Dra. Marina Vega por proporcionarme los resultados de las respectivas pruebas.

A la UMDI y a mis profesores por darme el conocimiento necesario para finalizar la licenciatura. A la Dra. Gabriela Castaño por orientarme en los trámites de titulación. A la Lic. Bertha Ordaz por auxiliarme con los trámites durante la carrera y mi pasantía.

A la luz de mi vida, mis padres Virginia Cervantes y José Antonio Ortega, por el amor infinito que me han dado, por ser mi mayor ejemplo a seguir y mi motivación diaria. Les amo con todo mi corazón.

A mis herman@s: Vicky, Pepe, Migue, Azu y Rodo por ser mi mayor inspiración, por apoyarme a seguir y cumplir mis sueños, por darme su cariño y fuerza. A mi hermoso sobrino León que por él me motivo a ser mejor cada día. Les amo.

A mis abuelitos, por ser las estrellas que iluminan mi camino.

A mi familia Cervantes y familia Ortega por su gran apoyo. Especialmente a la fam. Corona Ortega, a la fam. Cervantes Gallardo y a mi primo Tarsicio Hernández por recibirme en Querétaro con mucho cariño. Les quiero.

A mis amig@s de toda la vida, Rogelio y Ximena por su amistad y apoyo en mis decisiones. A mis amigas de la carrera Gisela y Andrea con quienes he compartido grandes experiencias a lo largo de esta etapa. Las quiero.

A mi gran amiga Ivonne, por siempre estar conmigo en los buenos y malos momentos a lo largo de esta trayectoria. Que nuestros sueños se hagan realidad. Te quiero mucho.

## RESUMEN

La zona de estudio ubicada en la parte centro septentrional de la Faja Volcánica Transmexicana presenta una geología con actividad sincrónica de dos sistemas de fallas normales con rumbos NNW-SSE y ENE-WSW, actividad volcánica y sedimentaria (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2001). La estratigrafía está representada por intercalaciones de depósitos de arenisca y conglomerado del Plioceno (TpArCg), depósitos piroclásticos y lacustres del Oligoceno-Mioceno (TomPyLac) y lavas basalto-andesíticas del Mioceno medio (TmmAB) y Mioceno tardío (TmtAB) (Carreón-Freyre *et. al.*, 2005). En este trabajo se analizó el comportamiento mecánico de las secuencias vulcano-sedimentarias a partir del estudio de sus procesos de formación y de sus propiedades físicas. Se llevó a cabo un estudio cartográfico con levantamiento de perfiles geológicos y 7 columnas litoestratigráficas en las zonas norte, oriental y central del graben de Querétaro. En el laboratorio se realizó la caracterización física y mecánica de 51 muestras recolectadas en bancos de material, afloramientos y núcleos de pozos utilizando métodos estandarizados de petrografía, sedimentología, mecánica de suelos y edafología; los materiales granulares fueron clasificados de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de suelos SUCS (norma ASTM D2487). A partir de la correlación estratigráfica y el análisis de los perfiles levantados, se propone una estimación de desplazamientos asociados a fallas principales de dirección N-S; por ejemplo, la falla central-5 de febrero desplaza aproximadamente 150 m las secuencias estudiadas mientras que los desplazamientos asociados a fallas secundarias de dirección N-S y E-W en la zona central son aproximadamente de 30 m. Estas estimaciones se obtuvieron a partir de la descripción en superficie y en registros de pozos de las secuencias TpArCg, TomPyLac y TmtAB en los bloques de techo y piso de fallas principales.

La secuencia granular pliocénica de areniscas y conglomerados TpArCg está distribuida en las zonas bajas del graben y es considerada como relleno sedimentario. Esta es una secuencia compuesta por depósitos coluviales en la base con gradación aluvial normal hacia la cima. Los depósitos fueron clasificados de acuerdo con la SUCS como gravas bien gradadas (GW), arenas limosas bien y pobremente gradadas (SM/SP) mezcladas con materiales finos (limos,

M) de alta y baja plasticidad (MH y ML respectivamente). Se estudió el material limo arcilloso y la composición mineralógica de las arcillas, los resultados obtenidos muestran que las arenas limosas de baja plasticidad están compuestas principalmente por minerales caoliníticos y en menor proporción se presentan materiales de alta plasticidad que se componen de minerales de la familia de las arcillas esmectíticas, como la montmorillonita. La secuencia granular oligocénica lacustre y piroclástica TomPyLac, descrita en la zona central y expuesta en las zonas altas del graben, es una secuencia inversamente gradada compuesta por depósitos de caída alterados a abundantes minerales arcillosos montmorilloníticos de alta plasticidad (MH), depósitos fluviales con material piroclástico retrabajado de arenas limosas bien (SM/SW) y pobremente gradadas (SM/SP) de baja plasticidad (ML) y depósitos piroclásticos clasificados como arenas uniformes de baja plasticidad con minerales arcillosos principalmente illíticos. A partir de la determinación del contenido de arcillas y de la alta plasticidad y la composición montmorillonita-illítica de la secuencia TomPyLac, se concluye que esta secuencia es más compresible por lo que puede acomodar una mayor deformación que el relleno sedimentario del graben (TpArCg), lo que concuerda con lo descrito en el trabajo de Ochoa *et. al.* (2018). Los resultados obtenidos permiten un mejor entendimiento de la distribución de las zonas de hundimiento en la parte central de la Ciudad de Querétaro.

# ÍNDICE

<b>Dedicatoria.....</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>IV</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>VI</b>
<b>Índice.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de tablas y figuras.....</b>	<b>XI</b>
<b>I. Introducción .....</b>	<b>1</b>
- Conceptos generales .....	2
- Antecedentes .....	3
- Justificación .....	5
- Objetivo general y particulares .....	6
<b>II. Marco geológico .....</b>	<b>7</b>
II.1. Geología estructural.....	8
II.1.1 Regional.....	8
II.1.2 Graben de Querétaro .....	10
II.2. Estratigrafía local: graben de Querétaro .....	12
<b>III. Metodología .....</b>	<b>17</b>
III.1. Trabajo de campo .....	19
III.1.1 Sitios de análisis litoestratigráfico.....	19
III.1.2 Levantamiento de columnas estratigráficas y muestreo .....	20

III.1.3	Descripción y verificación de unidades .....	21
III.1.4	Perfil geológico.....	22
III.2.	Trabajo de laboratorio.....	22
III.2.1	Determinación de características físicas de materiales granulares.....	23
-	Densidad real.....	23
-	Densidad aparente .....	24
-	Petrografía .....	25
-	SEM.....	26
-	DRX en materiales arcillosos.....	26
-	pH.....	27
-	Contenido de materia orgánica (MO).....	27
III.2.2	Análisis de distribución granulométrica.....	28
-	Granulometría por tamices .....	28
-	Granulometría por hidrometría .....	30
III.2.3	Determinación de propiedades mecánicas .....	31
-	Límites de consistencia de Atterberg.....	31
-	Resistencia a la cizalla.....	32
III.2.4	Sistema Unificado de Clasificación de los suelos (SUCS) .....	33
<b>IV.</b>	<b>Descripción litoestratigráfica de las secuencias estudiadas .....</b>	<b>35</b>
IV.1.	Descripción litoestratigráfica en la zona norte del graben de Querétaro.....	36
IV.1.1.	Sitio BM Torre Cápita .....	36
IV.1.2.	Sitio BM Libramiento Norponiente .....	40
IV.2	Descripción litoestratigráfica en la zona oriental el graben de Querétaro.....	45

IV.2.1. Sitio BM Antea .....	45
IV.2.2. Sitio Afloramiento Boulevard de la Nación .....	46
IV.2.3. Sitio Afloramiento Centro de Congresos .....	53
IV.3. Caracterización de núcleos de pozo en la zona central .....	56
IV.3.1. Correlación litológica de núcleos de distintos pozos .....	56
IV.3.2. Descripción litoestratigráfica de los pozos PQro1 y PQro2 .....	58
IV.3.2.1. Propiedades físicas .....	65
IV.3.2.2. Propiedades mecánicas .....	72
<b>V. Discusión .....</b>	<b>76</b>
V.1. Relación procesos geológicos – propiedades físicas .....	77
V.1.1. Litoestratigrafía de las unidades en la zona norte .....	77
V.1.2. Litoestratigrafía de las unidades en la zona oriental .....	77
V.1.3. Litoestratigrafía de las unidades en la zona central.....	78
V.2. Relación comportamiento mecánico – mineralogía de arcillas .....	81
V.3. Correlación estratigráfica en el graben de Querétaro .....	83
V.3.1. Correlación litoestratigráfica en la zona norte.....	84
V.3.2. Correlación litoestratigráfica en la zona oriental.....	85
<b>VI. Conclusiones .....</b>	<b>88</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>92</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>99</b>

# Lista de Tablas

## Capítulo III. Metodología

- **Tabla III.1.** Puntos de verificación estratigráfica, entre paréntesis si es afloramiento o banco de material, con sus respectivas coordenadas y el número de muestras obtenidas en cada punto.
- **Tabla III.2.** Características físicas, químicas y mecánicas de los materiales granulares.

## Capítulo IV. Correlación litoestratigráfica de las secuencias estudiadas

- **Tabla IV.1.** Propiedades físicas y mecánicas obtenidas del banco de material BM Torre Cápita donde Cc es el coeficiente de curvatura, Cu el coeficiente de uniformidad, Ds es la densidad de sólidos, Da la densidad aparente, IP es el índice de plasticidad y LL es el límite líquido.
- **Tabla IV.2.** Propiedades físicas obtenidas del banco de material BM Libramiento Norponiente.
- **Tabla IV.3** Nomenclatura de las muestras seleccionadas de cada pozo con sus respectivas profundidades.
- **Tabla IV.4.** Propiedades físicas y químicas de la secuencia TpArCg (47 m de espesor) obtenida del pozo PQro1. Cc: coeficiente de curvatura, Cu: coeficiente de uniformidad, Ds: densidad de sólidos, Da: densidad aparente, P%: porosidad.
- **Tabla IV.5.** Propiedades físicas de la secuencia TomPyLac (77 m de espesor) obtenida del pozo PQro2. Cc: coeficiente de curvatura, Cu: coeficiente de uniformidad, Ds: densidad de sólidos, Da: densidad aparente, P%: porosidad.
- **Tabla IV.6.** Propiedades mecánicas y minerales arcillosos dentro de la secuencia TpArCg. IP%: índice de plasticidad, LL%: límite líquido.
- **Tabla IV.7.** Propiedades mecánicas y minerales arcillosos dentro de la secuencia TomPyLac. IP%: índice de plasticidad, LL%: límite líquido.

# Lista de Figuras

## Capítulo II. Marco Geológico

- **Figura II.1.** a) Mapa regional de localización de la zona de estudio señalada en el recuadro rojo y de la zona de falla SFTSMA en el recuadro gris con respecto a las provincias fisiográficas FVTM: Faja Volcánica Transmexicana; MC: Mesa Central; SMOc: Sierra Madre Occidental y; SMOOr: Sierra Madre Oriental (modificada de Alaniz-Álvarez *et.al.*, (2001)). b) Mapa que muestra en el recuadro la zona de San Miguel de Allende-Querétaro, donde las líneas grises son las fallas principales de la región (modificada de Alaniz-Álvarez *et.al.*, 2002).
- **Figura II.2.** Mapa local del graben de Querétaro limitado por fallas normales: falla San Bartolomé, falla oriental, falla E-W sur.
- **Figura II.3.** Mapa geológico del graben de Querétaro (modificado de Carreón-Freyre *et. al.* (2005)).
- **Figura II.4.** Columna estratigráfica que presenta las unidades litológicas en la zona de estudio registradas y descritas anteriormente (modificada de Carreón-Freyre *et.al.*, 2005). De lado izquierdo se muestran las unidades estudiadas en este trabajo.

## Capítulo III. Metodología

- **Figura III.1.** Mapa mental del desarrollo de la metodología.
- **Figura III.2.** Mapa de localización de los puntos de verificación estratigráfica con respecto a la unidad volcánica TmtAB y las fallas dentro del graben de Querétaro. El recuadro negro representa la ubicación de los pozos analizados.
- **Figura III.3.** Método para medir el espesor de estratos inclinados con la vara de Jacob de 1.5 m de largo. (tomado de Coe *et. al.*, 2010).
- **Figura III.4.** Picnómetros con 5 g de suelo para obtener el segundo peso indicado (por duplicado).
- **Figura III.5.** Picnómetros dentro del desecador para extraer aire de la muestra y obtener el tercer peso.
- **Figura III.6.** Balanza de Jolly con muestra sumergida en agua. Debajo se encuentran las 3 muestras de suelo con parafina antes de pesar.

- **Figura III.7.** Lámina delgada con escala de 100 micras de una roca ígnea basáltica vesiculada.
- **Figura III.8.** Micrografía SEM de una muestra de suelo total con escala de 20 micras.
- **Figura III.9.** Potenciómetro marca Beckman para medir el pH y la temperatura de las muestras. Los frascos blancos contienen las soluciones buffer para la calibración.
- **Figura III.10.** Solución titulada con sulfato ferroso tornando a un color esmeralda.
- **Figura III.11.** Mallas apiladas de mayor a menor (de arriba a abajo) en tamaño de apertura de mm para la separación de los distintos tamaños de grano.
- **Figura III.12.** Ejemplo de una curva granulométrica donde el eje de las x representa el tamaño de las partículas en mm y el eje de las y el porcentaje que pasa en cada malla. En la parte superior se muestra la división de los tamaños de grano.
- **Figura III.13.** Probetas de 1 litro con muestras ya para realizar la medición con el hidrómetro.
- **Figura III.14.** Copa de Casagrande con muestra saturada durante la prueba del límite líquido. La ranura a la mitad de la copa debe cerrarse al menos 1.27 cm con cierto número de golpes.
- **Figura III.15.** Muestra cilíndrica antes de someterla al equipo triaxial.
- **Figura III.16.** Equipo para ensayos triaxiales con muestra a prueba y las diferentes válvulas de presión y drenaje del sistema.

#### **Capítulo IV. Correlación litoestratigráfica de las secuencias estudiadas**

- **Figura IV.1.** Mapa geológico del graben de Querétaro que muestra los p.v.e. estudiados. El perfil W-E representada puntos morados correlaciona los bancos de material BM Libramiento y Torre Cápita en la zona norte. El perfil NW-SE correlaciona los puntos de color azul BM Antea, Blvd. de la Nación y Centro de Congresos en la zona oriental. El recuadro verde representa la zona central donde se localizan los pozos analizados.
- **Figura IV.2.** Columna litoestratigráfica del BM Torre Cápita basada en las propiedades (tamaño, color, redondez), estructuras sedimentarias y composición de cada estrato. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de

muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.

- **Figura IV.3.** a) Estrato 1 en la base, se observa el aumento de tamaño de grano hacia la cima. b) Sitio del banco de material BM Torre Cápita dirección N-S con un espesor de 19 m. Los números representan el número de cada estrato en las descripciones.
- **Figura IV.4.** Contacto erosivo entre las "arcillas negras" del estrato 7 y el conglomerado del estrato 6.
- **Figura IV.5.** Columna litoestratigráfica del BM Libramiento. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.
- **Figura IV.6.** Afloramiento del banco de material BM Libramiento Norponiente con dirección N-S y 23 m de espesor. Los números representan el número de estrato en las descripciones y las líneas puntadas los contactos entre los estratos.
- **Figura IV.7.** a) Las líneas punteadas corresponden al contacto entre el estrato 6 y 7. b) Estrato 8 de color oscuro con alto contenido de escoria.
- **Figura IV.8.** Sitio del banco de material BM Antea con dirección E-W y espesor máximo de 15 m. Los números representan el número de estrato en las descripciones.
- **Figura IV.9.** Columna litoestratigráfica del BM Antea. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.
- **Figura IV.10.** Columna litoestratigráfica del sitio Blvd de la Nación. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.
- **Figura IV.11.** Los números representan el número de estrato. a) La línea roja representa el contacto entre los estratos 2 y 3. b) Estratificación cruzada en el estrato 3.
- **Figura IV.12.** Petrografía del estrato 3. a) con nícoles cruzados con fenocristales de cuarzo (Qz) y b) nícoles paralelos con fragmentos de pómez (P) con vesículas (V) rellenas.

- **Figura IV.13.** Afloramiento sobre la avenida Blvd. de la Nación con un espesor de 112 m. Los números representan el número de estrato en las descripciones.
- **Figura IV.14.** Petrografía del estrato 4. a) con nícoles cruzados con fenocristales de cuarzo (Qz) fracturado y b) nícoles paralelos con matriz vítrea con texturas shards encerrados en círculos.
- **Figura IV.15.** Petrografía del contacto entre estrato 8 y 9 (flecha). a) con nícoles cruzados se observa una capa de material piroclástico con matriz vítrea y fenocristales de cuarzo (Qz) y líticos volcánicos que contienen cuarzo (L) y b) con nícoles paralelos una capa alterada con líticos vítreos (Lv).
- **Figura IV.16.** Los números representan el número de estrato en las descripciones. Las líneas punteadas representan los contactos entre los estratos 10, 11 y 12.
- **Figura IV.17.** Afloramiento del sitio del Centro de congresos con dirección N-S. El espesor máximo del afloramiento es de 27 m. Los números representan el número de estrato en las descripciones.
- **Figura IV.18.** Columna litoestratigráfica del sitio Centro de Congresos. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.
- **Figura IV.19.** Base del afloramiento con derrame de lava fracturado (2) y su brecha basáltica (1). Los números representan el número de estrato en las descripciones.
- **Figura IV.20.** Petrografía de roca volcánica máfica del estrato 2 con presencia abundante de olivino idingsitizado (Ol), piroxeno (Px) y plagioclasa (Plg). a) nícoles cruzados y b) nícoles paralelos.
- **Figura IV.21.** Petrografía de roca volcánica máfica del estrato 7 con aglomerados de olivino (Ol) y plagioclasa (Plg). a) nícoles cruzados y b) nícoles paralelos.
- **Figura IV.22.** Mapa de localización del área de los pozos que se encuentran cerca de la falla central-5 de febrero y una falla con dirección E-W. En el recuadro de la izquierda se muestra un acercamiento de los pozos analizados que abarcan un área de 50 m<sup>2</sup>.

- **Figura IV.23.** Muestra los espesores de las unidades presentes en cada uno de los pozos. Es decir, un derrame de lava entre dos unidades granulares. Los pozos encerrados con color morado fueron los seleccionados para analizar. En el recuadro de la derecha se muestran las secciones en superficie de color verde de los pozos presentados arriba.
- **Figura IV.24.** Núcleos del pozo PQro1 que incluye los depósitos de la secuencia granular TpArCg con un espesor de 47 m.
- **Figura IV.25.** Núcleos del pozo PQro2 que incluye los depósitos de la secuencia granular TomPyLac con un espesor de 77 m.
- **Figura IV.26.** Columna litoestratigráfica del pozo PQro1. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.
- **Figura IV.27.** Material de tamaño de arenas y gravas.
- **Figura IV.28.** Material disgregado de tamaño de limo-arenoso.
- **Figura IV.29.** Columna litoestratigráfica del pozo PQro2. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.
- **Figura IV.30.** Material consolidado con líticos de escoria y pómez alterados.
- **Figura IV.31.** Material fino con clastos de pómez angulosos.
- **Figura IV.32.** Leyenda con base en la granulometría de finos para la identificación de los estratos en las columnas.
- **Figura IV.33** Micrografías SEM de la muestra M3 500x en diferentes ángulos de la muestra
- **Figura IV.34.** Micrografías SEM de la muestra M5 de 1.5x, 2.0x, 2.5x y 4.0x.

## Capítulo V. Discusión

- **Figura V.1.** Mapa geológico del graben de Querétaro. Muestra los perfiles geológicos de las zonas norte (línea azul) y oriental (línea roja) con respecto a los puntos de verificación estratigráfica. Las fallas inferidas en la zona central de pozos se representan con líneas moradas.

- **Figura V.2.** Esquema de las columnas litoestratigráficas con sus diferentes facies interpretadas según la litología y estructuras sedimentarias. Las columnas presentan su elevación topográfica en la parte superior y están ordenadas de acuerdo a su distribución de W a E con una distancia de 20 km a lo largo del graben.
- **Figura V.3.** Modelo sedimentológico de distribución de depósitos de las unidades vulcano-sedimentarias en el graben de Querétaro.
- **Figura V.4.** Mapa del graben con las unidades sedimentarias y su grado de compresibilidad.
- **Figura V.5.** Correlación litoestratigráfica en la zona norte con las columnas de los puntos BM Torre Cápita y BM Libramiento.
- **Figura V.6.** Perfil geológico E-W en la zona norte del graben con las columnas litoestratigráficas del BM Libramiento y BM Torre Cápita con respecto a las fallas geológicas. El color de las unidades corresponde a las que presentó el mapa de la Figura V.1.
- **Figura V.7.** Correlación litoestratigráfica de la zona oriental. De lado derecho de cada columna se encuentra la numeración de los estratos, la altura máxima de la columna y las unidades que representan, mientras que de lado izquierdo se presenta la simbología del tipo de descripción a cada una de las muestras.
- **Figura V.8.** Perfil geológico NW-SE con las columnas litoestratigráficas del BM Antea, Blvd de la Nación y Centro de Congresos con respecto a las fallas. El color de las unidades corresponde a las que presentó el mapa de la Figura IV.1.

# I

## Introducción

## *Conceptos generales*

La sedimentología es la rama de la geología que se encarga de interpretar los procesos que originan los sedimentos y rocas sedimentarias llevándolas a una clasificación con base en sus propiedades físicas, químicas y biológicas mientras que la estratigrafía ordena cronológicamente dichos procesos basándose en la superposición de estratos de rocas y sedimentos empleando columnas estratigráficas (Boggs, 2013). Una secuencia sedimentaria es la sucesión de estratos o facies que determinan un ambiente deposicional en cierto intervalo de tiempo.

El intemperismo es el cambio en la estructura física y química de una roca a causa de las condiciones que se presentan en el medio. Existen dos tipos, el mecánico que es la desintegración en fragmentos de cualquier roca, y el químico que genera una descomposición o intercambios mineralógicos en las rocas (disolución, oxidación, hidrólisis). Después de este proceso, los fragmentos sufren el proceso de erosión y son trasladados por diferentes agentes como el agua, el viento y el hielo a grandes distancias (Nichols, 2009). Los sedimentos se depositan en lugares limitados por zonas altas como en valles, lagos o cuencas, o bien durante el transporte se depositan en ríos o canales.

En cada ambiente sedimentario se llevan a cabo diferentes procesos, de modo que los depósitos presentan propiedades físicas y químicas distintivas como la mineralogía, densidad, granulometría, textura y fábrica (que se refiere al ordenamiento de granos en una roca). Estas propiedades influyen en el comportamiento mecánico de materiales granulares (material no consolidado o sedimento), como la mineralogía influye en la plasticidad de materiales finos y la fábrica en la compacidad de materiales gruesos (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005).

La plasticidad de los materiales granulares se determina con la mecánica de suelos a partir del contenido de agua que estos presentan. Asimismo, esta propiedad depende del contenido de arcillas debido a que presentan una estructura laminar compuesta de aluminosilicatos hidratados. Algunas arcillas tienen una gran capacidad de intercambio catiónico (CIC) que les permite la absorción y adsorción de moléculas de agua y cationes diversos que modifican las distancias interplanares dentro su estructura, lo que provoca su contracción y expansión (Velde, 1995). Esto conlleva a que la composición mineralógica de arcillas sea otro factor que

determine el comportamiento mecánico. Por lo tanto, mientras más contenido de arcilla, más plástico y compresible es el material (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005).

Con base en el arreglo estructural de las arcillas, estas se clasifican en 3 familias: las *caolinitas*, de la familia 1:1 (una capa tetraédrica de sílice y otra octaédrica de aluminio), son arcillas estables en presencia de agua, con baja CIC y sus enlaces no permiten la absorción y adsorción de agua en su estructura (Barton *et.al.*, 2002) por consiguiente, se les conoce como arcillas poco o no compresibles. Las *illitas*, de la familia 2:1 (una capa de aluminio y dos de sílice unidas por iones de potasio) presentan mayor CIC que las caolinitas y gracias a los enlaces con los iones de potasio las hacen más estables que las esmectitas, por lo tanto, son arcillas intermedias poco compresibles. Finalmente, las *esmectitas* de la familia 2:1 así como la montmorillonita, saponita, bentonita, entre otras, son altamente expansivas debido a su inestabilidad en presencia de agua y por presentar una mayor CIC comparado con las no expansivas (Huggett, 2015), por lo tanto, se consideran arcillas compresibles.

### *Antecedentes*

Se han realizado estudios en diferentes partes del mundo sobre la relación que tienen los ambientes de depósito y procesos de formación de secuencias sedimentarias con sus propiedades físicas y mecánicas, así como la influencia del contenido y tipo de arcilla en su comportamiento mecánico. Torra (2003) realizó levantamientos de perfiles estratigráficos en campo y caracterización física y mecánica de secuencias sedimentarias tal como se realizó en el presente trabajo. Se utilizaron núcleos de pozos y métodos ASTM (American Standard Test Materials) para los límites de consistencia (líquido, plástico e índice de plasticidad), análisis granulométrico por tamizado y clasificación de los sedimentos usando el Sistema Unificado para la Clasificación de Suelos (SUCS). Las secuencias estudiadas por Torra (2003) corresponden edades del Neógeno Mioceno y Cuaternario Pleistoceno-Holoceno. La secuencia con menor espesor tuvo una potencia de hasta 15 m y está compuesta por material intercalado de limo y arcilla de baja (CL) y alta plasticidad (CH) respectivamente, resultado de un depósito lacustre retrabajado por un proceso postdeposicional de lavado de arcillas. La secuencia que subyace a este depósito con hasta 30 m de profundidad presentó un aumento

de tamaño de grano a arenas limosas (SM) con intercalaciones de capas de arcillas alteradas de alta plasticidad (CH) resultado de un depósito marino o litoral. Estos resultados correspondieron a la caracterización y relación entre las propiedades físicas y mecánicas con sus ambientes de depósito.

Recientemente, Wu *et. al.* (2015) dedujeron que los ambientes de depósito determinan el arreglo de las partículas y que las condiciones químicas (salinidad del agua) y procesos postdeposicionales (lixiviación, por ejemplo) influyen en las propiedades mecánicas generando un comportamiento mecánico específico. En cuanto a la mineralogía y límites de consistencia de las arcillas, infirieron que las illitas se forman cuando se depositan partículas de tamaño grueso (1-2 micras) con límites líquidos de 60-120% y un límite plástico de 3-60%, mientras que las esmectitas se forman en partículas más finas menores a 0.1 micras y presentan límites líquidos de 100-900% y límites plásticos de 50-100%. Comparando los depósitos de las tres regiones concluyeron que los sedimentos del Holoceno en la zona de Shanghai se deben a un ambiente de depósito fluviodeltaico con mayor contenido de limos que en las zonas de llanuras de inundación de Ariake y Bangkok. Wu *et. al.* (2015) sugirieron que los sedimentos de Shanghai fueron transportados por el río Yangtze a una mayor velocidad y energía en un periodo de transgresión-regresión y, por lo tanto, hubo una deposición de material de tamaño más grueso. Por otro lado, Shanghai está compuesta por arcillas de baja plasticidad (CL) con más de un 70% de illitas que las arcillas de Ariake y Bangkok que presentaron mayor contenido de esmectitas.

En México, Carreón-Freyre *et.al.* (2011) asociaron la deformación de los materiales arcillosos con el fracturamiento generado, así como con las condiciones de formación y ambientes de depósito de dichos materiales. Se realizó una descripción y caracterización física de sedimentos limo-arcillosos poco profundos con base en métodos ASTM en tres diferentes sitios de Iztapalapa, Ciudad de México. De igual manera, los autores realizaron un estudio mineralógico de arcillas relacionándolo con sus propiedades mecánicas. Las diferentes pruebas realizadas fueron: límites de consistencia, densidad de sólidos, contenido de agua y materia orgánica, análisis granulométrico fino y grueso empleando la clasificación de suelos SUCS y en algunos estratos se les realizaron pruebas mecánicas específicas (triaxiales y compresibilidad). La variación entre los sitios estudiados fue: en la zona nororiental de

Iztapalapa con desplazamientos verticales de hasta 1 m, se caracterizó como un depósito lacustre de 2 m de profundidad con alto contenido de arcilla de alta plasticidad (CH) a mayor profundidad y con bajo contenido de materia orgánica, compuesta principalmente de montomorillonita, lo que explica el alto contenido de agua. En la zona central del área estudiada describieron la planicie lacustre con variación en la deformación respecto al fracturamiento y espesor del depósito arcilloso, con desplazamientos verticales de 5 a 100 cm. El material se clasificó como limos de alta plasticidad (MH) con alto contenido de agua intercalados con capas de ceniza volcánica. Finalmente, en la parte nororiental con una alta deformación, se caracterizó la zona lacustre a partir de un pozo de hasta 15 m de profundidad el cual presenta un depósito piroclástico de arena y ceniza en la parte superficial con 8 m de profundidad. Por debajo del depósito, se encuentra un incremento de contenido de agua que va de un material limoso de alta plasticidad (MH) a material arcilloso de alta plasticidad (CH). Por lo tanto, concluyeron que las zonas lacustres con mayor contenido de arcilla de esmectita, illita y alófono producto de alteración de depósitos de caída, presentan mayor deformación.

### *Justificación*

Los materiales del subsuelo en la ciudad de Querétaro consisten en secuencias sedimentarias y volcánicas interestratificadas a diferentes profundidades. El estudio de los procesos de formación y las propiedades físicas de los materiales granulares permiten determinar el comportamiento mecánico de las secuencias estudiadas. Comúnmente se realizan estudios independientes de sedimentología, estratigrafía y de mecánica de suelos, un estudio conjunto ayuda a establecer la representatividad de los parámetros determinados en laboratorio y sus condiciones de extrapolación. Una adecuada determinación de las condiciones de deformación de estos materiales puede permitir establecer una relación entre la extracción de agua subterránea, el hundimiento y la ruptura de las secuencias someras. Los resultados obtenidos aportan la información necesaria que puede ser útil para el desarrollo de estudios de planeación urbana en la zona metropolitana de Querétaro y las técnicas podrán ser empleadas para otras zonas de estudio con características similares.

### *Objetivo general*

El objetivo principal de este trabajo es establecer una relación entre los procesos geológicos asociados a las secuencias sedimentarias que rellenan el graben de Querétaro, sus propiedades físicas y su comportamiento mecánico.

### *Objetivos particulares*

- Describir la geología de la zona de estudio con base en el levantamiento de columnas litoestratigráficas a partir de unidades expuestas en superficie.
- Establecer una correlación estratigráfica dentro del graben de Querétaro tomando en cuenta las características litológicas de las secuencias medidas en campo y los registros litológicos de pozos.
- Determinar las características físicas de los materiales por medio de técnicas de análisis de mecánica de suelos, sedimentológicas y edafológicas.
- Analizar la influencia del contenido y tipo de arcillas en el comportamiento mecánico de las secuencias sedimentarias.
- Identificar y comparar las características geológicas de las unidades sedimentarias estudiadas que determinan su comportamiento.

# **II**

## **Marco Geológico**

Este capítulo describe la historia geológica estructural de la región central del país y parte de la ciudad de Querétaro, así como la estratigrafía previamente descrita para conocer la sucesión de eventos tanto tectónicos como volcánicos y sedimentarios.

En el estado de Querétaro convergen tres provincias fisiográficas; 1) la Mesa Central (MC) contiene grandes volúmenes de rocas volcánicas silíceas emplazadas a los 30 Ma (Cerca-Martínez *et al.*, 2000) relacionados con el incremento de velocidades de expansión del fondo oceánico de la placa Farallón que subduce la placa norteamericana (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999). 2) La Sierra Madre Oriental (SMOr) se compone de rocas marinas sedimentarias deformadas del Mesozoico por la orogenia Larámide, con deformación extensional del Cenozoico (Eguiluz *et al.*, 2000). 3) La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) está compuesta por rocas volcánicas cuyas edades comprenden desde el Mioceno al Reciente y se relaciona con la subducción de las placas Rivera y Cocos debajo de la placa norteamericana (Ferrari, 2000).

La zona de estudio, conocida como el graben de Querétaro, se localiza en la parte centro septentrional de la FVTM (Figura II.1a) donde se encuentra la ciudad del mismo nombre. Se le conoce como graben a una estructura geológica formada por desplazamientos de bloques en el que el bloque de techo es el que se desplaza y el que lo sostiene es el bloque de piso. Estos desplazamientos se deben al movimiento de fallas normales, resultado de una deformación extensional que conlleva un esfuerzo máximo vertical y mínimo horizontal. Normalmente estas estructuras generan desplazamientos verticales que forman escarpes y a su vez un cambio en la topografía. Estos cambios son determinantes para procesos deposicionales de secuencias sedimentarias y volcánicas.

## *II. 1. Geología estructural*

### *II.1.1 Regional*

El graben de Querétaro se formó por el cruce de dos sistemas de fallas regionales: el sistema Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) cuyo rumbo es NNW-SSE (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001) y el sistema Chapala-Tula (SFCHT) con dirección ENE-WSW. Se tiene evidencia de que actualmente son sísmicamente activos y que han tenido periodos de inactividad y

reactivación desde el Cenozoico hasta el presente (Aguirre-Díaz *et. al.*, 2000). Estos sistemas se describen a continuación:

*Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende.* Estas fallas se describieron como un sistema que atraviesa la FVTM transversalmente y se caracteriza por separar eventos de la corteza cuyas características geológicas difieren (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2001; 2002), es decir, separa la Mesa Central de la Sierra Madre Oriental y el centro de la parte oriental de la FVTM que se diferencian estructuralmente y por el tipo de volcanismo (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2007). Este sistema presenta una longitud de 450 km que va desde la Sierra de Catorce en San Luis Potosí hasta el estado de Guerrero (Figura II.1a) prolongándose 35 km lateralmente en la zona de Querétaro (Figura II.1b) y cortado por otros sistemas de fallas paralelas a la FVTM (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2002). Aguirre *et. al.* (1993) fecharon el SFTSMA en 30 Ma.

*Sistema de fallas Chapala-Tula.* Este sistema corresponde a las épocas Oligoceno y Mioceno medio (Johnson y Harrison, 1990), se caracteriza por presentar una orientación paralela a la FVTM y se define como un sistema intra-arco (Suter *et. al.*, 2005). En la región de Huimilpan este fallamiento se refleja en la falla Lagunillas-Huimilpan que se interpreta como el primer evento de deformación extensional en la región (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2002).

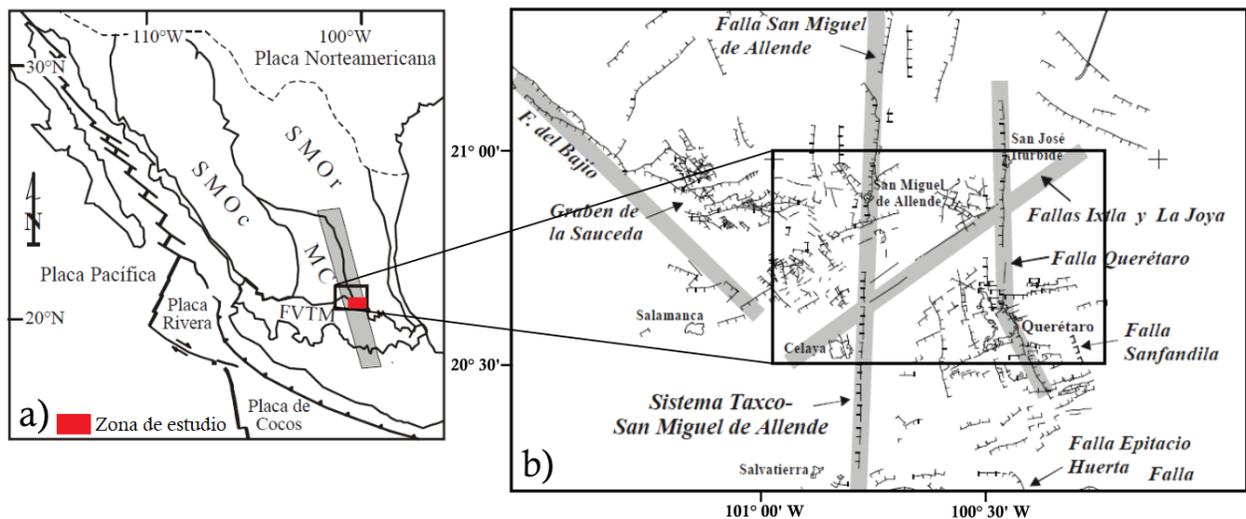


Figura II.1. a) Mapa regional de localización de la zona de estudio señalada en el recuadro rojo y de la zona de falla SFTSMA en el recuadro gris con respecto a las provincias fisiográficas FVTM: Faja Volcánica Transmexicana; MC: Mesa Central; SMOc: Sierra Madre Occidental y; SMOr: Sierra Madre Oriental (modificada de Alaniz-Álvarez *et. al.*, (2001)). b) Mapa que muestra en el recuadro la zona de San Miguel de Allende-Querétaro, donde las líneas grises son las fallas principales de la región (modificada de Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2002).

### II.1.2. Graben de Querétaro

*Sistema de fallas Querétaro.* Sistema con dirección N-S compuesto por fallas normales paralelas consideradas dentro del SFTSMA que dan lugar a la zona del graben de Querétaro (Figura II.2). Esta zona fue llamada “Fase de Basin and Range en el Mioceno medio-tardío” por Pasquaré *et.al.* (1991). Este sistema lo constituyen las fallas Oriental, central - 5 de febrero, Tlacote y San Bartolomé (distribuidas de este a oeste):

La *falla oriental* (falla Querétaro en la Figura II.1b) es de tipo normal con una longitud de 61 km y dirección de echado W, se divide en 3 secciones (norte-central-sur) por fallas que la cortan con rumbo E-W. La sección norte tiene una longitud de 10 km, se infiere que es la más antigua con 10-7 Ma debido a la fuerte erosión que presenta su escarpe. La sección central con 15 km de longitud muestra alineación con estructuras volcánicas y desniveles topográficos desde el Salitre hasta Santa Rosa Jáuregui con escarpes mal desarrollados. Y la sección sur con 5.3 Ma que tiene una longitud de 26 km y un desplazamiento vertical de 80 m.

La *falla central - 5 de febrero* es de tipo normal con 14 km de longitud que va desde Blvd. Bernardo Quintana hasta Sta. Rosa de Jáuregui y al igual que la falla oriental presenta una dirección de echado W y un desplazamiento vertical aproximado de 100 m.

Entre las fallas central-5 de febrero y la oriental hay una distancia de 5 km y forman una estructura conocida como rampa de traslape (Xu *et. al.*, 2011). Esta estructura se describe como la diferenciación de desplazamiento vertical entre ambas fallas, es decir, que el gradiente de desplazamiento en la falla oriental incrementa al sur y en la falla central-5 de febrero disminuye. La existencia de fallas menores con rumbo NW y NE hace que se generen desniveles entre las fallas principales y así producir la rampa de traslape. Ojeda-García *et.al.* (2000) llamaron a esta zona: zona de transferencia.

La *falla Tlacote* o falla la Joya (Ojeda-García *et.al.*, 2000) es una falla de tipo normal ubicada al oeste de la ciudad de Querétaro, con una longitud de 20 km y una dirección de echado E. Presenta un desplazamiento vertical de 80 m con edad más joven que 7.5 Ma, inferida por presencia de derrames basálticos en ambos bloques.

La *falla San Bartolomé*, limita el graben al occidente, es de tipo normal y presenta una dirección de echado E, con un escarpe que va de 100 a 50 m de norte a sur respectivamente separados por la falla E-W central. La edad es inferida por la erosión y los estratos que corta de 7 a 5 Ma.

*Sistema de fallas NE-SW*. Comprende fallas normales con escarpes de entre 30 a 100 m, con longitudes menores a 15 km y que cortan diferentes fallas con dirección N-S. Algunas fallas principales son:

La *falla E-W sur* (falla sur por Alaniz- Álvarez *et.al.*, 2001) presenta una longitud de 5 km con dirección de echado N, la cual se reactivó al emitirse el volcán Cimatario y la falla Tlacote, por lo tanto, corta a estas estructuras.

La *falla E-W central* (falla central por Alaniz- Álvarez *et.al.*, 2001) es una falla normal ubicada en el centro del graben con dirección de echado S que presenta escarpes de 30 a 50 m y es cortada por las fallas san Bartolomé y Tlacote. Sugieren que su actividad fue anterior a dichas fallas.

La *falla Ixtla* es una falla normal con dirección del echado SE. Está compuesta por escarpes con desplazamiento menores a 100 m y que posiblemente tiene edades de 12 a 9 Ma por presencia de sedimentos mesozoicos únicamente en el bloque de piso (Alaniz-Álvarez *et.al.*, 2001). Esta falla se encuentra ubicada en la parte norte del graben de Querétaro.

Gran cantidad de fallas menores se encuentran por debajo de las secuencias sedimentarias del graben. Fueron documentadas por Pacheco *et. al.* (2006) por medio de gravimetría medida transversalmente a la dirección de las fallas que influyeron en el desplazamiento diferencial de las secuencias (Ochoa-González *et. al.*, 2018).

A partir de las edades de las rocas que cortan o no los sistemas de fallas, se han registrado cuatro eventos de deformación en la zona de San Miguel de Allende-Querétaro que van desde el Oligoceno hasta el Plioceno descritos por Alaniz-Álvarez *et. al.* (2001). El primer evento es la extensión E-W de la Mesa Central hace aproximadamente 30 Ma, fue inferido por la alineación y desplazamiento de estructuras volcánicas y activación de tres sistemas de fallas (N-S, NW-SE, NE-SW). Siguió dos eventos de transición: uno en el Mioceno medio entre

los 12 y 9 Ma con reactivación de fallas y el otro en el Mioceno tardío posterior a los 7.5 Ma con activación de las fallas Ixtla y E-W central del sistema NE-SW y la activación del sistema de fallas Querétaro. El cuarto evento se concentró en la FVTM que sucedió simultáneamente por la extensión N-S activando diferentes fallas como el SFCHT con dirección ENE-WSW posterior a los 5.6 Ma.

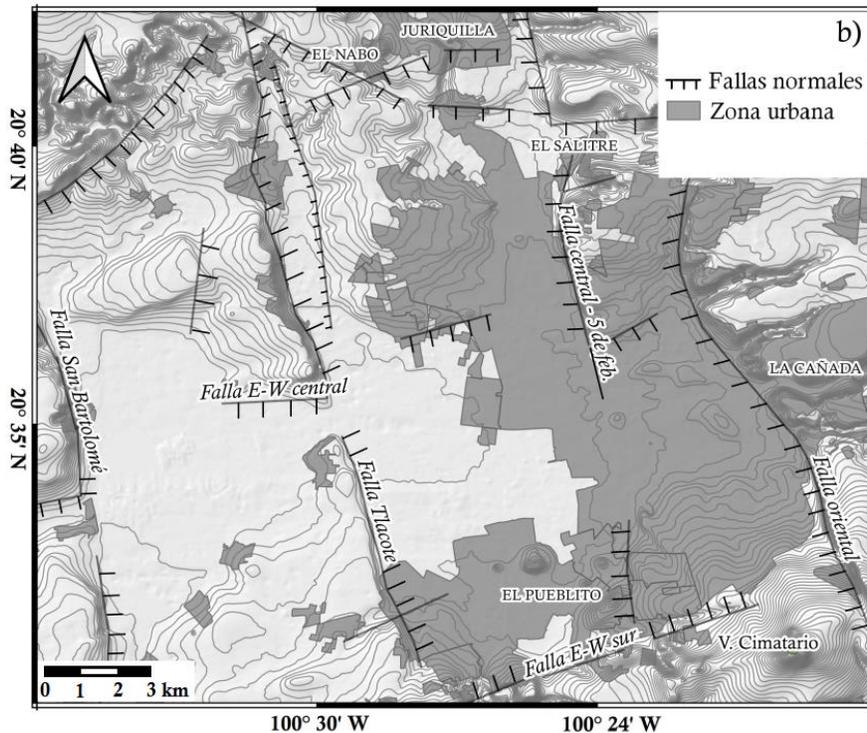


Figura II.2. Mapa local del graben de Querétaro limitado por fallas normales: falla San Bartolomé, falla oriental, falla E-W sur.

## II.2. Estratigrafía local

La estratigrafía de la zona de estudio se ha descrito en diversos trabajos a partir de estudios cartográficos y análisis de núcleos de pozos (e.g. Pasquaré *et. al.*, 1991; Manilla-Aceves, 1996; Alaniz- Álvarez *et. al.*, 2001; Carreón- Freyre *et. al.*, 2005). Las unidades registradas a lo largo del graben se describen en este capítulo (Figura II.3), sin embargo, las unidades volcánicas miocénicas y sedimentarias miocénicas-pleiocénicas son las que se analizaron en este trabajo utilizando la nomenclatura de Carreón-Freyre *et. al.* (2005).

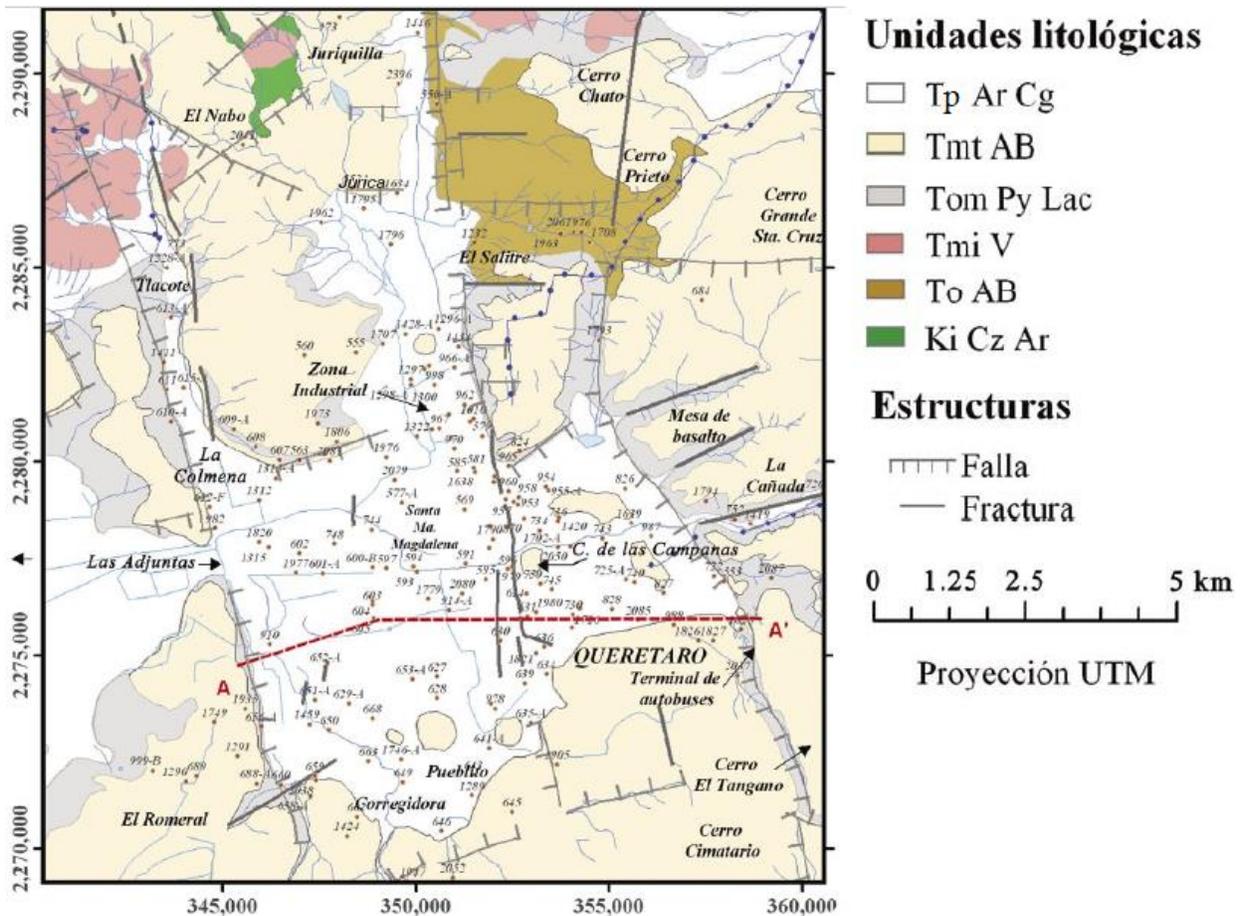


Figura II.3. Mapa geológico del graben de Querétaro (modificado de Carreón-Freyre et. al. (2005)).

- *Calizas y areniscas cretácicas (Ki Cz Ar)*. Esta unidad se considera como basamento de la región que se compone de lutitas, areniscas y calizas cretácicas deformadas. Estas rocas afloran únicamente en la zona de Juriquilla y a profundidades que van de 14 a 400 m (Carreón- Freyre et. al., 2005).
- *Conglomerados y areniscas del Eoceno (Te Cg Ar)*. Esta unidad está representada por conglomerados (de granito, basalto, riolita, lutita y caliza) y areniscas cuyo origen se relaciona con el Conglomerado Rojo de Guanajuato del Eoceno (~49.3 Ma por Aranda et. al., 1998). Esta unidad no aflora y se describe dentro de un pozo en el Nabo.

- *Andesitas basálticas del Oligoceno (To AB/ To A)*. Esta unidad está compuesta por intercalaciones de derrames basálticos y andesíticos fracturados, tobas y lavas félsicas relacionadas con la actividad volcánica de la región durante el Oligoceno medio. Estas rocas afloran en el poblado del Salitre, al NE de la ciudad de Querétaro. Alaniz-Álvarez *et. al.* (2001) lo relaciona con la Andesita el Cedro y cuyas edades son de  $30.6 \pm 0.4$  a  $30.7 \pm 0.7$  Ma (Cerca-Martínez *et. al.*, 2000).
  
- *Domos e ignimbritas del Mioceno inferior (Tmi V)*: Esta unidad se caracteriza por rocas riolíticas y dacíticas que abarcan desde el Oligoceno al Mioceno. Las rocas afloran al norte del graben, cerca del poblado Tlacote el Bajo y Juriquilla y Alaniz-Álvarez *et. al.* (2001) la asocian a la Dacita Obrajuelo.
  
- *Basalto del Mioceno medio (Tmm AB)*. Es una unidad compuesta por derrames basálticos con brechas de contacto que afloran al norte de Querétaro como volcanes que presentan características similares como su localización, tipo de vulcanismo y composición: Palo Huérfano, San Pedro, La Joya y otros aparatos volcánicos menores (Aguirre-Díaz *et. al.*, 1998). La edad propuesta para esta unidad es Mioceno medio a partir de los fechamientos de dichos volcanes de 12.4 Ma (Pérez-Venzor *et. al.*, 1996) y de  $9.9 \pm 0.4$  Ma (Aguirre-Díaz *et. al.*, 1998). Esta unidad subyace o se encuentra intercalada con la unidad sedimentaria lacustre y piroclástica TomPyLac.
  
- *Rocas piroclásticas y lacustres del Oligoceno-Mioceno (Tom Py Lac)*. Estos depósitos fueron nombrados como Volcaniclástico Querétaro (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2001). Es una secuencia de intercalaciones de tobas, gravas, arenas, limos y arcillas con material piroclástico principalmente pómez. El espesor a lo largo de todo el graben es variable debido a las diferencias topográficas, es decir, en los flancos del graben presentan 200 m de espesor, mientras que en el centro tienen espesores de 120 a 320 m (Carreón-Freyre *et. al.*, 2005). Se pueden observar los afloramientos en escarpes de fallas, en bancos de materiales o bien, en los registros litológicos de pozos profundos. Los sedimentos se depositaron en depresiones por lo que su distribución se puede limitar

en zonas elevadas en el tiempo del depósito (Alaniz-Álvarez *et. al.*, 2001). Su origen se relaciona con la actividad volcánica sucedida en el Mioceno medio y tardío, y su interacción con el agua y procesos sedimentarios (Arango-Guevara *et. al.*, 2007). Pasquaré *et.al.*, (1991) le asignan una edad aproximada de 8.3 a 8.4 Ma basándose en la edad del Basalto Querétaro ya que no existen discordancias entre este y los depósitos piroclásticos que los subyacen.

- *Basalto andesita del Mioceno tardío (Tmt AB)* también conocido como Basalto Querétaro (López-Hernández, 1996; Alaniz- Álvarez *et. al.*, 2001), es una unidad que se encuentra intercalada entre los sedimentos lacustres y piroclastos del Oligoceno-Mioceno (TomPyLac) y las areniscas y conglomerados del Plioceno (TpArCg). Pasquaré *et. al.* (1991) la describen como “secuencia basáltica del Mioceno tardío”. Los basaltos afloran a lo largo de todo el graben como mesetas en los bloques de piso, y dentro de los registros litológicos en los bloques de techo. Es una unidad compuesta por derrames de lava basalto-andesítica con brechas de contacto cuyos orígenes son por fisuras, conos cineríticos y aparatos centrales. Uno de los volcanes es el Cimatarío cuya edad es del Mioceno tardío (Aguirre *et.al.*, 2001); Pasquaré *et.al.*, (1991) fechan al Basalto Querétaro en 8.1 Ma por el método K-Ar. Esta unidad está asociada a depósitos piroclásticos conocidos como Pómez Ezequiel Montes (PEM) provenientes de la caldera de Amazcala (ubicada a 30 km al NE de la ciudad de Querétaro) con una edad aproximada de 7.5 y 7.3 (Aguirre-Díaz *et. al.*, 2001), compuesta por materiales que van de lapilli a cenizas claras semiredondeadas por retrabajo y gradación normal.
- *Areniscas y conglomerados del Plioceno (Tp Ar Cg)*. Esta unidad se caracteriza por ser el relleno sedimentario en el graben debido a que en los bloques de piso no hay registros. Consiste en una secuencia con gradación normal que va de gravas, arenas, limos a arcillas intercalada con material piroclástico de composición félsica debido a la erosión de rocas adyacentes (Ojeda-García *et. al.*, 2000). Así como la secuencia granular de sedimentos lacustres y piroclastos (TomPyLac), su espesor varía, ya que en el centro del graben tienen espesores mayores a 100 m, mientras que en los flancos tienen

espesores de 20 m. Se registra como un depósito que va desde finales del Oligoceno al Pleistoceno (Alaníz- Álvarez *et. al.*, 2001). Ochoa *et. al.* (2018) asumen que esta unidad y los aluviones cuaternarios QA1 presentan menor contenido de arcillas que la secuencia sedimentaria lacustre y piroclástica (TomPyLac).

- *Aluviones cuaternarios (Q A1)*. Es una secuencia arenosa que se encuentra en los márgenes del graben con pequeños estratos de gravas cuyo espesor varía de 10 a 80 cm (Carreón-Freyre *et. al.*, 2005). En la parte superior se encuentran arcillas de color oscuro conocidas como “arcillas negras” y material antropogénico.

En la siguiente figura se muestra una columna de la estratigrafía local en la zona del graben de Querétaro con las unidades anteriormente descritas y las que se analizaron a detalle en los próximos capítulos de este trabajo.

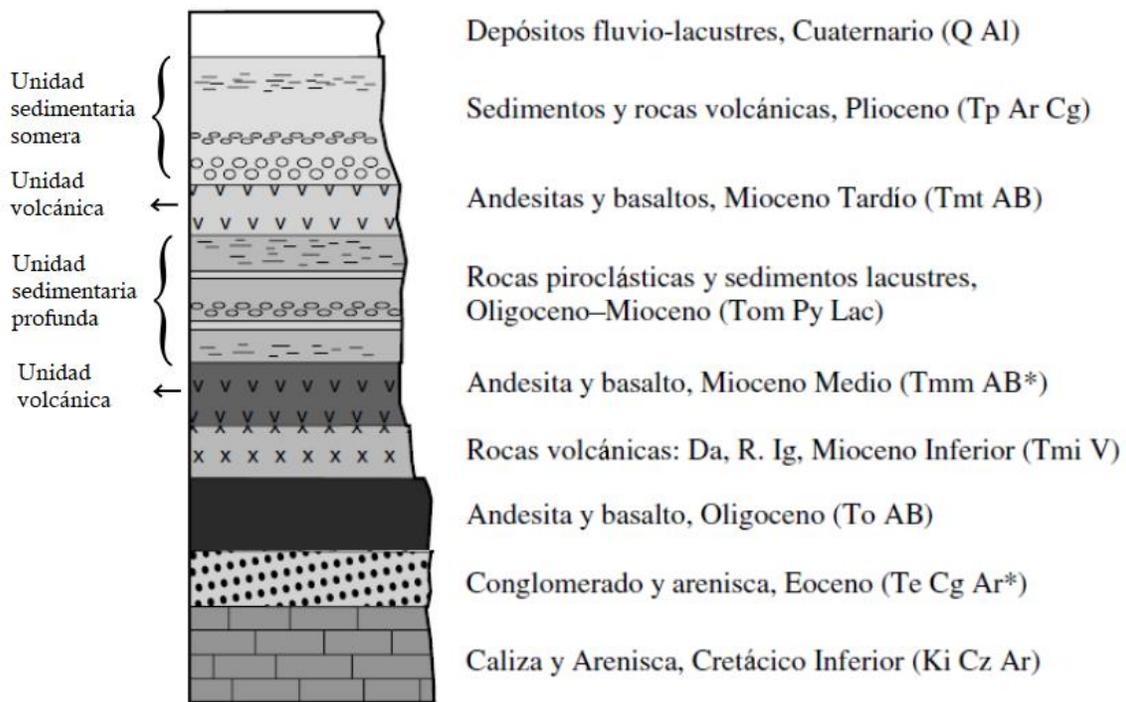


Figura II.4. Columna estratigráfica que presenta las unidades litológicas en la zona de estudio registradas y descritas anteriormente (modificada de Carreón-Freyre *et.al.*, 2005). De lado izquierdo se muestran las unidades estudiadas en este trabajo.

# III

## Metodología

En este capítulo se explica el desarrollo de los métodos que se llevaron a cabo en este trabajo. La metodología fue dividida en dos partes: trabajo de campo, donde se realizó una descripción sedimentológica, el levantamiento de columnas estratigráficas y perfiles geológicos, y una correlación estratigráfica basada en la litología de las unidades estudiadas dentro de la zona de estudio. La segunda parte se llevó a cabo en laboratorio, donde se realizó la caracterización física, química y mecánica de las muestras tomadas en campo y núcleos de pozos. En la siguiente figura se muestra la metodología del análisis de los sitios:

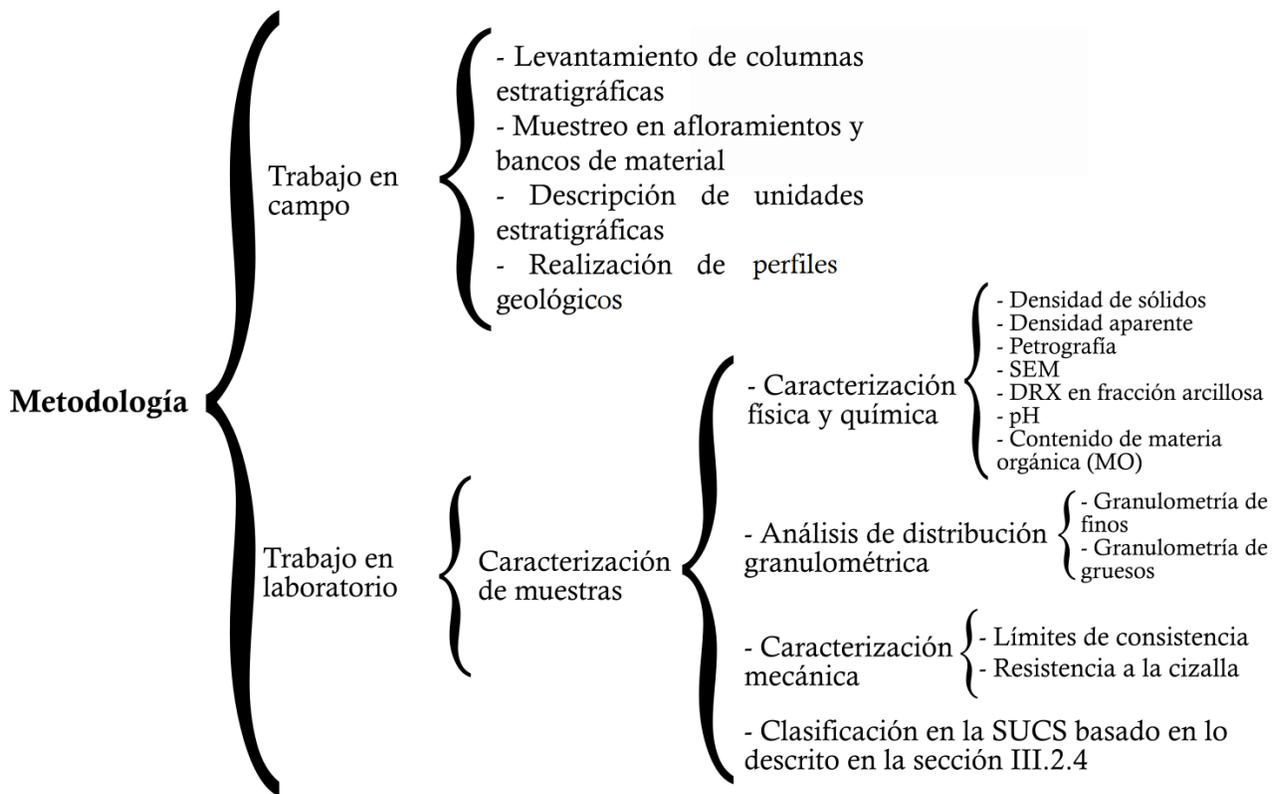


Figura III.1. Mapa mental del desarrollo de la metodología.

### III.1. Trabajo de campo

#### III.1.1. Sitios de análisis litoestratigráfico

Los puntos de verificación estratigráfica (p.v.e.) se refieren a los sitios descritos dentro de la zona de estudio, donde se levantan columnas estratigráficas para identificar la distribución de las unidades litológicas (CFE, 2016). En este trabajo, los p.v.e. se caracterizaron por ser bancos de material y cortes en carreteras de gran tamaño para tener una mejor observación y descripción de las unidades.

La selección de los puntos para el análisis litoestratigráfico se basó en la ubicación con respecto a las fallas que limitan el graben. Cuatro de los sitios estudiados se ubican en el bloque de techo de las fallas, dos son registros de pozos ubicados en la zona central y dos son bancos de material al norte del graben (Antea y Torre Cápita) cuyas altitudes van de 1,809 a 1,836 m.s.n.m. Los otros tres sitios están localizados en el bloque de piso, con altitudes que van de 1,887 a 1,990 m.s.n.m. y sus afloramientos pueden ser fácilmente visibles a lo largo del graben (Centro de Congresos, Boulevard de la Nación al este y BM del Libramiento Norponiente al oeste del graben).

En la siguiente Tabla se muestra la ubicación geográfica y el número de muestras de los diferentes p.v.e.

*Tabla III.1. Puntos de verificación estratigráfica que van de mayor a menor altitud. Entre paréntesis se indica si es afloramiento de carretera o banco de material y el número de muestras obtenidas en cada punto.*

P.V.E.	Coordenadas	# de muestras
Centro de Congresos (afloramiento)	(20°34.70' N, 100°21.18' W)	21
Blvd. de la Nación (afloramiento)	(20°38.83' N, 100°25.48' W)	15
Libramiento Norponiente (banco de material)	(20°39.78' N, 100°30.93' W)	16
Antea (banco de material)	(20°40.17' N, 100°26.82' W)	4
Torre Cápita (banco de material)	(20°40.28' N, 100°26.31' W)	12

En la Figura III.2. se muestran los puntos distribuidos con respecto a la topografía y a la unidad volcánica más joven (TmtAB), considerada como la unidad guía para la identificación de las secuencias sedimentarias estudiadas. Se presenta la localización de la zona donde se obtuvieron los pozos que se analizaron posteriormente.

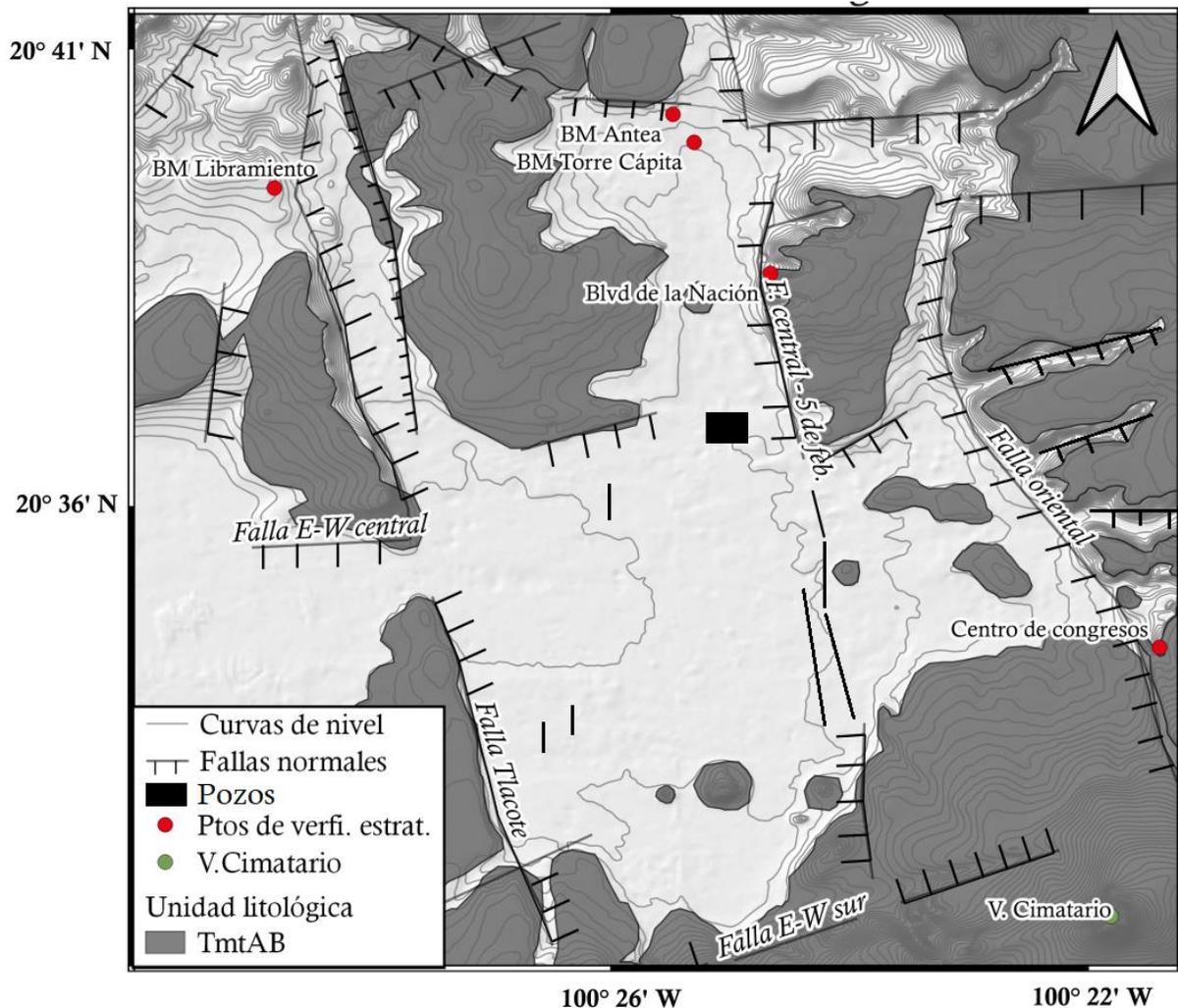


Figura III.2. Mapa de localización de los p.v.e. con respecto a la unidad litológica de derrames de lava (TmtAB) y las fallas dentro del graben de Querétaro. El recuadro negro representa la ubicación de los pozos analizados.

### III.1.2. Levantamiento de columnas estratigráficas y muestreo

El análisis de los puntos se realizó a partir de la descripción general de los afloramientos y bancos de material llevando a cabo la identificación de la litología, medición de su espesor, su inclinación y dirección de inclinación, medición de estructuras como fallas o fracturas,

identificación de estructuras sedimentarias, textura (tamaño de grano), el color y los tipos de contacto entre cada unidad y estrato (Tucker, 1982). El número de muestras de cada p.v.e. dependió del número de estratos cuyas diferencias fueran representativas. Las muestras que se recolectaron fueron *in situ*, con superficies sin alteración, y representativas de cada estrato (Coe *et. al.*, 2010).

Para el levantamiento de columnas estratigráficas se midió el espesor de los estratos con cinta métrica o la vara de Jacob, que consiste en una vara que mide 1.5 m de largo, con un transportador o clinómetro en la parte media superior y un nivelador, que sirve para medir la inclinación de los estratos y el espesor de ellos (Figura III.3) (Blanco, 2012). El procedimiento consistió en medir el buzamiento de las capas con el clinómetro que es ajustado al ángulo de inclinación de las capas. Cuando la persona se inclina al nivel de las capas va determinando así el espesor de la base a la cima de los afloramientos (Boggs, 2013).

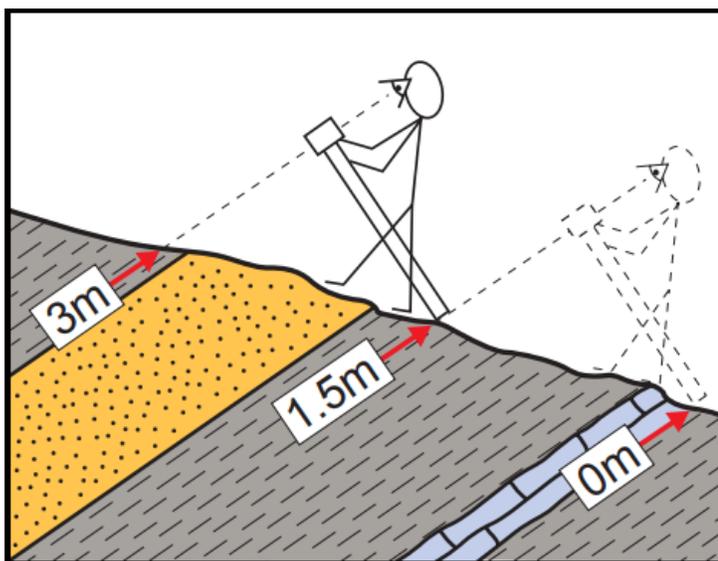


Figura III.3. Método para medir espesor de estratos inclinados con la vara de Jacob de 1.5 m de largo. (tomado de Coe *et.al.*,2010).

### III.1.3. Descripción y verificación de unidades

Las propiedades físicas de los sedimentos que se describieron en campo fueron: color, tamaño de grano, madurez textural o fábrica, que involucra la orientación de los granos (acomodo de clastos hacia cierta dirección) y relación grano a grano (matriz- o clasto- soportado), la forma o grado de redondez de los granos y el grado de clasificación (Boggs, 2013). Estas propiedades son elementos importantes para la interpretación de los mecanismos y ambientes de depósito (Tucker, 1982). Para la descripción mineralógica se empleó la lupa para determinar el contenido de minerales más abundantes como: cuarzo, feldspatos, micas o contenido de

líticos. Las descripciones de las unidades tanto en campo como en registros de pozos se hacen siguiendo los mismos criterios (Nichols, 2009).

#### *III.1.4. Perfil geológico*

Un perfil geológico se define como una representación a profundidad de la estratigrafía y de las estructuras presentes. El levantamiento de perfiles geológicos consistió en determinar la topografía de la región utilizando datos vectoriales (e.g. las curvas de nivel, localidad, cuerpos de agua, calles) con la carta topográfica de Santiago de Querétaro (F14C65) y modelos de elevación digital (DEM) obtenidos del INEGI. Los programas que se manejaron fueron: el programa Google Earth Pro para la ubicación de los sitios y perfiles en superficie usados como datos vectoriales y, el programa QGIS 2.1.8 para elaborar los mapas y perfiles geológicos. Para la interpretación, se utilizó la información obtenida del marco geológico como la estratigrafía y la geología estructural local, así como el registro de pozos y unidades en superficie descritas en campo, sus espesores y estructuras.

#### *III.2. Trabajo de laboratorio*

Las diferentes muestras para la caracterización física fueron muestras *in situ* que se obtuvieron en campo y muestras alteradas obtenidas de los pozos.

Los métodos aplicados dentro del Laboratorio de Mecánica en Geosistemas (LAMG) del Centro de Geociencias UNAM se basaron en las normas ASTM (*American Standard of Testing Materials*). En el laboratorio de Edafología del Centro de Geociencias UNAM, se emplearon normas basadas en las normas oficiales mexicanas (NOM-021-SEMARNAT-2002) y en la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, siglas en inglés). Por último, para la clasificación de los materiales se utilizó el Sistema Unificado para la Clasificación de Suelos (SUCS).

En la tabla siguiente se presentan las propiedades físicas, químicas y mecánicas que se analizaron.

Tabla III.2. Características físicas, químicas y mecánicas de materiales granulares.

Características físicas	Características químicas	Características mecánicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densidad de sólidos</li> <li>- Densidad aparente</li> <li>- Análisis petrográfico</li> <li>- Granulometría de finos</li> <li>- Granulometría de gruesos</li> <li>- SEM</li> <li>- DRX en fracción arcillosa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH</li> <li>- Contenido de materia orgánica (MO)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Límites de consistencia de Atterberg</li> <li>- Resistencia a la cizalla</li> </ul>

### III.2.1. Determinación de características físicas y químicas de materiales granulares

- *Densidad de sólidos.* Se empleó la **norma ASTM D854-10: método para la gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro (ASTM, 2014)** y la **norma AS-04 NOM (SEMARNAT, 2002)**.

La gravedad específica o densidad de sólidos se define como la masa total de los sólidos, mineral y orgánica, dividida por el volumen total de ellos (Flores-Delgadillo, 2010). Este método consistió en la obtención de la densidad únicamente de las partículas minerales utilizando una balanza analítica y picnómetros, dando como resultado cuatro pesos: peso del picnómetro, del picnómetro con suelo (Figura III.4), del picnómetro con suelo y agua, y del picnómetro con agua. Para el peso del picnómetro con muestra y agua se utilizó un sistema de vacío y un desecador para extraer el vacío retenido entre las partículas (Figura III.5). Finalmente, con base en los cuatro resultados se calculó la densidad a partir de la siguiente fórmula (1), donde  $D_s$  es la densidad de sólidos,  $W_s$  es el peso del suelo,  $W_{ma}$  es el peso del picnómetro con agua,  $W_{mas}$  es el peso del picnómetro con agua y suelo y  $V_s$  es el volumen de los sólidos que representa el peso del agua desplazada entre la densidad del agua (SEMARNAT, 2002; Botía-Díaz, 2015):

$$D_s = \frac{W_s}{W_{ma} + W_s - W_{mas}} = \frac{W_s}{V_s} \quad (1)$$

Para realizar las técnicas de granulometría de finos y densidad de sólidos es necesario quemar la MO debido a que influye en la velocidad de sedimentación de la primera técnica, mientras

que en la segunda la fase mineral es únicamente la que se quiere obtener y no la orgánica, además de que los componentes de la MO son cementantes entre las partículas minerales del suelo. Dentro de las normas de estas propiedades se encuentra la metodología para la destrucción de MO (NOM-021-SEMARNAT-2002).



Figura III.4. Pícnómetros con 5 g de suelo para obtener el segundo peso indicado (por duplicado).



Figura III.5. Pícnómetros dentro del desecador para extraer el aire de la muestra y obtener el peso suelo + agua.

- *Densidad aparente.* Se empleó la **norma ASTM D4531-86: análisis de densidad aparente por método de la parafina (ASTM, 2015) y la norma AS-03 NOM (SEMARNAT, 2002)**. La densidad aparente se calcula para determinar la porosidad y conocer la estructura del suelo. Este método se basa en el principio de Arquímedes, donde afirma que “*todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del fluido desalojado*” (ASTM, 2015). El procedimiento se llevó a cabo por triplicado utilizando una balanza (Figura III.6) que determinó los pesos de fragmentos inalterados de suelo por desplazamiento de agua. Los siguientes pesos que se obtuvieron fueron: peso del suelo seco, peso del suelo con parafina (para esto, se sumergieron los fragmentos en cera derretida hasta quedar cubiertos por una delgada capa) y el peso del suelo con parafina sumergido en agua. A partir de este análisis, se

determinó *la porosidad total* del suelo, la cual es una propiedad física que determina el volumen de vacíos por volumen total de la muestra expresada en porcentaje. Se obtiene con base en la siguiente fórmula (2), donde  $Pt$  es la porosidad total,  $Da$  es la densidad aparente y  $Ds$  es la densidad de sólidos (Alonso-Rodríguez, 2010):

$$Pt \%: \frac{(Ds - Da)}{Ds} * 100 \quad (2)$$

- *Petrografía*. Es importante realizar una caracterización petrográfica mediante un análisis macroscópico para identificar características visibles (color, textura, tamaño de grano) y un análisis microscópico por medio de láminas delgadas para clasificarlas con base en su textura a través del porcentaje de matriz y minerales, relación entre ellos y asociaciones mineralógicas (Figura III.7) para obtener información acerca del origen y procesos de formación (SGM, 2017).



Figura III.6. Balanza con muestra sumergida en agua. Abajo se encuentran los 3 fragmentos de suelo con parafina antes de pesar.

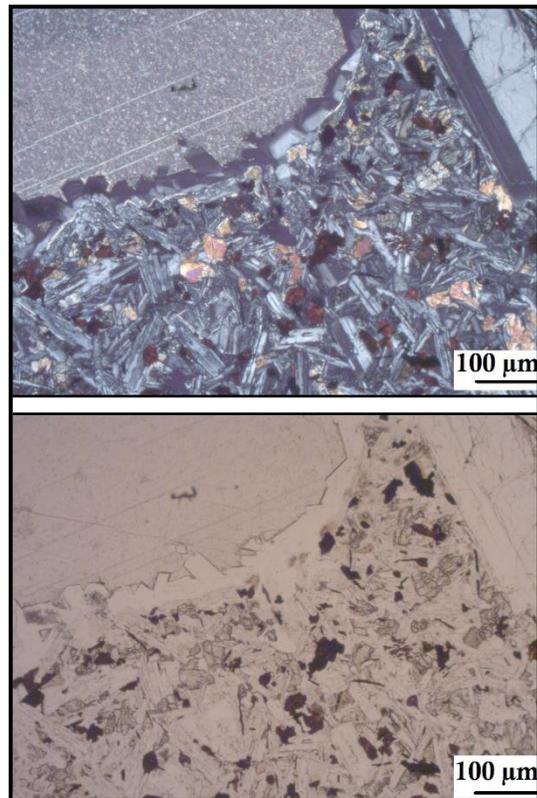
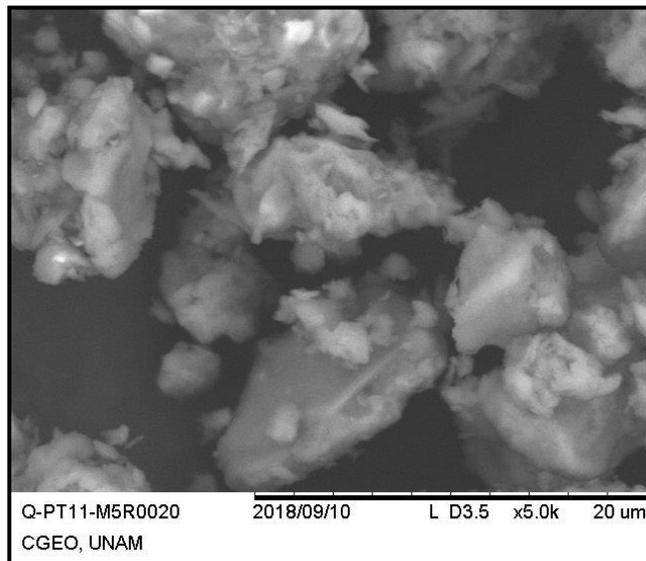


Figura III.7. Petrografía con nícoles cruzados en la imagen superior y paralelos en la inferior de una roca volcánica basáltica vesiculada. Escala de 100 micras.

- *SEM (Microscopía electrónica de barrido)*. Este estudio sirve principalmente para el conocimiento de la morfología y estructura de las fracciones finas de suelo y su relación con otros tamaños de grano y poder identificar condiciones de deposición, además de determinar una diferenciación entre minerales arcillosos detríticos y neoformados (Nichols, 2009). En esta prueba las imágenes son resultado de la interacción entre un haz de electrones de alta energía y la superficie de la muestra que se estudia (Figura III.8). El electrón secundario es un electrón de la muestra que se emite al momento de colisionar con el haz de electrones para el estudio de su morfología. El equipo se encuentra dentro del Laboratorio de Microscopía Electrónica en el Centro de Geociencias de la UNAM.



*Figura III.8. Micrografía SEM que muestra partículas de fracción arcillosa de suelo a escala de 20 micras con bordes subangulares y agregados de menor tamaño. Las partículas de mayor tamaño presentan superficies lisas y una morfología laminar similar a la de una arcilla.*

- *Difracción de Rayos X*. Esta técnica consiste en un haz de rayos X que es difractado a cierta intensidad sobre una muestra en polvo o agregados orientados obteniendo los difractogramas (Anexo5). Este diagrama presenta los ángulos con que difracta el haz en la red cristalina de la muestra y la intensidad con que difracta el mismo para determinar los diferentes elementos que la componen (Nichols, 2009). Los picos representan los elementos que componen la muestra; el eje de las “x” es el ángulo de difracción en grados de cada elemento y el eje de las “y” la intensidad medida en CPS (conteo por segundo) que es la intensidad con que difracta los elementos. En este trabajo se empleó el método de Moore y

Reynolds (1997) dentro del Lab. de Edafología del Centro de Geociencias para la preparación de las muestras orientadas que tiene como objetivo aumentar la intensidad con que difractan en los planos basales de los minerales arcillosos laminares. Primero, se separó el tamaño de arcilla (<2 mm) de la muestra total por medio de tamizado, decantación y centrifugación (con una centrífuga de 700 y 3000 rpm (revoluciones por min.)). La muestra se mezcló 3 veces con una solución de Mg<sup>+</sup> (catión de saturación) que sirve para generar una adsorción del agua medianamente uniforme dentro de los espacios interplanares, y disminuir las variaciones del contenido de agua (Justo *et.al.*, 1999). Posteriormente, la muestra se lavó un par de veces con una solución diluida de alcohol etílico (1:1) para reducir la solución salina y finalmente depositarlas en vidrios de reloj y dejarlas secar en el desecador. Dentro del Lab. de DRX del Centro de Física Aplicada y Tecnología Aplicada de la UNAM se tomó la lectura y posteriormente se saturaron en glicol, más un incremento de temperatura a 500° C para poder aumentar la distancia interplanar y obtener una comparación entre ambas lecturas (es por eso que en los difractogramas del Anexo5 se observan 2 lecturas: con y sin glicol).

- *pH en H<sub>2</sub>O*. Se empleó la **norma ASTM D4972: análisis para la determinación del pH del suelo (ASTM, 2019) y la norma AS-02 NOM y AS-24 NOM (SEMARNAT, 2002)**. El método que se utilizó fue el eléctrico por medio del potenciómetro (Figura III.9), el cual consiste en un electrodo que mide el grado de acidez y alcalinidad del suelo y un termómetro en la suspensión sobrenadante de una mezcla relación suelo-agua 1:2 (SEMARNAT, 2002). Este método sirve para determinar la solubilidad de los minerales y la movilidad de los iones del suelo (ASTM, 2019).

- *Contenido de materia orgánica*. Se empleó la **norma AS-07 NOM: método para la determinación de la materia orgánica (SEMARNAT, 2002)**. Esta norma se basa en el método de Walkley-Black para determinar el contenido de materia orgánica, basándose en la oxidación del carbono orgánico empleando disoluciones de Dicromato de potasio, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, indicador barisulfonato de difenilamina y el sulfato ferroso, este último para realizar la titulación hasta que la mezcla tornara de un azul oscuro a un verde esmeralda (Figura III.10). Esta prueba se realizó por duplicado con matraces Erlenmeyer dentro de la campana de

extracción. La fórmula para obtener el carbono orgánico (3) y el contenido de materia orgánica (4) son las siguientes (SEMARNAT, 2002):

$$C\% = \frac{(\text{Vol.del blanco}-\text{Vol.de la muestra})}{\text{Peso de la muestra (g)}}(N)(0.39) \quad (3)$$

$$MO\% = C\% * 1.724 \quad (4)$$



Figura III.9. Potenciómetro para medir el pH y la temperatura de las muestras. Marca BECKMAN. Los frascos blancos contienen las soluciones buffer para la calibración.



Figura III.10. Solución titulada con sulfato ferroso tornando a un color verde esmeralda.

### III.2.2. Análisis de distribución granulométrica

El análisis granulométrico se basa en la escala de Udden-Wentworth, que determina los diferentes tamaños de grano dentro de un rango de tamaños de gravas (> 2 mm), arenas (2 - 1/16 mm) que a su vez se subdividen en arenas finas, medianas y gruesas, limos (1/16 - 1/256 mm) y arcillas (< 1/256 mm) (Boggs, 2013).

- *Granulometría de gruesos por tamices.* Se empleó la **norma ASTM D422-63: método para el análisis granulométrico del suelo (ASTM, 2007)**. El método consiste en la separación de tamaños de grano grueso por medio de mallas o tamices para obtener la distribución de

tamaño de grano de cada muestra. El número de tamices que se emplearon para delimitar las gravas, arenas gruesas, medias, finas y finalmente limo y arcilla fueron: 4, 10, 18, 40, 80, 200, 400 y <400, como se observa en la Figura III.11. Al inicio, se pesaron 500 g de material y se separó en los tamices dentro del equipo conocido como “Ro-Tap” (para lograr la separación completa de los diferentes tamaños de grano). A partir del peso individual y acumulado se obtuvo el porcentaje de material que pasa en cada tamiz, dato que se empleó para realizar las curvas granulométricas. Estas curvas se graficaron: en el eje Y el material que pasa en porcentaje y, en el eje X la abertura de los tamices en mm (Figura III.12). Finalmente, con base en las curvas, se determinaron los índices granulométricos de uniformidad (5) y de curvatura (6) que sirven para conocer la distribución y gradación del tamaño de grano de las muestras, asimismo, la interpretación de diferentes ambientes de depósito, primeramente, nombrados por Allen Hazen (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005). Las fórmulas para obtener estos coeficientes son las siguientes:

$$Cu: \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad Cc: \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})} \qquad (5) (6)$$

Donde  $D_x$  es el diámetro del tamiz en mm que pasa la muestra. Se utiliza el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) para clasificar los diferentes materiales de tamaño grueso y separarlos de los materiales finos (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005; Botía-Díaz, 2015).



Figura III.11. Tamices apilados de mayor a menor en tamaño de abertura de mm para la separación de los distintos tamaños de grano.

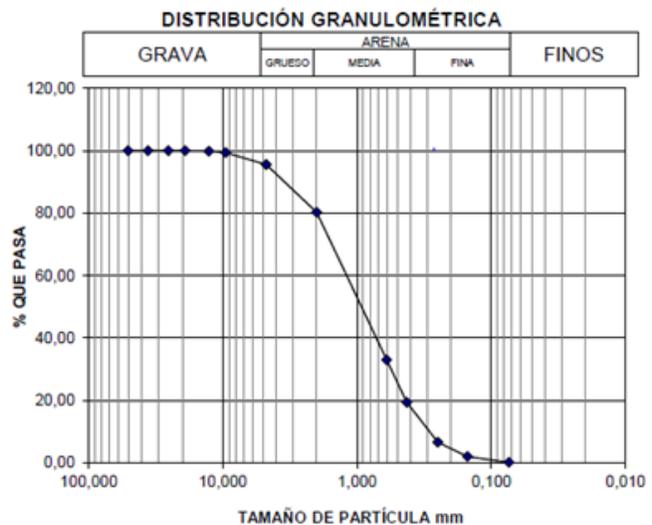


Figura III.12. Curva granulométrica. Eje X: el tamaño de la partícula en mm y el eje Y: el porcentaje que pasa en cada malla. En la parte superior se distribuyen los tamaños de grano a lo largo de la curva.

-Granulometría de finos por hidrómetro. Se utilizó la *norma ASTM 152H: análisis para la determinación de la fracción más fina del suelo (ASTM, 2000)* y *norma AS-09 NOM (SEMARNAT, 2002)*. El método del hidrómetro o densímetro de Goldschmidt (1926) y Bouyoucos (1927) se basa en la Ley de Stokes (1850) que dice que “*la velocidad de sedimentación de partículas en un líquido es en función de su tamaño o área específica*” (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005). Las mediciones con el hidrómetro de 50 g de muestra se tomaron con los tiempos basados en una modificación de Bouyoucos (Villegas-Soto *et.al.*, 1978): 40 seg, 1 min, 10 min, 60 min, 120 min y 24 horas justo después de 1 min de agitación en una probeta de 1 litro (Figura III.13), con la finalidad de separar las partículas gruesas y finas. Con base en los resultados se obtuvieron los porcentajes de las fracciones arenosa, limosa, arcillosa y limosa + arcillosa y, con el porcentaje de cada fracción y el triángulo de texturas de la USDA (Anexo3) se determinó la clasificación textural de cada muestra. La ley de Stokes se expresa (7) a continuación:

$$V: \frac{2}{9} g * \frac{(dP-dF) * r^2}{n} \quad (7)$$

Donde  $V$  es la velocidad de sedimentación,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $dP$  es la densidad de las partículas,  $dF$  es la densidad del fluido,  $n$  es la viscosidad del fluido y  $r$  es el radio aparente de la partícula (Pellegrini, 2018).



Figura III.13. Probetas de 1 litro con muestras ya agitadas para realizar la medición con el hidrómetro.

### III.2.3. Determinación de propiedades mecánicas

- *Límites de consistencia de Atterberg.* Se utilizó **la norma ASTM D4318: método para el análisis de límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad (ASTM, 2017)**. Este método consistió en medir los límites de consistencia de un suelo de acuerdo a los parámetros definidos por A. Atterberg, obtenidos a partir del contenido de agua que presentan los suelos. La plasticidad en mecánica de suelos se define como “*la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse*” (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005). Para comenzar, se necesitaron 100 g de muestra de suelo que pasara el tamiz no. 40 y durante 24 horas se dejó saturar con agua destilada. *Para el límite líquido (LL):* se utilizó la copa de Casagrande (Figura III.14) que determina el número de golpes que puede recibir la muestra antes de cerrarse la ranura al menos 1.27 cm. Este paso se realizó 3 veces o más hasta que disminuyera el contenido de agua de la muestra. En una hoja se anotó el peso y el número de golpes de cada muestra. *Para el límite plástico (LP):* una vez que

podiera manipularse la muestra con las manos, se realizó el método de los rollitos, que tuvieran 3 mm de diámetro hasta llegar a agrietarse. Se anotó el peso de los rollitos. Finalmente, con los datos obtenidos del límite líquido, se realizó la curva de fluidez entre el número de golpes y el contenido de agua % (en donde el valor del límite líquido es el contenido de agua donde da la curva a los 25 golpes). Para el límite plástico se utilizó la misma expresión del contenido de agua ( $C_w$  %) donde se realizó un promedio entre los valores obtenidos de contenido de agua de los rollitos (por duplicado) (Botía-Díaz, 2015). Y, para obtener el índice de plasticidad (valor que representa el intervalo de humedad en el que se comporta como un material plástico) se realizó



Figura III.14. Copa de Casagrande con muestra saturada durante la prueba de LL. La ranura a la mitad de la copa es la que debe cerrarse al menos 1.27 cm con cierto número de golpes.

una resta entre los límites líquido y plástico usando la siguiente fórmula (8) (ASTM, 2017):

$$IP (\%) : LL - LP \quad (8)$$

A partir de la Carta de Plasticidad de Casagrande, se realizó la clasificación de los suelos con base en la SUCS que, emplea los valores del límite líquido y el índice de plasticidad.

- *Resistencia a la cizalla.* Se empleó la **norma ASTM D7181-11: método de ensayo para suelos para compresión triaxial Consolidado-Drenado (CD) (ASTM, 2011)**. La resistencia es la capacidad de un material de soportar esfuerzos que ejercen sobre él. Este método consistió en la determinación de la resistencia a la cizalla de un material saturado que depende de los esfuerzos aplicados, el tiempo de consolidación, la tasa de deformación y los esfuerzos previos al material (ASTM, 2011). Las muestras son cilindros con volumen establecido (Figura III.15) y normalmente se realizan tres pruebas de un mismo material para poder generar la envoltura de falla o bien, los círculos de Mohr. Se realizaron tres etapas dentro del equipo triaxial (Figura III.16): la etapa de saturación, donde la probeta debe presentar un valor entre 0.9 y 1 de la B de Skempton; la etapa de consolidación y la etapa de falla. La fórmula para la obtención de la resistencia se basa en la teoría de Mohr - Coulomb donde explica el criterio de ruptura por medio de la envoltura de falla que es la tangente del círculo de Mohr:

$$\tau: c + \sigma \tan \Phi \quad (9)$$

donde  $\tau$  es la resistencia al corte,  $c$  es la cohesión (punto en el eje de la  $y$  que toca la envoltura de falla),  $\sigma$  es el esfuerzo efectivo y  $\Phi$  es el ángulo de fricción interna obtenidas una vez fallada la muestra (Salas, 2011). La resistencia a la cizalla se puede expresar en esfuerzos efectivos, ya que las condiciones de drenajes están libres y permite el flujo del agua, además de que la tasa de aplicación de cargas es lenta y permiten que la presión de poro sea capaz de disiparse y no excederse (ASTM, 2011).



*Figura III.15. Muestra cilíndrica antes de someterla al equipo triaxial.*



*Figura III.16. Equipo para ensayos triaxiales con muestra a prueba y las diferentes válvulas de presión y drenaje del sistema.*

#### *III.2.4. Sistema Unificado para la Clasificación de los Suelos (SUCS)*

Se empleó **la norma ASTM D2487 para la clasificación de suelos (ASTM, 2017)** basada en la clasificación de Casagrande (Sistema de Clasificación de Aeropuertos) que permite correlacionar dos grupos de propiedades: la distribución granulométrica de materiales gruesos y los límites de consistencia de materiales finos, para lograr una caracterización física y mecánica de los materiales (ASTM, 2017).

En el análisis granulométrico, los materiales gruesos y finos se separan mediante la malla no. 200, cuando más del 50% es grueso o fino. La clasificación consiste en el uso de dos letras para la asignación de los símbolos de cada grupo (ver tabla completa en Anexo6) (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 2005). La primera letra representa el tamaño de grano predominante en el análisis granulométrico, ya sea gravas, arenas, limos y arcillas (G, S, M, C, respectivamente). La segunda letra depende de la primera, pues si resulta ser una muestra

de tamaño grueso (G o S), se utilizan los índices granulométricos para obtener la gradación, por lo tanto, los símbolos serían bien o pobremente graduados (W y P, respectivamente). Mientras que, si resulta ser fino (M o C), se emplea la carta de plasticidad de Casagrande, el índice de plasticidad y el límite líquido cuyo símbolo representaría la baja o alta plasticidad de los materiales (L y H, respectivamente). Sin embargo, hay grupos entre gruesos y finos que contienen ambos tamaños de grano, es decir, que pueden ser materiales gruesos y finos que presentan o no plasticidad. Estos grupos quedarían de la siguiente manera: gravas limosas o arcillosas y arenas limosas o arcillosas (GM, GC, SM o SC, respectivamente).

# **IV**

## **Descripción litoestratigráfica de las secuencias estudiadas**

En este capítulo se presenta la descripción litoestratigráfica de las unidades dentro de los puntos de verificación estratigráfica (p.v.e.) dividida en tres zonas del graben (Figura IV.1): 1) En la zona oriental se describieron los puntos BM Antea, Blvd. de la Nación y Centro de Congresos; 2) En la zona norte, los puntos BM Libramiento y BM Torre Cápita y; 3) Finalmente, en la zona central se presentan las descripciones y caracterizaciones físicas y mecánicas de los pozos analizados en el Laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG). Las correlaciones estratigráficas y los perfiles geológicos de las unidades en las zonas norte y oriental se presentan en el siguiente capítulo.

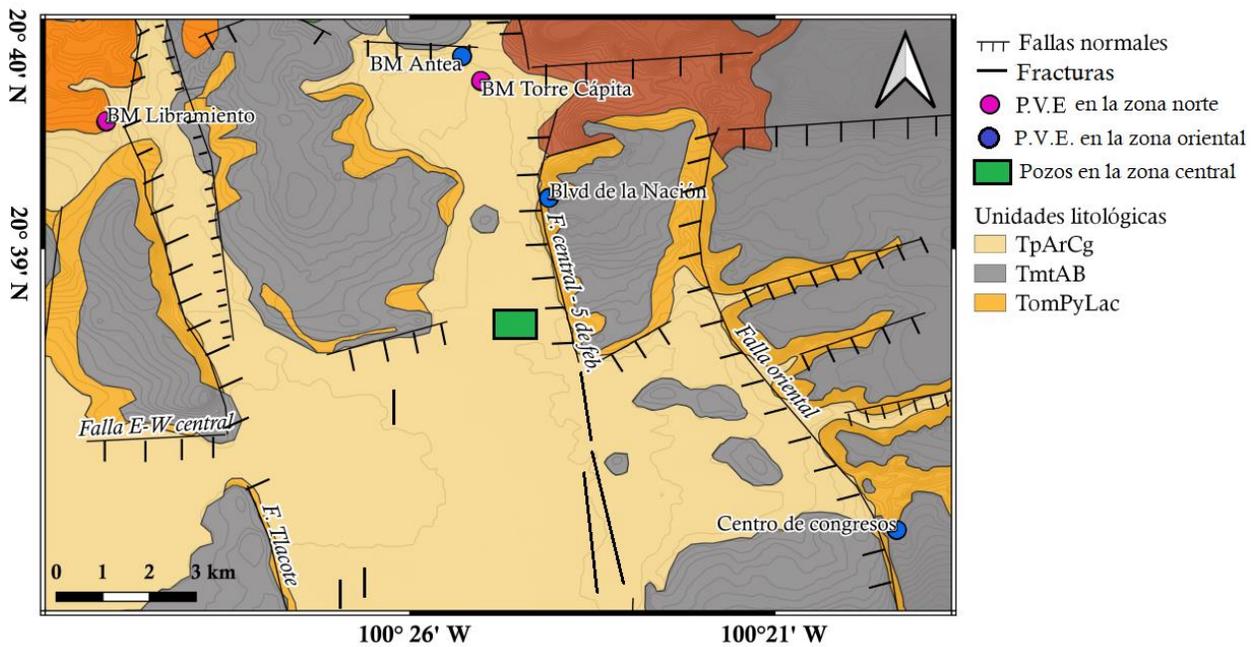


Figura IV.1. Mapa geológico del graben de Querétaro que muestra los p.v.e. estudiados. En la zona norte, se encuentran los puntos de los bancos de material BM Libramiento Norponiente y Torre Cápita. En la zona oriental, los puntos BM Antea, Blvd. de la Nación y Centro de Congresos y el recuadro verde representa la zona central donde se localizan los pozos analizados (modificado de Carreón et.al. (2005)).

#### IV.1. Descripción litoestratigráfica en la zona norte del graben de Querétaro

##### IV.1.1. Sitio BM Torre Cápita

Este banco de material se encuentra en las zonas bajas del graben con una altitud de 1,830 m.s.n.m. y un espesor de 19 m con estratificación planar. Se describieron 7 estratos como se observa en la columna litoestratigráfica de la Figura IV.2.

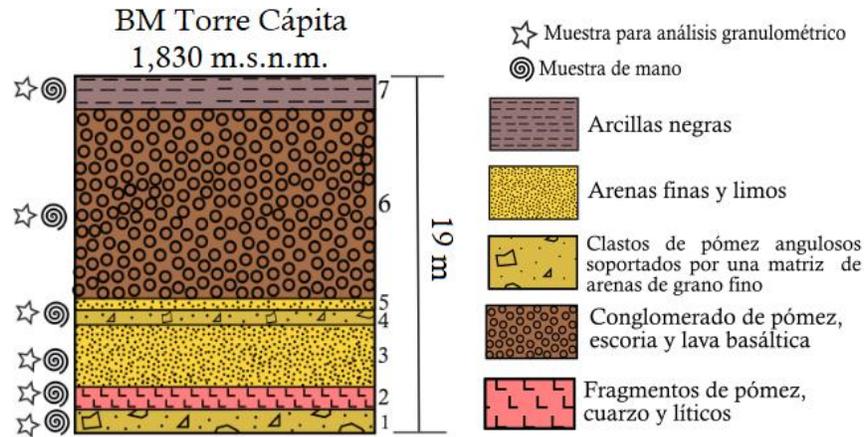


Figura IV.2. Columna litoestratigráfica del BM Torre Cápita basada en las propiedades (tamaño, color, redondez), estructuras sedimentarias y composición de cada estrato. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.

Con una base erosiva, el **estrato 1** (1.5 m de espesor) es un depósito inversamente gradado con clastos de pómez blanco y cuarzos angulosos de tamaño de arenas gruesas soportados por una matriz café de arenisca media y fina con gran cantidad de líticos volcánicos. Hacia la cima aumenta el tamaño de grano a arenas gruesas y gravas cambiando a un color más oscuro debido al aumento del contenido de líticos (Figura IV.3a).

Los siguientes estratos se observan en la Figura IV.3b: el **estrato 2** (0.5 m de espesor) se compone de clastos de pómez gris y blanca, cuarzos y pocos líticos volcánicos angulosos de tamaño de lapilli soportados por una matriz de ceniza blanca.



Figura IV.3. a) Estrato 1 en la base, se observa el aumento de tamaño de grano hacia la cima. b) Sitio del banco de material BM Torre Cápita dirección N-S con un espesor de 19 m. Los números representan el número de cada estrato en las descripciones.

Con un contacto erosivo sobreyace el **estrato 3** (3.5 m de espesor) que comprende una matriz de arenisca fina y mediana de pómez, líticos volcánicos y cuarzos angulosos, presenta un grado de consolidación bajo.

El **estrato 4** (0.5 m de espesor) es una delgada capa de material fino con mayor contenido de líticos volcánicos angulosos y clastos de pómez y cuarzo de tamaño de arenisca media a gruesas.

El **estrato 5** (0.8 m de espesor) se compone de una matriz de arenisca fina y mediana café claro con clastos de pómez angulosos y pocos líticos volcánicos de tamaño de arenas gruesas. Los estratos 2 a 5 están afectadas por fracturas verticales.

En la Figura IV.4. se observa el contacto erosivo entre los dos estratos ubicados en la cima. El **estrato 6** (10.5 m de espesor) está compuesto por una matriz de arenisca mediana con líticos volcánicos y poca pómez soportando bloques redondeados (8-40 cm) de roca gris de composición basalto-andesítica, algunas con vesículas, sin orientación preferencial con respecto a la estratificación y mal clasificados. El **estrato 7** (1.7 m de espesor) está compuesto de un depósito masivo de arcilla negra con alto contenido de materia orgánica.



*Figura IV.4. Contacto erosivo entre las "arcillas negras" del estrato 7 y el conglomerado del estrato 6.*



mayor cantidad de agua que las arenas, además de presentar un alto contenido de materia orgánica (MO). Por debajo del estrato arcilloso se encuentra el estrato 6 clasificado como gravas bien graduadas (GW) con matriz arenosa correspondientes al depósito de conglomerado. El resto de la secuencia de 0 a 6.8 m, se clasificó como arenas bien graduadas (SW) en los estratos 1, 4 y 5 que corresponden a depósitos de arenisca fina y medianas; y dentro de los estratos 1, 2 y 3 con mayor contenido de areniscas medianas compuestas de ceniza y pómez se clasificó como arenas pobremente graduadas (SP).

#### IV.1.2. Sitio BM Libramiento Norponiente

El banco de material se localiza en la carretera del Libramiento Norponiente con una altitud de 1,887 m.s.n.m. y un espesor de 23 m con estratificación planar. Se describieron 12 estratos como se muestra en la columna litoestratigráfica (Figura IV.5).

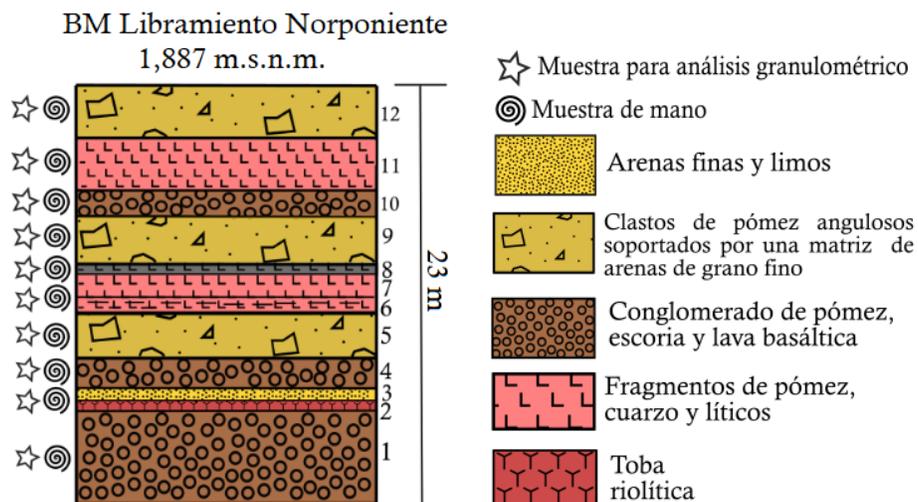


Figura IV.5. Columna litoestratigráfica del BM Libramiento. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.

En la Figura IV.6. se observan los estratos 1-9 que comienza con una base erosiva, el **estrato 1** (5 m de espesor) está compuesto por 2 capas de las cuales se distinguen por el grado de consolidación. La capa inferior presenta una matriz de arenisca fina anaranjado con líticos volcánicos, cuarzo y pómez angulosos mal clasificados. La capa superior es una arenisca

gruesa y gravas redondeados de composición ígnea gris oscuro mal clasificados soportado clasto a clasto con matriz de arenisca fina con un grado de consolidación bajo.



*Figura IV.6. Afloramiento del banco de material BM Libramiento Norponiente con dirección N-S y 23 m de espesor. Los números representan el número de estrato en las descripciones y las líneas puntadas los contactos entre los estratos.*

Con un contacto erosivo sobreyace el **estrato 2** (0.5 m de espesor) que se compone de clastos de pómez y líticos verdes y rojizos angulosos de tamaño de arenas gruesas a gravas mal clasificados soportados por una matriz de ceniza fina de gris claro.

El **estrato 3** (0.75 m de espesor) está compuesto por areniscas fina y mediana con líticos angulosos blancos, rosáceos y rojizos bien clasificados.

El **estrato 4** (1.6m de espesor) se compone de bloques de color oscuro redondeados mal clasificados y soportados por una matriz de arenisca fina y mediana con líticos volcánicos y cuarzo.

El **estrato 5** (2.5 m de espesor) comprende una matriz de arenisca fina con líticos volcánicos, cuarzo y pómez angulosos mal clasificados.

El **estrato 6** (0.25 m de espesor) descrito como una delgada capa cementada de pómez gris bien clasificada de tamaño de lapilli; presenta un contacto erosivo con el estrato 7 (Figura IV.7a). El **estrato 7** (1.5 m de espesor) está compuesto por una matriz de color claro con líticos, cuarzo y pómez angulosos de tamaños que van de lapilli a bloques, mal clasificados.

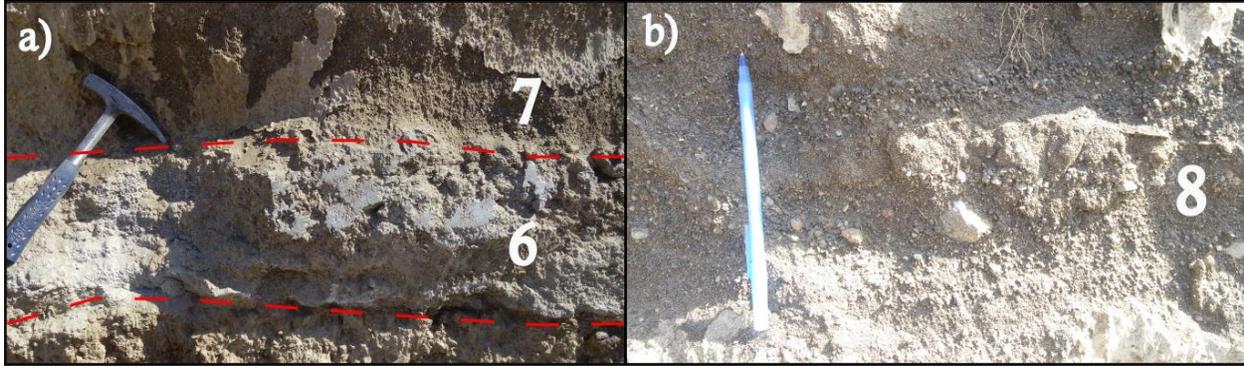


Figura IV.7. a) Las líneas punteadas corresponden al contacto entre el estrato 6 y 7. b) Estrato 8 de color oscuro con alto contenido de escoria.

El **estrato 8** (0.5 m de espesor) es una delgada capa o lente, compuesta por una matriz de color oscuro con clastos de escoria negra vesiculada de tamaños de ceniza a lapilli, también presenta poca cantidad de pómez y líticos volcánicos angulosos de tamaño de ceniza mal clasificados (Figura IV.7b).

El **estrato 9** (2.6 m de espesor) que sobreyace el lente, está compuesto por una matriz de arenisca fina y mediana café claro con líticos de escoria y pómez angulosa, con gravas de escoria negra angulosa mal clasificados.

El **estrato 10** (1.5 m de espesor) está compuesto por una matriz de arenisca fina café claro con líticos de color negro, café y blanco, consolidada con bloques angulosos de color gris claro mal clasificados.

El **estrato 11** (2.7 m de espesor) es un depósito con gradación inversa, la parte inferior tiene una matriz de ceniza con clastos gris oscuro y de pómez blanca angulosos bien clasificados. La capa superior está compuesta mayormente por clastos de pómez angulosos blancos y grises de tamaño de lapilli bien clasificados. La capa superior presenta clastos de pómez gris y bloques andesíticos gris claro angulosos soportados por matriz de ceniza y mal clasificados.

Finalmente, en la cima se encuentra el **estrato 12** (3 m de espesor) compuesto por material inversamente gradado donde la base presenta una matriz de arenisca mediana con menor cantidad de bloques basálticos grises y pómez gris y blancos angulosos; en la cima predominan los bloques grises claro con pómez blanca y escoria angulosos.

Tabla IV.2. Propiedades físicas del banco de material BM Libramiento Norponiente.

# de estrato prof. (m)	G. de gruesos			Ds g/cm <sup>3</sup>
	Cc	Cu	SUCS	
12 (22.4m)	0.5	14.2	GP	2.36
12 (20.9m)	0.9	12.6	SW	2.17
11 (19.4m)	1.3	3.2	SP	2.22
11 (18.5m)	0.3	14.5	GP	2.33
11 (17.6m)	1.4	26.3	SW	2.27
10 (16.7m)	0.5	8.5	SW	2.31
9 (15.2m)	0.4	14.0	SW	2.33
8 (12.6m)	0.7	3.5	SP	2.37
7 (12.1m)	0.4	7.3	SP	2.21
6 (10.6m)	1.9	31.5	SW	2.38
5 (10.35m)	0.4	3.0	SP	2.34
4 (7.85m)	0.2	28.5	SW	2.42
3 (6.25m)	1.1	2.2	SP	2.39
2 (5.5m)	0.3	36.6	SW	2.50
1 (4m)	1.0	11.1	SW	2.56
1 (1m)	0.5	18.7	SW	2.25

Con base en la SUCS : SW son arenas bien gradadas, SP son arenas pobremente gradadas, GP son gravas pobremente gradadas.

En la Tabla IV.2. se presenta las propiedades de cada estrato, su granulometría y clasificación de la SUCS para obtener información de la distribución de tamaños de grano. Los estratos 3, 5, 7, 8 y la parte superior del estrato 11 se clasificaron como arenas pobremente graduadas (SP) que de acuerdo a lo descrito corresponden a depósitos de escoria y pómez. Los estratos 1, 2, 4, 6, 9, 10 y la parte inferior de los estratos 11 y 12 se clasificaron en arenas bien graduadas (SW) correspondientes a depósitos de conglomerados y areniscas medianas y finas con clastos angulosos. Mientras que el resto de los estratos 11 y 12 se clasificaron como gravas pobremente graduadas (GP) que corresponden a los depósitos de bloques y clastos angulosos. En cuanto a las densidades de sólidos que permite obtener información sobre la composición y contenido de la fase mineral de la muestra, es una propiedad índice. Los estratos que presentaron valores entre 2.40-2.60 g/cm<sup>3</sup> fueron 1, 2 y 4, estratos que presentaron bloques de basalto y areniscas de cuarzo y líticos volcánicos. Los estratos con densidades entre 2.30-2.40 g/cm<sup>3</sup> fueron 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11 y 12 compuestos principalmente de líticos, cuarzos y poca pómez y, los estratos con densidades menores a 2.30 g/cm<sup>3</sup> fueron 1, 7, 11, y 12 están compuestos de ceniza y clastos de pómez.

## *IV.2. Descripción litoestratigráfica en la zona oriental del graben de Querétaro*

### *IV.2.1 Sitio BM Antea*

En 1,836 m.s.n.m. se encuentra este banco de material de 15 m de altura y estratificación planar con 4 estratos y un contacto erosivo en la base (Figura IV.8). Se realizó una columna litoestratigráfica (Figura IV.9) cuya descripción se presenta a continuación comenzando de la base a la cima.



*Figura IV.8. Sitio del banco de material BM Antea con dirección E-W y espesor máximo de 15 m. Los números representan el número de estrato en las descripciones.*

El **estrato 1** (3 m de espesor) está compuesto por clastos de pómez blancos, angulosos y alterados soportados por una matriz de arenisca de líticos alterados a café oscuro.

Con un contacto erosivo sobreyace el **estrato 2** (4 m de espesor) que contiene capas de material fino soportando clastos de pómez de tamaño de arenas gruesas a gravas con estratificación cruzada cuyo echado es 25° SW y capas lenticulares de tamaño de arenisca gruesa soportado clasto a clasto.

El **estrato 3** (3 m de espesor) se compone de un conglomerado de bloques grises redondeados y alargados orientados con respecto a la estratificación, de composición basáltica con alta vesicularidad, con tamaños de 30 cm a 1 m y mal clasificados. Están soportados por una matriz fina.

En la cima, con un contacto erosivo se encuentra el **estrato 4** (5 m de espesor) compuesto de material de tamaño de arenisca mediana y fina café claro con líticos de color oscuro rojizos y poco contenido de cuarzo con laminación.

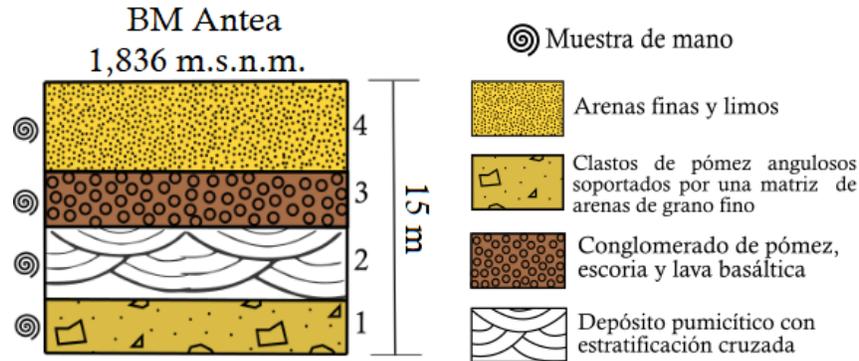


Figura IV.9. Columna litoestratigráfica del BM Antea. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.

#### IV.2.2. Sitio Afloramiento Boulevard de la Nación

Este sitio se caracteriza por presentar una unidad granular de gran espesor ubicada entre dos unidades de rocas volcánicas descritas en la base y cima del afloramiento. El afloramiento se encuentra a una altitud de 1,947 m.s.n.m. y tiene una potencia de 112 m, con una inclinación de estratificación de 3-4° con dirección E. Dentro de la columna litoestratigráfica (Figura IV.10) se describieron 19 estratos comenzando de la base a la cima.

El **estrato 1** (4 m de espesor) está compuesto por una roca volcánica gris oscuro con textura porfídica, exhibe vesículas rellenas de calcita y alteración a minerales verde olivo, se observan cristales de plagioclasa y piroxenos alterados. En lámina delgada se observa una matriz holocristalina (vol. 60%) con plagioclasas con maclado simple (algunas presentan zoneamiento), olivinos y abundantes minerales opacos (hematita). Los fenocristales (vol. 40%) fueron cristales de piroxenos alterados (vol. 20%) y plagioclasas alteradas a sericita con maclado simple (vol. 60%) y polisintético (vol. 20%); las vesículas rellenas de calcita tienen bordes de alteración.



El **estrato 2** (6 m de espesor), estratigráficamente arriba del estrato 1 consiste en lapilli de color anaranjado pálido compuestas de líticos oscuros redondeados, cuarzo y clastos de pómez rosáceos, blancos y verdosos angulosos, alterados y medianamente clasificados. En lámina delgada (Anexo1) se observa una textura vítrea (vol. 80%) con presencia de microcristales (vol. 20%) de cuarzo altamente fracturado (vol. 60%), feldespato de sanidina (vol. 10%), biotita (vol. 20%), plagioclasa con maclado polisintético (vol. 10%) y minerales opacos (magnetitas). Contiene líticos angulosos con plagioclasa, sanidina y minerales opacos. Una de las texturas presentes es *shards* que representan los restos de roca con forma triangular que quedan después de que las burbujas se fragmentan.

En la Figura IV.11a se observa el contacto entre el estrato 2 y el **estrato 3** (2 m de espesor) que lo sobreyace. Consiste en capas delgadas laminares de pómez angulosos muy finos alterados a minerales verde olivo con mayor contenido de líticos alterados, la matriz es de tamaño de ceniza. Presenta estratificación cruzada (Figura IV.11b) y grietas de desecación. En lámina delgada se observa textura vítrea como matriz (vol. 85%) con microcristales (vol. 15%) de cuarzo (vol. 70%), plagioclasa (vol. 30%) y minerales opacos (hematita), contiene vesículas rellenas y líticos con cuarzo. Presenta clastos de pómez muy vesiculadas con presencia de cuarzo dentro de ellas (Figura IV.12). Los cristales contenidos dentro de la matriz presentan una alineación de flujo.

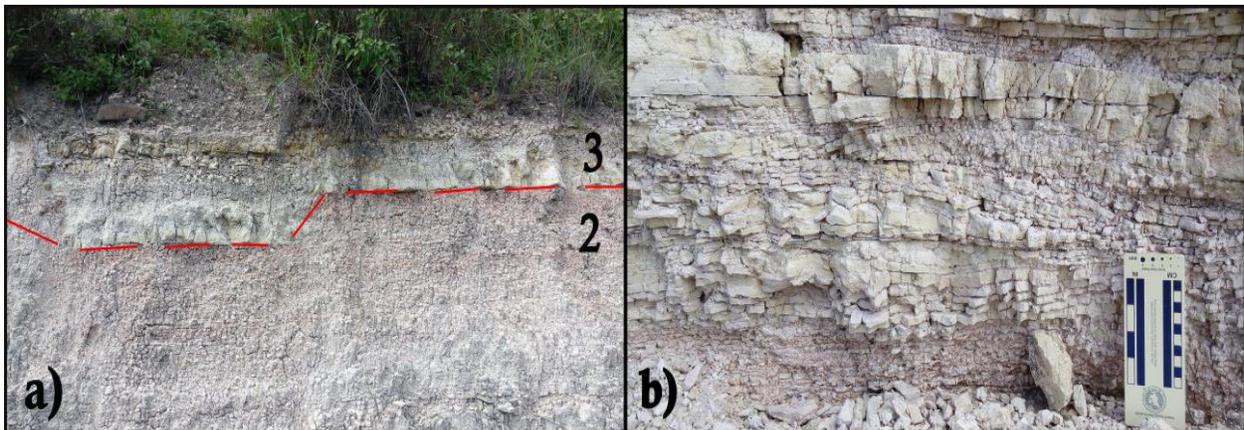


Figura IV.11. Los números representan el número de estrato. a) La línea roja representa el contacto entre los estratos 2 y 3. b) Estratificación cruzada en el estrato 3.

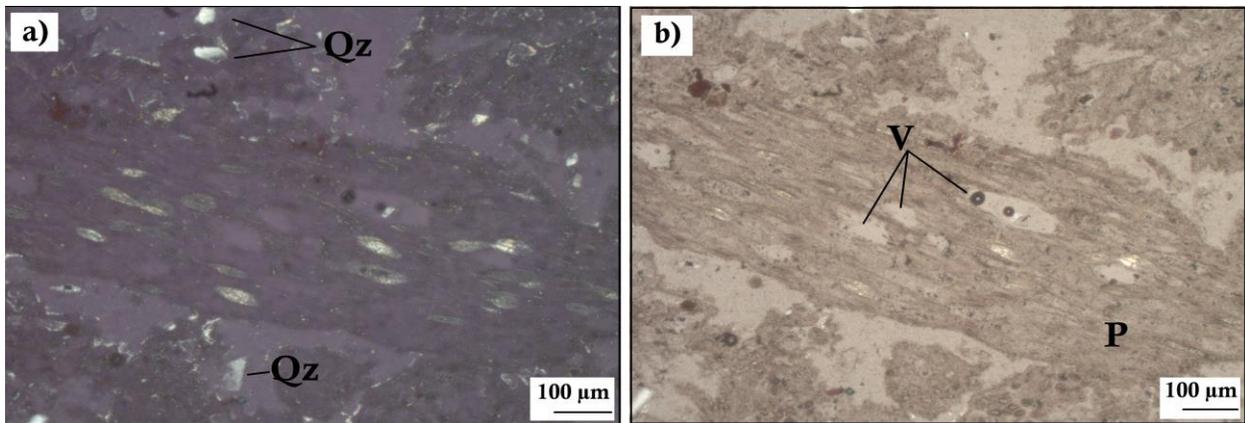


Figura IV.12. Petrografía del estrato 3. a) con nícoles cruzados con fenocristales de cuarzo (Qz) y b) nícoles paralelos con fragmentos de pómez (P) con vesículas (V) rellenas.

En la Figura IV.13 se observa el afloramiento con dirección N-S y los contactos de algunos estratos. El **estrato 4** (3 m de espesor) consiste en un depósito con gradación inversa que contiene líticos de obsidiana alterados y cuarzo dentro de una matriz de grano fino. Tiene clastos de pómez blanca alterados, subredondeados, mal clasificados y sus vesículas están rellenas de calcita. En lámina delgada (Figura IV.14) presenta una textura vítrea (vol. 80%) con fenocristales (vol. 20%) de cuarzo (vol. 80%), feldespato de sanidina (vol. 10%), biotita (vol. 10%) con texturas de *shards* y vesículas rellenas de calcita.



Figura IV.13. Afloramiento sobre la avenida Blvd. de la Nación con un espesor de 112 m. Los números representan el número de estrato en las descripciones.

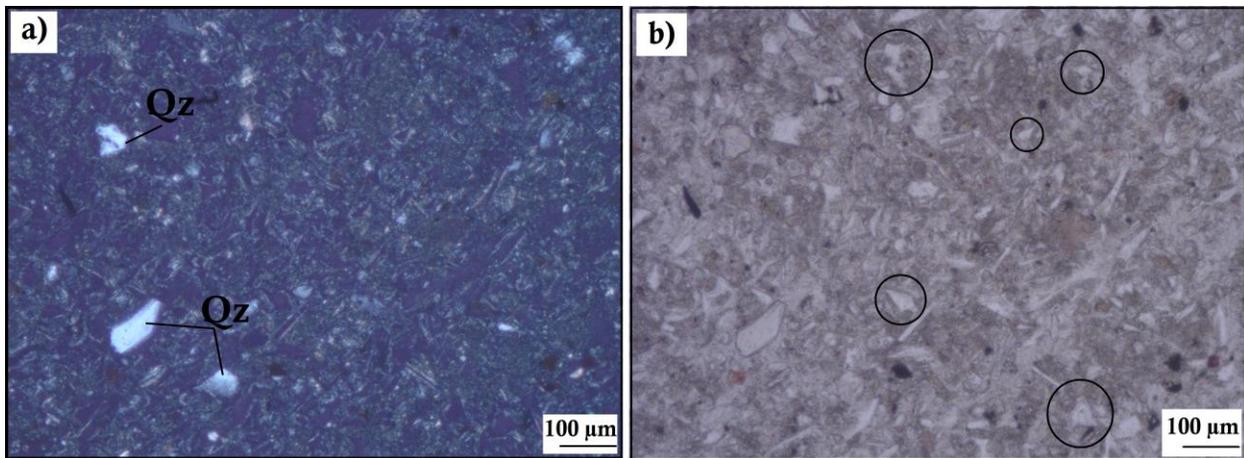


Figura IV.14. Petrografía del estrato 4. a) con nícoles cruzados con fenocristales de cuarzo (Qz) fracturado y b) nícoles paralelos con matriz vítrea con texturas shards encerrados en círculos.

El **estrato 5** (2 m de espesor) se encuentra normalmente gradado con clastos de pómez blancos angulosos de tamaño de arenas gruesas a bloques de 2 cm y una matriz de arenisca fina con líticos mayormente alterados a rojo y cuarzo.

El **estrato 6** (9 m de espesor) consiste en un depósito de clastos de pómez redondeados orientados con respecto a la estratificación, con tamaño de bloques de 1 a 4 cm de color gris soportados en una matriz fina anaranjado pálido. En lámina delgada (Anexo1) se observa una textura vítrea (vol. 80%) con microcristales de cuarzo (vol. 70%), plagioclasa (vol. 20%), anfíboles alterados (vol. 10%) y minerales opacos (hematita). Las vesículas presentan orientación con líticos angulosos con cristales de cuarzo, sanidina, anfíboles y minerales opacos.

El **estrato 7** (2 m de espesor) que sobryace discordantemente al estrato 6, está constituido por líticos, cuarzo, clastos de pómez blanca alterados, de tamaño de arenas gruesas a gránulos de 1 cm. En lámina delgada (Anexo1) exhibe una textura vítrea (vol. 70%) con microcristales (vol. 20%) de cuarzo (vol. 50%) y plagioclasa fracturada (vol. 40%) con maclado polisintético, sanidina (vol. 10%) y minerales opacos (hematita), contiene líticos de plagioclasa (vol. 10%).

El **estrato 8** (2 m de espesor) consiste en un depósito que contiene clastos angulosos de pómez del tamaño de arena gruesa y grava contenidos en una matriz de arenisca fina claro. Presenta raíces (se describe como “raíz” a estructuras tabulares verticales de color negro con rastros de

materia orgánica). En lámina delgada (Figura IV.15) se observa el contacto entre los estratos 8 y 9, presenta un cambio de color; el estrato 8 se describió como una capa de abundante matriz (vol. 90%) muy alterada café oscuro con grietas rellenas de materia orgánica, con microcristales de cuarzo (vol. 80%), sanidina (vol.15%) y fragmentos de pómez vesiculares (vol. 5%).

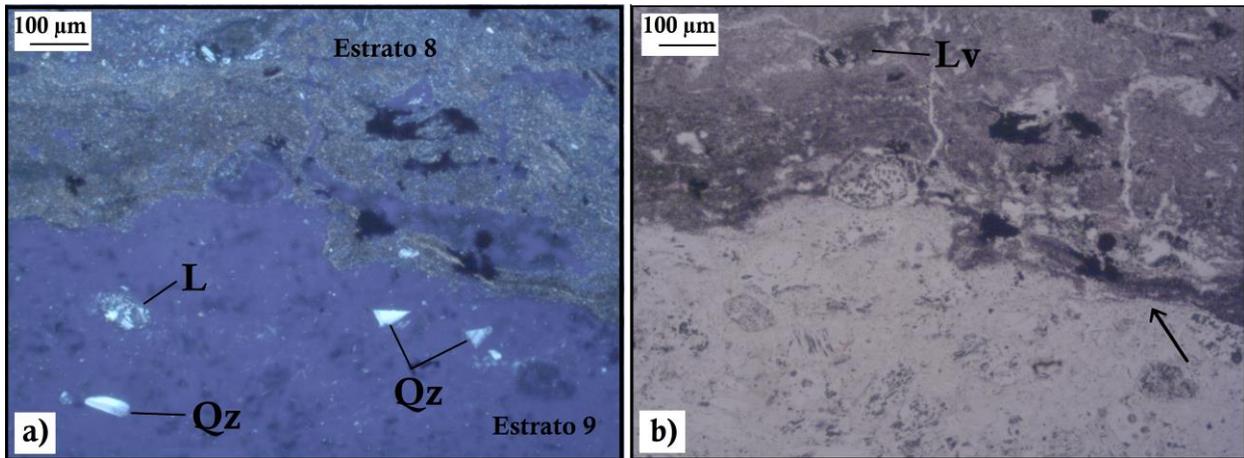


Figura IV.15. Petrografía del contacto entre estrato 8 y 9 (flecha). a) con nícoles cruzados se observa una capa de material piroclástico con matriz vítrea y fenocristales de cuarzo (Qz) y líticos volcánicos que contienen cuarzo (L) y b) con nícoles paralelos una capa alterada con líticos vítreos (Lv).

El **estrato 9** (2 m de espesor) consiste en un depósito de pómez clasto soportado. Los clastos de pómez varían de gris a blanco, bien clasificados con tamaño de ceniza. Contiene pocos líticos volcánicos y presentan estructuras laminares. En lámina delgada se observa una matriz con textura vítrea (vol. 90%) con fenocristales (vol. 10%) de cuarzo (vol. 70%), sanidina (vol. 30%), minerales opacos y líticos compuestos de cuarzo.

En la Figura IV.16. se muestra la secuencia de los estratos 10, 11, y 12. El **estrato 10** (3 m de espesor) consiste en un depósito de líticos alterados, pómez vesiculados y cuarzoes angulosos del tamaño de arenas finas y medianas. En lámina delgada (Anexo1) se observa una textura vítrea (vol. 80%) con microcristales (vol. 20%) de cuarzo (vol. 10%), sanidina (vol. 7%) y minerales opacos (vol. 3%). El **estrato 11** (4 m de espesor) está compuesto por una matriz de arenisca y limolita café oscuro con presencia de raíces y una base de clastos de pómez blanca y verde, angulosos alterados de tamaño de gravas.

El **estrato 12** (1 m de espesor) se compone de un material consolidado de tamaño de ceniza muy fina gris oscuro con clastos de pómez angulosos, pocos líticos volcánicos y cuarzo.



*Figura IV.16. Los números representan el número de estrato en las descripciones. Las líneas punteadas representan los contactos entre los estratos 10, 11 y 12.*

El **estrato 13** (3 m de espesor) comprende delgadas capas de arenisca fina y mediana naranja claro con gran cantidad de líticos intercaladas de clastos de pómez redondeados de tamaño de gravas.

El **estrato 14** (4 m de espesor) está compuesto por una matriz de arenisca fina café oscuro con presencia de raíces y clastos de pómez alterados a rosa claro, son clastos angulosos, mal clasificados.

Los **estratos 15** (3 m de espesor) y **16** (1 m de espesor) presentan características similares a los estratos 13 y 14. El **estrato 17** (6 m de espesor) se describió como un material consolidado con pocos clastos de pómez de tamaño de gravas y arenisca gruesa angulosos soportados por una matriz de arenisca mediana compuesta de muchos líticos volcánicos y poco cuarzo.

El **estrato 18** (5 m de espesor) está compuesto por una matriz de material fino café oscuro con bloques monomícticos angulosos de color gris oscuro, vesiculados. En campo los depósitos antes descritos están cubiertos por la mezcla entre bloques de derrames de lava y sedimentos que interactúan cuando el derrame se desplaza a altas temperaturas sobre los sedimentos húmedos. Este depósito se conoce como *peperita*.

Finalmente, en la cima, el **estrato 19** (50 m de espesor) está compuesto por un depósito masivo de rocas volcánicas, en los bordes presenta alta vesicularidad rellenas de calcita con alteración de minerales a verde olivo, presenta una textura afanítica con cristales de olivino y plagioclasa alterados.

#### *IV.1.3. Sitio Afloramiento Centro de Congresos*

Como se observa en la Figura IV.17, el afloramiento se encuentra a una altitud de 1,990 m.s.n.m. con 27 m de altura que es cortado por una falla de tipo normal en la parte media del afloramiento con una dirección de echado S.



*Figura IV.17. Afloramiento del sitio del Centro de congresos con dirección N-S. El espesor máximo del afloramiento es de 27 m. Los números representan el número de estrato en las descripciones.*

En la columna litoestratigráfica (Figura IV.18) se describieron 7 estratos de la base a la cima. El **estrato 1** (3.3 m de espesor) está compuesto por un depósito normalmente gradado de cenizas a bloques de escoria angulosos de color rojo, con líticos de obsidiana y cuarzo, soportados clasto a clasto (Figura IV.19), con alta vesicularidad rellenas de calcita.

El **estrato 2** (6 m de espesor) se compone de lavas máficas grises con textura porfídica con cristales de plagioclasa y olivino alterados con alta vesicularidad. En lámina delgada se observó una textura holocristalina con una matriz microcristalina (vol. 60%) con cristales de plagioclasas, piroxenos alterados y minerales opacos; con fenocristales (vol. 40%) de olivinos con alteración de borde a idingsita (vol. 60%) y plagioclasas con maclado simple alteradas a

sericita (vol. 40%); pocas tienen zonamiento (Figura IV.20). La alteración del olivino es causada por la presencia de agua lo que hace que el cristal sea visible con un color rojizo.

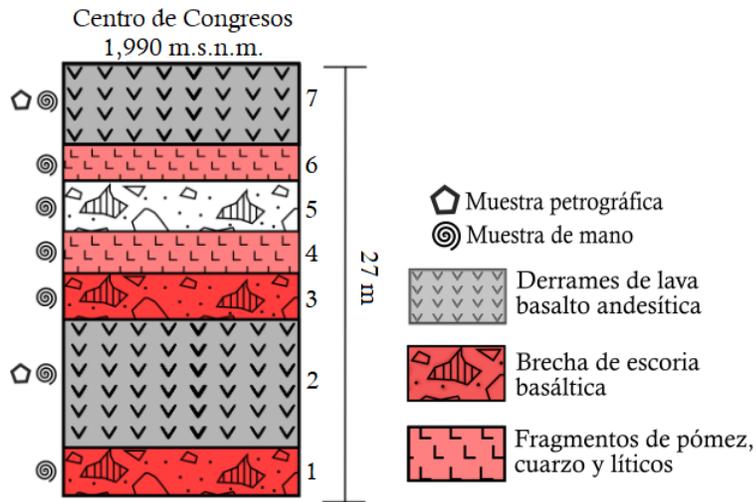


Figura IV.18. Columna litoestratigráfica del sitio Centro de Congresos. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.



Figura IV.19. Base del afloramiento con derrame de lava fracturado (2) y su brecha basáltica (1). Los números representan el número de estrato en las descripciones.

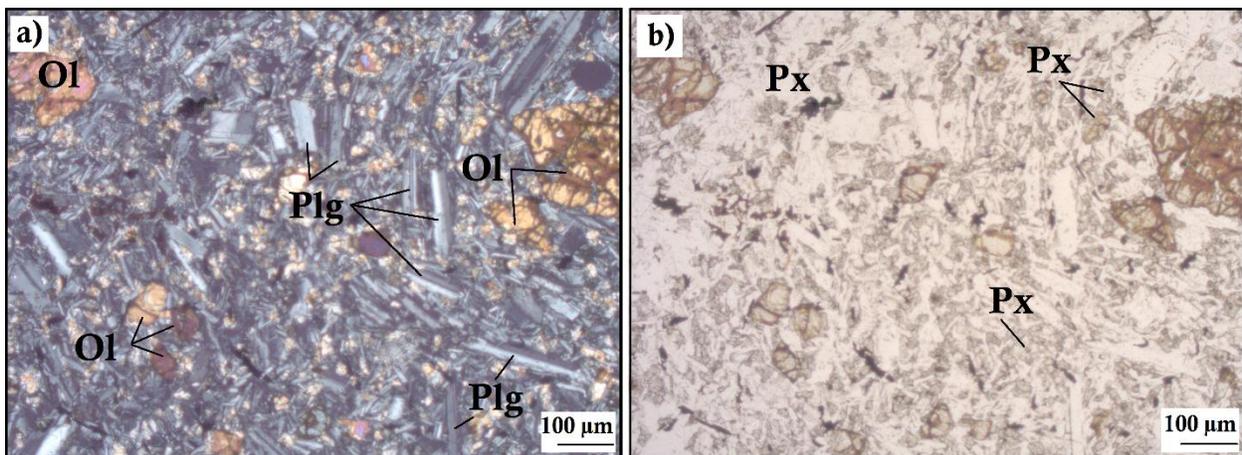


Figura IV.20. Petrografía de roca volcánica máfica del estrato 2 con presencia abundante de olivino idingsitizado (Ol), piroxeno (Px) y plagioclasa (Plg). a) nícoles cruzados y b) nícoles paralelos.

El **estrato 3** (6 m de espesor) está compuesto por bloques de escoria con líticos y cuarzo, las vesículas están rellenas con calcita, soportados por una matriz más fina de la misma composición de color rojizo oscuro.

El **estrato 4** (2.6 m de espesor) se compone de material normalmente gradado de clastos de tamaños de ceniza y lapilli de pómez gris y blanca, angulosos soportados clasto a clasto, altamente vesiculados.

Con un contacto abrupto sobreyace el **estrato 5** (3.6 m de espesor) el cual está compuesto por bloques de escoria color negro con alta vesicularidad, alargados y orientados horizontalmente soportados por una matriz de ceniza color amarillo claro con líticos.

El **estrato 6** (1.5 m de espesor) está compuesto de escoria roja de tamaño de ceniza con baja vesicularidad, presenta líneas de flujo muy delgadas de color más claro.

Finalmente, las lavas del **estrato 7** (4 m de espesor) cuyos bordes presentan alta vesicularidad de diferente tamaño, consiste en rocas máficas grises con textura glomeropórfida con cristales de plagioclasa, olivinos y piroxenos. En lámina delgada (Figura IV.21) presenta una matriz microcristalina con un vol. total de 70% de piroxeno y plagioclasa de maclado simple comúnmente con alteración a sericita y minerales opacos (hematita), en algunas zonas los cristales tienen alineación con dirección al flujo. Como aglomerados de fenocristales (vol. 30%), se observaron olivinos alterados a idingsita (vol. 40%) y plagioclasas con maclado simple (vol. 60%).

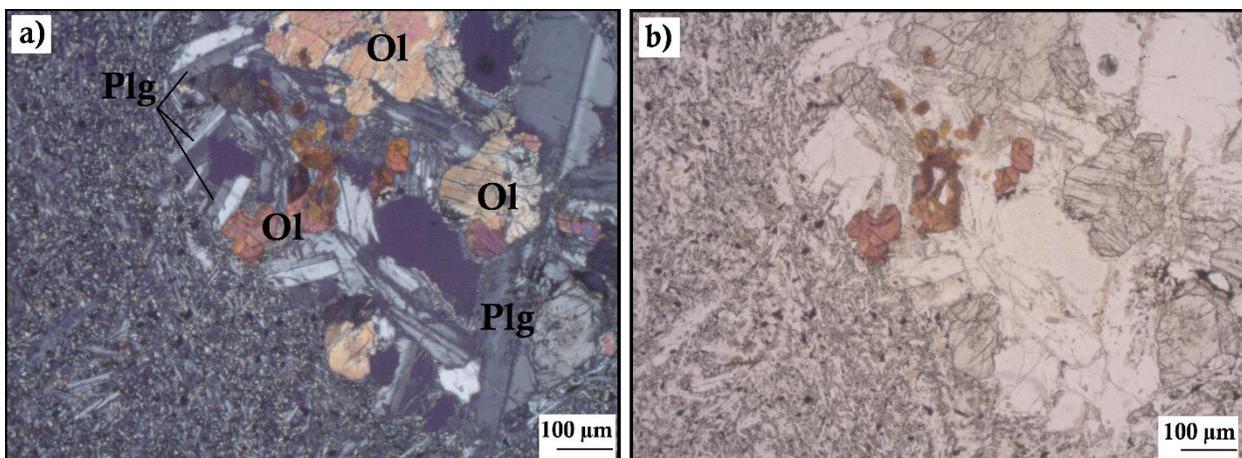


Figura IV.21. Petrografía de roca volcánica máfica del estrato 7 con aglomerados de olivino (Ol) y plagioclasa (Plg). a) nícoles cruzados y b) nícoles paralelos.

### IV.3. Caracterización de núcleos de pozo en la zona central

#### IV.3.1. Correlación litológica de núcleos de distintos pozos

Dentro del laboratorio se analizó el registro de 12 pozos identificados en un área de 50 m<sup>2</sup> en la zona centro del graben de Querétaro y con distancia entre ellos menor a 100 m, por lo que no se presentó un cambio drástico en la litología dentro los pozos (ubicación en el mapa de la Figura IV.1). Las fallas más cercanas a los pozos son la falla central-5 de febrero con dirección N-S y una falla con dirección E-W (Figura IV.22).

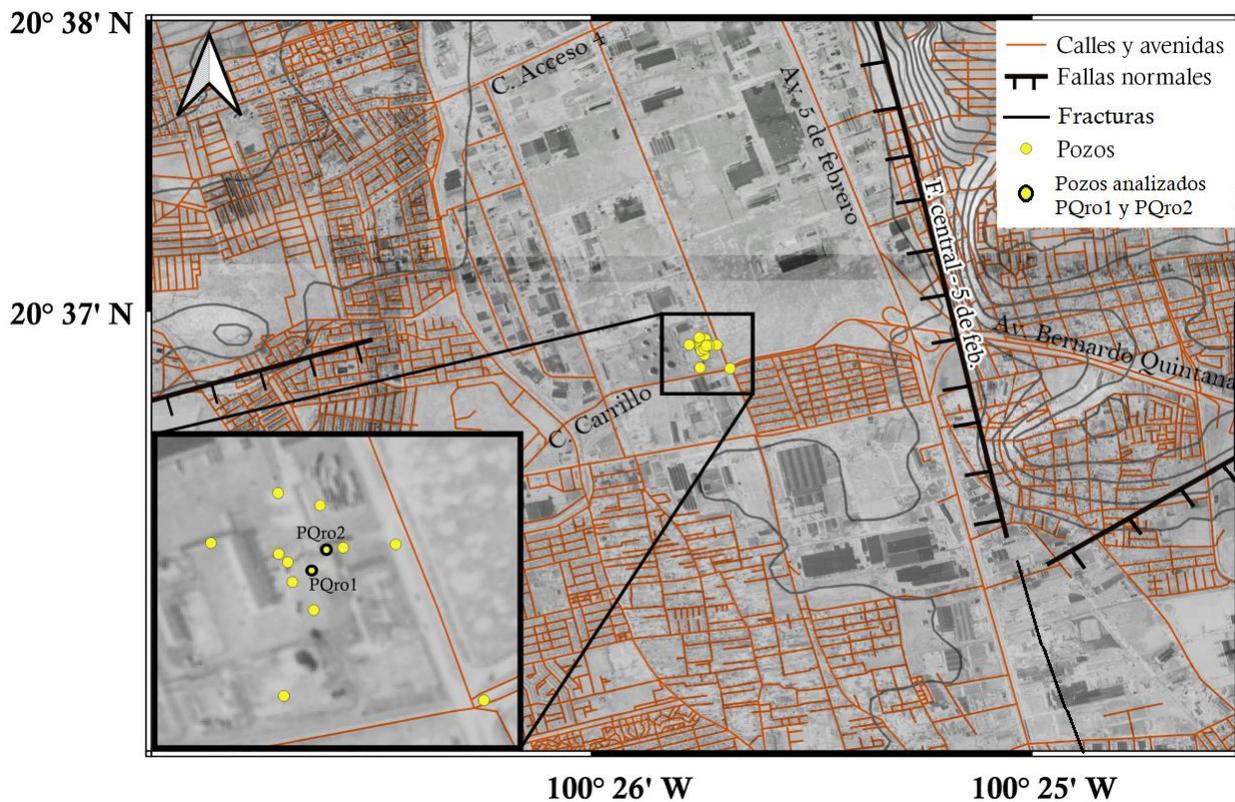


Figura IV.22. Mapa de localización del área de los pozos ubicados cerca de la falla central-5 de febrero y una falla con dirección E-W. También se muestran las avenidas principales de la zona. En el recuadro de la izquierda se muestra un acercamiento de los pozos analizados que abarcan un área de 50 m<sup>2</sup>.

En la Figura IV.23 se muestra la correlación estratigráfica de 3 unidades identificadas dentro de los 12 pozos. A partir de su posición estratigráfica se dedujo que la unidad de areniscas y conglomerados TpArCg se encuentra en los primeros metros y por debajo, la unidad volcánica basalto-andesítica TmtAB. En algunos pozos, se logró observar la unidad de los

piroclastos y sedimentos lacustres TomPyLac. El espesor de las unidades en cada pozo es variable, la unidad volcánica presenta espesores que van de 15 a 30 m, mientras que la unidad granular pliocénica TpArCg tiene espesores de 40 a 60 m. En cuanto a la unidad granular oligocénica TomPyLac, no se registró su límite inferior por lo que su espesor es indefinido. Dentro del pozo PQro2 esta unidad presenta un espesor máximo de 75 m.

En la misma figura, la escala de ambas secciones difiere en cuanto a la profundidad, es decir, la sección N-S llega hasta 110 m y la sección de W-E llega a los 160 m. En la sección N-S se observan desplazamientos de unidades de 4 a 20 m, mientras que en la sección W-E se observan desplazamientos menores de 8 a 10 m, tomando en cuenta el contacto entre la unidad granular pliocénica TpArCg y la unidad volcánica que la subyace TmtAB. Con base en estos desplazamientos podría inferirse que hay fallas secundarias asociadas a las fallas principales con direcciones N-S y W-E como se observa en el recuadro de la derecha inferior.

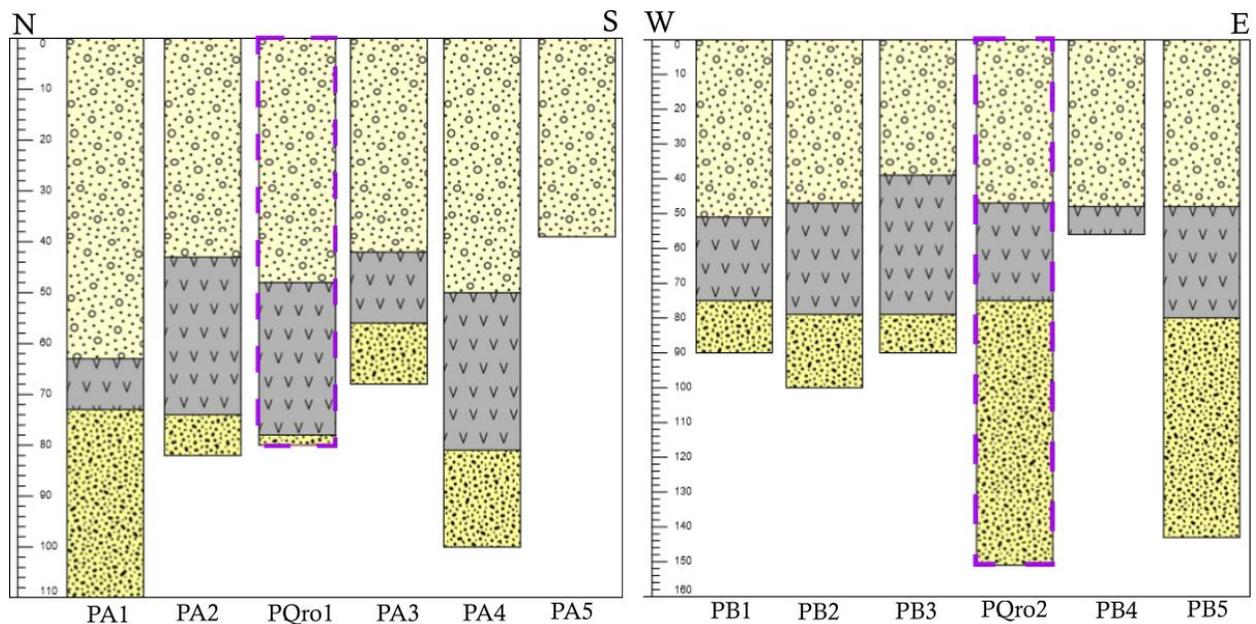
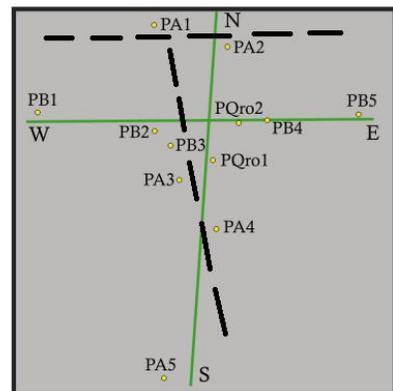


Figura IV. 23. Muestra los espesores de las unidades presentes en cada uno de los pozos: una unidad volcánica entre dos unidades granulares. Los pozos PQro1 y PQro2 encerrados con línea punteada fueron los seleccionados para analizar. En el recuadro de la derecha se muestran las secciones en superficie de color verde de los pozos presentados arriba.

- Leyenda
- TpArCg
  - TmtAB
  - TomPyLac
  - Falla inferida
  - Secciones



#### *IV.3.2. Descripción litoestratigráfica de los pozos PQro1 y PQro2*

La selección de pozos para la caracterización de núcleos se basó en su profundidad y en las unidades identificadas como se observó en la figura anterior. Debido a la distancia entre los pozos y a la similitud en las características litológicas de las secuencias, se eligieron únicamente 2 pozos: el pozo PQro1 (20°37.274' N, 100°25.884' W) con una profundidad máxima de 80 m, se eligió para caracterizar la unidad granular pliocénica TpArCg la cual presentó un espesor de 47 m con núcleos mayormente disgregados y núcleos no disgregados con un máximo de 10 cm de largo (Figura IV.24). Para la unidad granular oligocénica TomPyLac se escogió el pozo PQro2 (20°37.282' N, 100°25.879' W) cuya profundidad total es de 150 m de los cuales la secuencia estudiada tiene un espesor de 77 m y sus núcleos se presentaron completos con medidas de hasta 60 cm de largo y con poco material disgregado en especial el material compuesto de ceniza (Figura IV.25).



*Figura IV.24. Núcleos del pozo PQro1 que incluye los depósitos de la secuencia granular pliocénica TpArCg con un espesor de 47 m.*



*Figura IV.25. Núcleos del pozo PQro2 que incluye los depósitos de la secuencia granular oligocénica TomPyLac con un espesor de 77 m.*

A partir de la caracterización física de los pozos PQro1 y PQro2 se realizaron sus respectivas columnas litoestratigráficas. Dentro de la columna del pozo PQro1 se describieron 15 estratos (Figura IV.26). El **estrato 1** (33 m de espesor) en la base de la columna, está compuesto por una roca máfica gris oscuro con textura afanítica y cristales de olivino alterado a idingsita, piroxeno y plagioclasa. La roca presenta una alta vesicularidad rellenas de calcita.

El **estrato 2** (4 m de espesor) comprende de pocos clastos de pómez angulosas soportados en una matriz de arenisca mediana a fina café claro con líticos y cuarzo.

El **estrato 3** (0.7 m de espesor) se compone de un material de arenisca fina y limolita de color más oscuro con mayor cantidad de líticos volcánicos y cuarzos angulosos.

El **estrato 4** (1.7 m de espesor) está compuesto por un material con pocas pómez angulosas soportadas en una matriz de arenisca fina color café claro que contiene líticos, cuarzo.

El **estrato 5** (3.6 m e espesor) comprende gravas redondeadas (Figura IV.27) soportadas en una matriz de arenisca fina y limos claro con líticos, poco cuarzo y pómez redondeados.

El **estrato 6** (1.7 m de espesor) se compone de una matriz de arenisca mediana y gruesas con clastos de tamaño de gravas de hasta 5 cm de rocas vesiculadas negras y rojas.

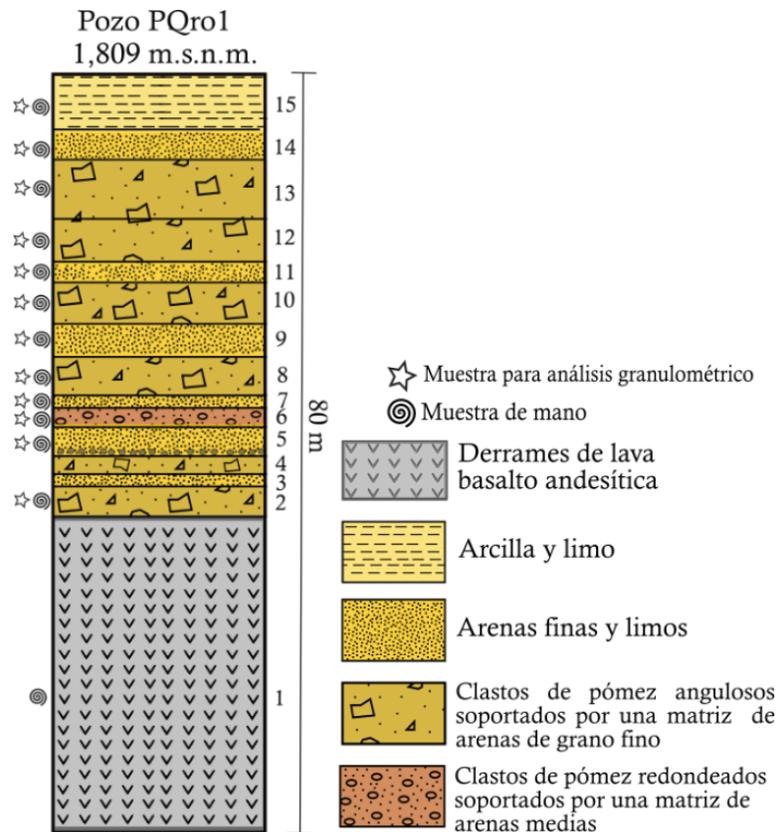


Figura IV.26. Columna litoestratigráfica del pozo PQro1. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.

El **estrato 7** (1.3 m de espesor) está compuesto de arenisca fina y limo rojizo claro con líticos volcánicos alterados, cuarzo y pocas pómez angulosas.

El **estrato 8** (4 m de espesor) comprende arenisca que va de fina a mediana y líticos de arenas gruesas angulosos de color más oscuro por la predominancia de lítico volcánicos.

El **estrato 9** (3.6 de espesor) se compone de arenisca fina y limos café oscuro con líticos, cuarzo y poca pómez (Figura IV.28).

El **estrato 10** (4.4 m de espesor) está compuesto de pómez angulosos de tamaño de arenas medianas a gruesas soportados por material fino café rojizo con líticos, cuarzo.

El **estrato 11** (2 m de espesor) comprende arenisca con líticos rojos y negros redondeados, cuarzo y pocas pómez angulosas.

El **estrato 12** (4.5 m de espesor) se compone de una matriz limosa café claro con líticos volcánicos, cuarzo y pómez angulosos de tamaño de arenas gruesas.

El **estrato 13** (6.2 m de espesor) está compuesto de arenisca fina y limos café claro con líticos volcánicos y cuarzos angulosos de tamaño de arenas medianas y gruesas.

El **estrato 14** (2.8 m de espesor) comprende limolita café claro con líticos volcánicos y cuarzo de tamaño de arenas medianas.

El **estrato 15** (6.5 m de espesor) se compone de lutita y limolita café claro. Forma agregados difíciles de disgregar de tamaños de arenas finas.



*Figura IV.27. Material de tamaño de arenas y gravas.*



*Figura IV.28. Material disgregado de tamaño de grano limo-arenoso.*

La columna del pozo PQro2 se muestra en la Figura IV.29, la cual comprende dos secuencias granulares y una volcánica, en total se describieron 18 estratos. El **estrato 1** (11 m de espesor), en la base, se describió como un material consolidado con alto grado de oxidación a color rojo. Presenta clastos de pómez, escoria y líticos alterados a verde y amarillo de tamaño de arenas gruesas a gravas (Figura IV.30) soportados por una matriz fina de tamaños de arenisca fina y limo.

El **estrato 2** (13 m de espesor) está compuesto por lutita y limolita café oscuro, forma agregados, y presenta poca pómez de tamaño de arenas finas. Se expande al agregarle agua.

El **estrato 3** (5 m de espesor) se compone de intercalaciones de material piroclástico de tamaño de cenizas y lapilli blanco, gris y rosa. Los clastos de pómez angulosos son soportados clasto a clasto.

El **estrato 4** (21 m de espesor) comprende clastos de pómez de arenas gruesas a gravas angulosos, mal clasificados y son soportados por una matriz de arenisca fina y limolita rosa claro (Figura IV.31).

El **estrato 5** (4 m de espesor) se representa por clastos de pómez redondeados gris claro y blanco de tamaño de gravas soportados por una matriz de arenisca mediana y gruesa.

El **estrato 6** (4 m de espesor) comprende capas intercaladas de clastos de pómez angulosos gris claro, líticos y cuarzo con matriz de ceniza.

El **estrato 7** (6 m de espesor) se compone de arenisca fina y limo con de clastos de pómez y líticos de tamaño de arenas finas a medianas.

El **estrato 8** (4 m de espesor) está compuesto de arenisca fina y mediana con clastos pómez gris y blanco de tamaño de arenas gruesas y gravas.

El **estrato 9** (6 m de espesor) comprende una matriz de limolita rosa claro, presenta más clastos de pómez que matriz, de tamaños de arenas gruesas a gravas angulosos gris y blanco.

El **estrato 10** (3 m de espesor) está compuesto por arenisca fina y limolita rosa claro. Disminuye la cantidad de clastos de pómez que líticos volcánicos de tamaños de arenas gruesas y gravas angulosos.

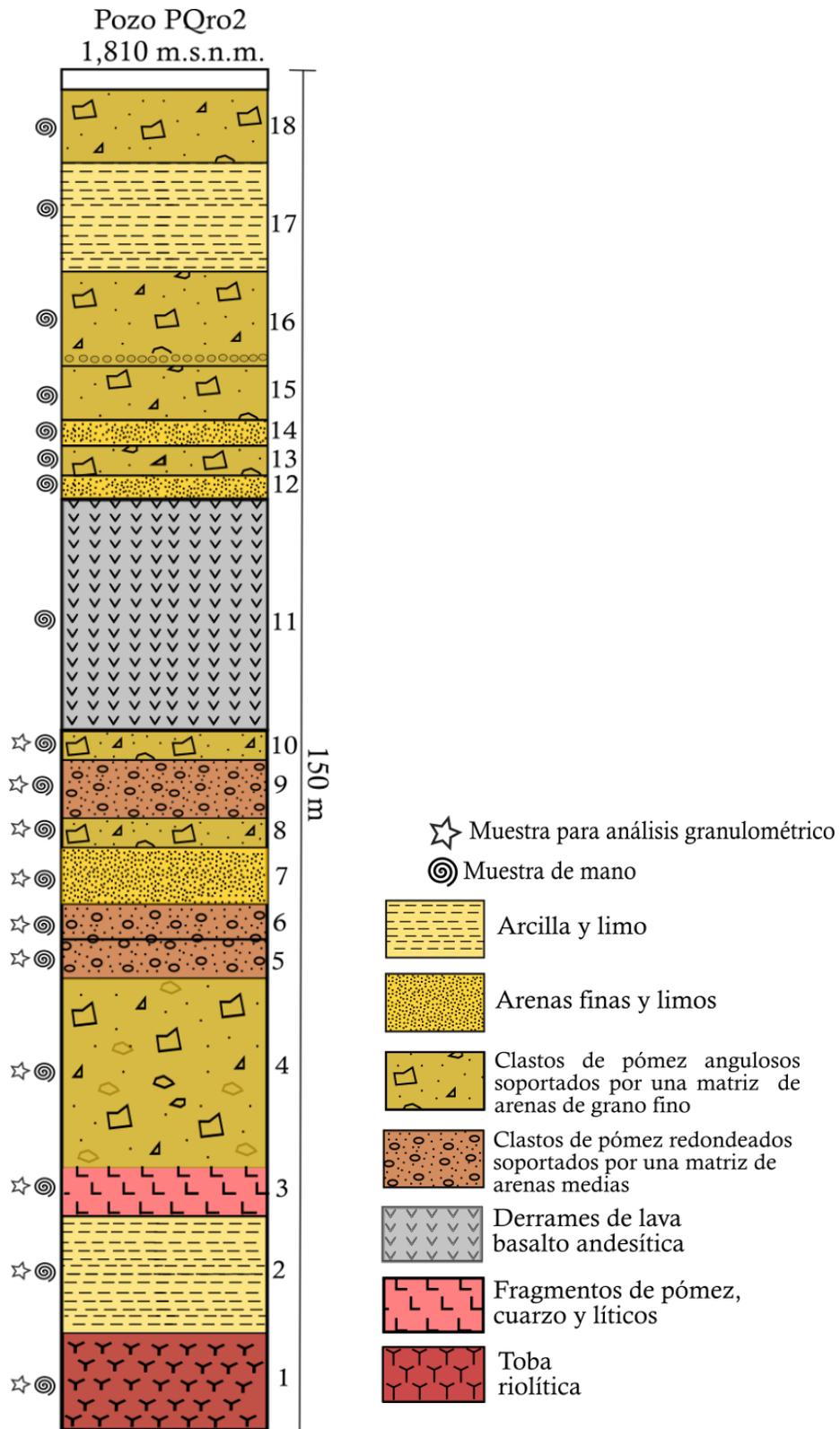


Figura IV.29. Columna litoestratigráfica del pozo PQro2. El símbolo del lado izquierdo en cada estrato representa el tipo de muestra que se describió y los números de lado derecho corresponden al número de estrato en las descripciones del texto.



*Figura IV.30. Estrato 1 presenta líticos de escoria y pómez alterados en una matriz más fina.*



*Figura IV.31. Estrato 4 presenta clastos de pómez angulosos con matriz fina.*

El **estrato 11** (26 m de espesor) se compone de una roca máfica afanítica y vesicular, de color gris oscuro con cristales de olivino alterado a rojizo, piroxenos, plagioclasas. Las vesículas de tamaño variable se encuentran rellenas de calcita.

El **estrato 12** (2.4 m de espesor) está compuesto por arenisca fina y limolita café claro con líticos oscuros y claros y cuarzo.

El **estrato 13** (3.1 m de espesor) contiene una matriz de arenisca fina y mediana clara, con clastos de escoria de tamaños de gravas. Se representa como intercalaciones de gravas de color rojizo, café, gris y arenas gruesas y medianas.

El **estrato 14** (3 m de espesor) comprende arenisca fina y limo café claro con líticos volcánicos y cuarzo.

El **estrato 15** (6 m de espesor) está compuesto de limolita rojizo con grietas soportando clastos angulosos de rocas volcánicas de color claro y oscuro de tamaño de gravas.

El **estrato 16** (10.2 m de espesor) se compone de arenisca fina y limolita con gravas y arenas gruesas de escoria negra y roja. En la base se encuentran gravas angulosas de pómez, líticos de escoria y cuarzo.

El **estrato 17** (12.2 m de espesor) comprende material compactado con grietas, café claro de lutita y limolita.

El **estrato 18** (8.1 m de espesor) está compuesto por arenisca fina café claro con líticos soportando clastos de pómez de color gris angulosos de tamaño de arenas gruesas.

#### *IV.3.2.1. Propiedades físicas*

Se eligieron 12 muestras del pozo PQro1 y 11 muestras del PQro2 para su caracterización física, química y mecánica. En la Tabla IV.3. se observan las profundidades de cada muestra seleccionada y su nomenclatura utilizada a lo largo de las pruebas de laboratorio.

*Tabla IV.3. Nomenclatura de las muestras seleccionadas de cada pozo con sus respectivas profundidades.*

PQro1 #Muestra	Profundidad (m)	PQro2 #Muestra	Profundidad (m)
M1	6.50	M1	75.00
M2	9.30	M2	77.00
M3	15.50	M5	83.00
M4	20.00	M8	89.00
M5	22.00	M11	95.00
M6	26.40	M12	97.00
M7	30.00	M15	103.00
M8	34.00	M20	113.00
M9	35.30	M25	123.00
M10	37.00	M30	133.00
M11	40.00	M34	141.00
M12	47.00		

La leyenda de la Figura IV.32 se utilizó para generar las tablas de las propiedades de las secuencias sedimentarias basándose en la granulometría de finos con el triángulo de texturas

identificando los diferentes tamaños de grano (arenas-limos-arcillas) y relacionarlos de una manera más esquemática con las demás propiedades.

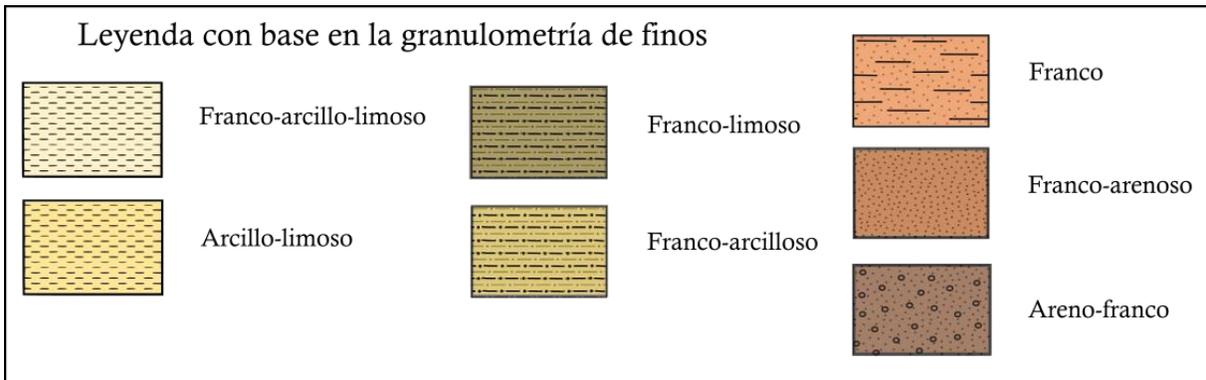


Figura IV.32. Leyenda con base en la granulometría de finos para la identificación de los estratos en las columnas.

Las Tabla IV.4. presenta las características físicas y químicas de los estratos de la secuencia sedimentaria de areniscas y conglomerados TpArCg obtenidas del pozo PQro1. Con base en el análisis granulométrico de finos (Anexo3) la secuencia presentó una gradación normal cuya granulometría va de areno-franco en la base, franco-arenoso y franco, a franco-arcillo-limoso en la cima, con intercalaciones de franco-arcilloso. Los porcentajes varían (base% a cima%) de 74% a 16% en arenas, 20% a 50% en limos y 3% a 38% en arcillas. Se observa que el porcentaje de partículas de tamaño de arenas aumenta con la profundidad y el de arcillas disminuye.

Con base en la SUCS, la granulometría de gruesos y los límites de consistencia (Anexo6), los estratos se clasificaron en arenas limosas (SM), ya que en las curvas granulométricas (Anexo2) presentaron porcentaje de finos mayor a 12% que tienen influencia en los límites de plasticidad y en el índice de plasticidad (se observan en la Tabla V.6). En cuanto a la muestra M10, que presentó un porcentaje entre 5% y 12% de finos, se clasificó como arenas limosas bien graduadas (SM/SW).

La densidad de sólidos resultó que los valores más altos se presentaron en estratos más profundos, como en los estratos con textura de areno-franco (M12) y franco-arenoso (M9 y M10) con valores de 2.43 - 2.47 g/cm<sup>3</sup>, mientras que en los estratos con texturas franca y

franco-arcilloso presentaron densidades de 2.24 - 2.37 g/cm<sup>3</sup>. Por otro lado, las densidades aparentes variaron de 1.12 – 1.25 g/cm<sup>3</sup> con respecto al tamaño de grano, es decir que, debido al volumen de espacio poroso, que es inversamente proporcional a la densidad aparente, las partículas finas que presentan una mayor cantidad de poros, su densidad es baja. Por lo tanto, los estratos con tamaño de grano fino presentaron densidades de 1.12 a 1.16 g/cm<sup>3</sup> y los tamaños de grano más arenoso presentaron densidades de 1.20 g/cm<sup>3</sup>. A partir de las densidades de sólidos y aparente se obtuvo la porosidad total que varió de 30 - 41% a lo largo de toda la secuencia. En cuanto al % del contenido de materia orgánica (MO) se obtuvo datos en los estratos 1, 3, 5, 7, 9 y 11 de 0.1%, 0.3%, 0.6% y 0.8%. La MO influye en la estructura del suelo, densidad de sólidos, densidad aparente y, por lo tanto, en la porosidad, dando un efecto sobre la capacidad de retención del agua. El pH de las muestras resultó ser alcalino con valores de 8.14 a 8.70.

En la Figura IV.33. se muestran micrografías SEM de la secuencia superior (M3), con partículas de mayor tamaño subredondeadas con superficies lisas y agregados de pequeñas partículas con bordes angulosos y que representan la mayor parte de la muestra.

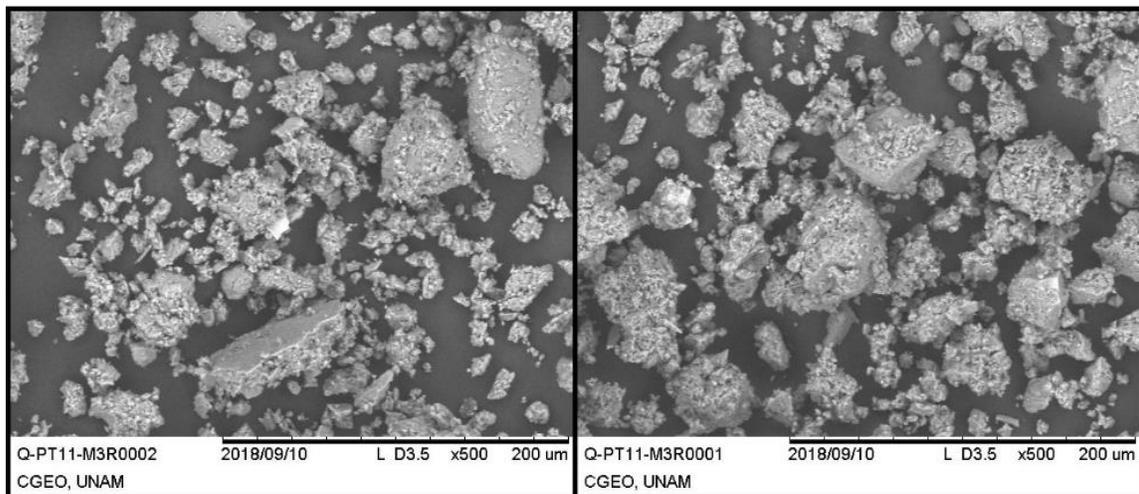


Figura IV.33. Micrografías SEM de la muestra M3 500x en diferentes ángulos de la muestra.

En la Figura IV.34 se observan micrografías SEM de la misma secuencia (M5). Parecida a la muestra M3, las partículas de mayor tamaño tienen superficies lisas, subangulosas y alrededor hay agregados de menor tamaño angulosos con superficies rugosas o porosas.

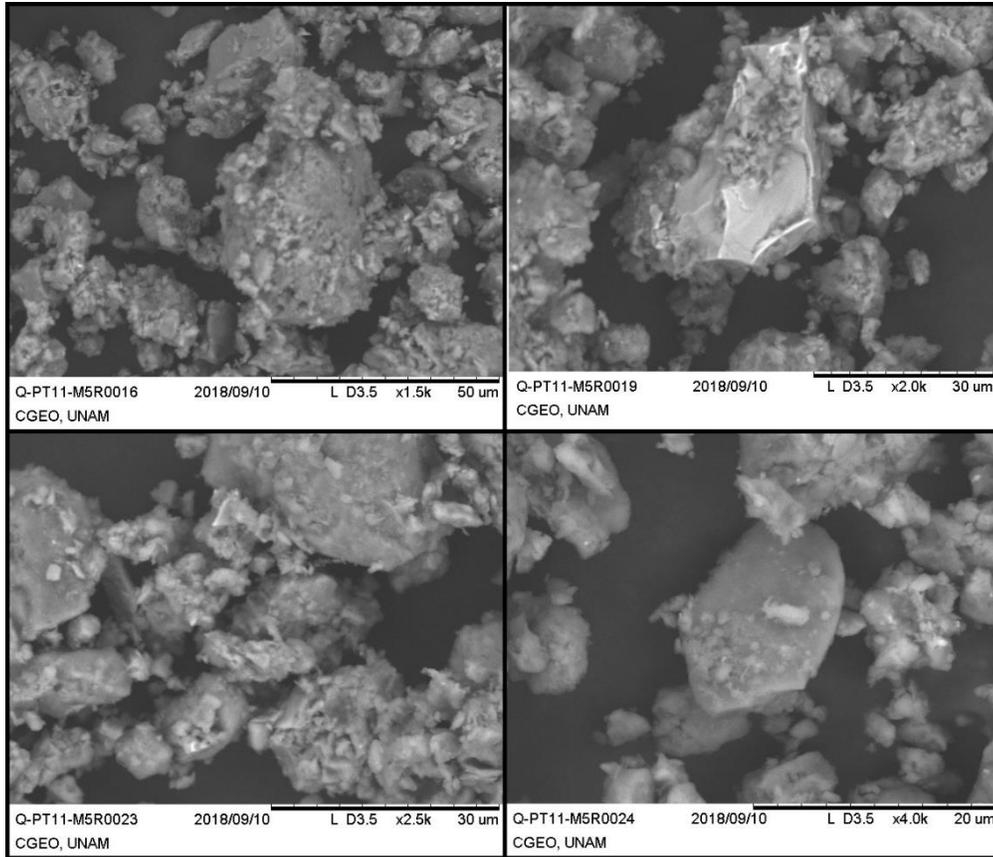


Figura IV.34. Micrografías SEM de la muestra M5 de 1.5x, 2.0x, 2.5x y 4.0x.

Tabla IV.4. Propiedades físicas y químicas de la secuencia TpArCg (47 m de espesor) obtenida del pozo PQro1. Cc: coeficiente de curvatura, Cu: coeficiente de uniformidad, Ds: densidad de sólidos, Da: densidad aparente, P%: porosidad, MO: materia orgánica, ND: no determinado. De lado izquierdo M# es el nombre de la muestra.

Prof (m)	G. de finos Arena - Limo - Arcilla			G. de gruesos			Ds / Da g/cm <sup>3</sup>	P %	pH	MO %
				Cc	Cu	SUCS				
M1 6	16.28	46.31	37.41	0.1	6.3	SM SC	2.24/1.13	39.3	8.14	0.29
M2 9	26.34	43.20	30.46	0.8	5.9	SM SC	2.30 /1.20	35.1	8.34	ND
M3 15	28.14	37.22	34.64	1.0	6.3	SM SC	2.30 /1.16	38.3	8.49	0.62
M4 20	31.79	46.61	21.60	0.8	5.9	SM SC	2.33/1.17	37.8	8.52	ND
M5 22	20.95	49.97	29.08	1.0	5.0	SM SC	2.31/1.17	37.7	8.54	0.14
M6 26	39.17	45.98	14.85	0.9	5.9	SM SC	2.32/1.18	37.1	8.50	ND
M7 30	49.00	40.07	10.93	0.6	5.0	SM	2.29/1.12	41.5	8.58	0.11
M8 34	29.82	40.39	29.79	1.0	5.0	SM SC	2.27/1.25	29.5	8.48	ND
M9 35	70.16	22.77	7.07	1.0	5.0	SM	2.45/1.18	40.4	8.70	0.11
M10 37	74.19	17.73	8.08	1.2	5.0	SW SM	2.47/1.22	37.2	8.52	ND
M11 40	33.96	42.38	23.66	1.0	4.0	SM SC	2.37/1.23	34.2	8.53	0.77
M12 43	74.34	22.88	2.78	0.8	4.6	SM	2.43/1.19	39.1	8.56	ND

Con base en la SUCS : SM son arenas limosas, SC son arenas arcillosas, SW son arenas bien graduadas

En la Tabla IV.5 se muestran las características físicas de los diferentes estratos de la secuencia sedimentaria lacustre y piroclástica TomPyLac a partir de las muestras obtenidas del PQro2. A partir de la prueba de granulometría de finos, la secuencia resultó ser inversamente gradada, ya que los estratos a mayor profundidad presentaron texturas de arcillo-limoso y franco-limoso, franco, franco-arenoso y areno-franco intercalados conforme disminuye la profundidad. Los porcentajes varían (base% a cima%) de 8 a 70% en arenas, 70% a 24% en limos y 46 a 3% en arcillas con mayor porcentaje de arenas en la cima y mayor porcentaje de arcillas en la base.

De acuerdo con la SUCS, los índices granulométricos y los límites de consistencia, la secuencia se clasificó como arenas limosas (SM), ya que dentro de las curvas granulométricas (Anexo2) presentaron porcentaje de finos mayor a 12% y se pudieron obtener los límites de plasticidad y el índice de plasticidad (se observan en la tabla IV.7). Por otro lado, las muestras M11 y M25 resultaron ser arenas bien graduadas (SW) mientras que la muestra M12 resultó ser arenas pobremente graduadas (SP) debido a que en las curvas granulométricas resultaron tener un porcentaje entre 5% y 12% de finos por lo que no se realizó la prueba de límites de consistencia.

La distribución de las densidades de sólidos fue parecida a la secuencia anterior, ya que, las densidades a profundidad son valores mayores, en los estratos arcillo-limoso y franco-arenoso con 2.42-2.47 g/cm<sup>3</sup> mientras que los estratos menos profundos con tamaño de grano franco-limoso, franco-arenoso y areno-franco presentaron valores de entre 2.32-2.39 g/cm<sup>3</sup>. Las densidades aparentes de los estratos variaron de 1.32 a 1.93 g/cm<sup>3</sup> que, a diferencia de la secuencia anterior, la densidad resultó ser mayor. Por lo tanto, los valores de la porosidad son bajos comparándolo con la secuencia anterior pues sus valores varían de 17 a 40%.

Tabla IV.5. Propiedades físicas de la secuencia TomPyLac (77 m de espesor) obtenida del pozo PQro2. Cc: coeficiente de curvatura, Cu: coeficiente de uniformidad, Ds: densidad de sólidos. De lado izquierdo M# es el nombre de la muestra.

Prof (m)		G. de finos			G. de gruesos			Ds / Da g/cm <sup>3</sup>	P %
		Arena	Limo	Arcilla	Cc	Cu	SUCS		
M1 75		70.18	23.76	6.06	0.9	7.4	SM SC	2.36/1.93	18.3
M2 79		71.25	24.97	3.78	1.1	5.2	SM SC	2.39/1.83	24.7
M5 83		66.04	26.35	7.61	1.2	7.0	SM	2.36/1.65	30.1
M8 87		50.07	41.85	8.08	0.8	6.0	SM SC	2.36/1.52	36.2
M11 91		69.19	26.28	4.53	1.9	9.0	SW	2.37/1.7	28.3
M12 95		81.51	17.24	1.25	1.0	4.0	SP	2.27/1.32	42.7
M15 99		60.54	32.93	6.53	1.0	5.0	SM	2.36/1.81	23.7
M20 103		57.30	38.65	4.05	1.4	6.5	SM SC	2.32/1.71	26.4
M25 107		25.65	71.05	3.30	1.1	7.0	SW	2.37/1.95	17.8
M30 111		7.96	45.50	46.54	2.2	10.0	SM SC	2.42/1.80	25.8
M34 115		65.00	30.59	4.41	1.3	8.3	SM SC	2.47/1.56	36.5

Con base en la SUCS : SM son arenas limosas, SC son arenas arcillosas, SW son arenas bien graduadas, SP son arenas pobremente graduadas

#### *IV.3.2.2. Propiedades mecánicas*

En las Tablas IV.6. y IV.7. se muestran los resultados de las pruebas de los límites de plasticidad y difracción de Rayos X (Anexo5) de las secuencias sedimentarias pliocénica TpArCg y oligocénica TomPyLac, respectivamente. La relación que se observa entre estas dos propiedades es que los diferentes minerales arcillosos que componen las muestras se comportan mecánicamente diferente debido al contenido de agua que presentan en su estructura.

En la secuencia de areniscas y conglomerados TpArCg, se clasificaron los materiales con base en la SUCS y la carta de plasticidad (Anexo4), como limos con baja o alta plasticidad. Los estratos que resultaron ser limos con alta plasticidad (MH) fueron las muestras M1, M2, M5 y M8. Mientras que los estratos que se clasificaron como limos de baja plasticidad (ML) fueron las muestras M3, M4, M6, M7, M9, M10, M11 y M12. Esta clasificación dependió del límite líquido y el índice de plasticidad resultantes de cada muestra, es decir, los limos de alta plasticidad presentaron un límite líquido igual o mayor a 50% lo que resulta ser un material plástico y; un índice de plasticidad bajo (menor a 20) por lo que se consideraron limos y no arcillas. Por otro lado, los limos de baja plasticidad resultaron tener un límite líquido menor a 50% y un índice de plasticidad igualmente bajo. Como se observa en la tabla, la muestra M3 presentó un límite líquido de 49.3% por lo que califica para ser considerado como un material de alta y no de baja plasticidad.

A partir de la DRX, la secuencia en general está constituida principalmente por una mezcla de fases de sílice entre la cristobalita y el cuarzo. El mineral arcilloso que se encontró predominantemente fue la montmorillonita de la familia de las esmectitas 2:1 característico por ser expansiva, con fases de caolinita de la familia 1:1 que son arcillas más estables. Dentro del estrato con la M11 se encontró vermiculita de la familia de las 2:1.

Al relacionar las tablas de la secuencia TpArCg de las propiedades físicas y mecánicas, se observó que las muestras de alta plasticidad, es decir, M1, M2, M5, M8 y M3, presentaron una textura fina, con mayor cantidad de limos y arcillas (franco-limo-arcilloso y franco-arcilloso).

Tabla IV.6. Propiedades mecánicas y minerales arcillosos dentro de la secuencia TpArCg. IP%: índice de plasticidad, LL%: límite líquido.

# Muestra	SUCS	IP / LL %	DRX (fracción arcillosa)
1 (6.5m)	OH o MH	15.3 / 50.8	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
2 (9.3m)	OH o MH	15.4 / 51.3	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
3 (15.5m)	OL o ML	18.3 / 49.3	Montmorillonita Fases de SiO <sub>2</sub>
4 (20m)	OL o ML	15.2 / 47.5	Montmorillonita
5 (22m)	OH o MH	12.3 / 51.7	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
6 (26.4m)	OL o ML	8.7 / 44.5	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
7 (30m)	OL o ML	6.3 / 44.8	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
8 (34m)	OH o MH	14.8 / 56.5	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
9 (35.3m)	OL o ML	4.1 / 28.6	Montmorillonita Caolinita Fases de SiO <sub>2</sub>
10 (37m)	OL o ML	4.9 / 32.2	Montmorillonita Fases de SiO <sub>2</sub>
11 (40m)	OL o ML	15.1 / 47.8	Montmorillonita Vermiculita Caolinita
12 (47m)	OL o ML	2.9 / 32.6	Montmorillonita Caolinita

Según la SUCS para suelos finos:  
OH o MH son limos con alta plasticidad  
OL o ML son limos con baja plasticidad

Fases de SiO<sub>2</sub>: Cuarzo y Cristobalita

Por otro lado, la secuencia lacustre y piroclástica TomPyLac se clasificó de igual manera con base en la SUCS, como limos de alta plasticidad (MH) en los estratos de las muestras M1, M15, M30 y M34, mientras que los estratos de las muestras M2, M5, M8, M20 resultaron ser limos de baja plasticidad (ML). Debido a que las muestras M11, M12 y M25 no fueron capaces de retener agua y lograr la saturación, no se realizaron los límites líquidos. En las descripciones litológicas se consideraron como estratos de composición volcánica de pómez y ceniza.

Sin embargo, a diferencia de la secuencia anterior la muestra M30 con una textura arcillo-limosa tuvo un límite líquido de 82.5% y un índice de plasticidad mayor a 20, considerado el único estrato con un límite de plasticidad considerablemente alto. En cuanto a los demás estratos de alta plasticidad, así como la secuencia anterior, tuvieron un límite líquido mayor a 50% (con valores mayores a la secuencia anterior llegando a 67%) y un índice de plasticidad bajo, clasificándose como limos. La muestra M5, como se observa en la tabla, presentó un límite líquido de 49.3% por lo tanto, califica para ser considerado como limos con alta plasticidad.

En cuanto a la fracción arcillosa de la secuencia descrita, presentó una mezcla de fases de sílice: la cristobalita y el cuarzo. De igual manera, predomina la montmorillonita junto con la saponita que, como la montmorillonita, pertenece a la familia de las esmectitas 2:1. La presencia de la illita, de la familia de las micas poco expansivas, dentro de los estratos M5, M11, M12, M20 y M34, se encuentra mezclada con las montmorillonitas. También se apreció la presencia de la faujasita de la familia de las zeolitas en menor grado en las muestras M2 y M30.

Tabla IV.7. Propiedades mecánicas y minerales arcillosos dentro de la secuencia TomPyLac. IP%: índice de plasticidad, LL%: límite líquido.

# Muestra	SUCS	IP / LL %	DRX (fracción arcillosa)
1 (75m)	OH o MH	11.0 / 61.0	Montmorillonita Saponita Fases de SiO2
2 (77m)	OL o ML	10.3 / 46.1	Montmorillonita Faujasita
5 (83m)	OL o ML	3.7 / 49.3	Montmorillonita Illita Fases de SiO2
8 (89m)	OL o ML	5.2 / 48.0	Montmorillonita Fases de SiO2
11 (95m)	—	—	Montmorillonita Illita Fases de SiO2
12 (97m)	—	—	Montmorillonita Illita Fases de SiO2
15 (103m)	OH o MH	3.8 / 50.1	Saponita Fases de SiO2
20 (113m)	OL o ML	4.3 / 40.7	Monmorillonita Illita Saponita
25 (123m)	—	—	Monmorillonita Saponita Fases de SiO2
30 (133m)	OH o MH	27.5 / 82.5	Montmorillonita Faujasita Fases de SiO2
34 (141m)	OH o MH	19.5 / 66.1	Montmorillonita Illita Saponita
<p>Según la SUCS para suelos finos:  OH o MH son limos con alta plasticidad  OL o ML son limos con baja plasticidad</p> <p>Fases de SiO2: Cuarzo y Cristobalita</p>			

# V

## Discusión

En este capítulo se discuten y comparan los procesos geológicos que se llevaron a cabo para la formación y deposición de las unidades analizadas, asociándolos con sus propiedades físicas y mecánicas. A partir de las relaciones litológicas entre los diferentes puntos de verificación estratigráfica, se realizaron correlaciones estratigráficas y perfiles geológicos en las zonas norte, oriental y central del graben de Querétaro. Dentro de ciertos puntos de verificación estratigráfica y de los pozos se clasificaron los estratos a partir de la Clasificación de los suelos (SUCS) para determinar los diferentes depósitos; los símbolos se muestran entre paréntesis.

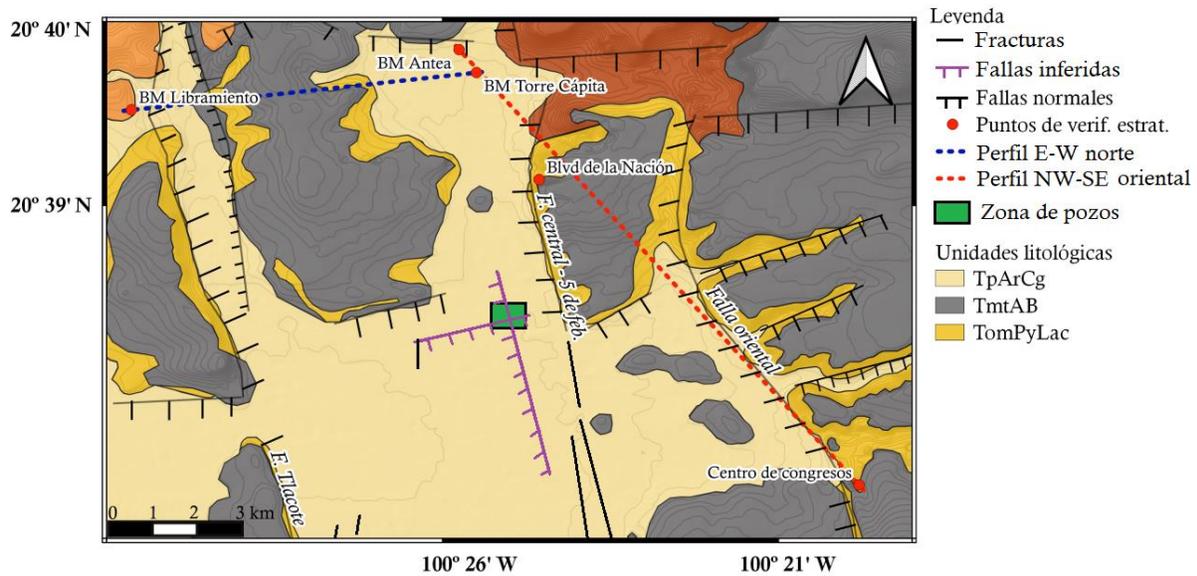


Figura V.1. Mapa geológico del graben de Querétaro. Muestra los perfiles geológicos de las zonas norte (línea azul) y oriental (línea roja) con respecto a los puntos de verificación estratigráfica. Las fallas inferidas en la zona central de pozos se representan con líneas moradas.

## V.1. Relación procesos geológicos - propiedades físicas

### V.1.1. Litoestratigrafía de las unidades en la zona norte del graben

- **Sitio BM Torre Cápita.** En la superficie se encuentra un depósito de arcillas negras con alto contenido de materia orgánica que corresponde a un suelo. El depósito que lo subyace está compuesto por un conglomerado de gravas bien graduadas (GW) con matriz de arenisca fina de gran potencia y arenas bien graduadas (SW), característico de un depósito coluvial cuya redondez de clastos representa un retrabajo de depósitos previos. Los depósitos de arenas mal

graduadas (SP) de la base corresponden a depósitos piroclásticos re TRABAJADOS de ceniza y pómez caracterizados por presentar una distribución del tamaño de grano de arenas uniformes. Los clastos re TRABAJADOS son pómez y/o rocas basálticas producto posiblemente de erupciones volcánicas cercanas al graben.

- **Sitio BM Libramiento Norponiente.** En este sitio se encuentran intercalados depósitos piroclásticos de compuestos arenas pobremente graduadas (SP) de cenizas y pómez angulosos de baja densidad y depósitos de gravas pobremente graduadas (GP) de rocas basálticas angulosas con matriz de arenas pobremente graduadas (SP) y arenas bien graduadas (SW) que corresponden a depósitos fluviales. Los conglomerados, areniscas finas y medianas con clastos angulosos clasificados como arenas bien graduadas (SW) representan depósitos coluviales. La composición de los clastos y bloques es volcánica de pómez, escoria y basaltos.

#### *V.1.2. Litoestratigrafía de las unidades en la zona oriental*

- **Sitio BM Antea.** En este sitio los diferentes estratos corresponden a un depósito fluvial de canal que se caracterizan por presentar bloques y gravas redondeados mal clasificados, areniscas gruesas, medianas y finas con estratificación cruzada y estratificación lenticular y en la superficie, el relleno de estos canales está cubierto por capas laminares de areniscas finas. En cuanto al origen de los sedimentos se considera volcánico al presentar clastos de pómez, cuarzo y bloques basálticos re TRABAJADOS.

- **Sitio Blvd de la Nación.** En este punto se identificaron depósitos masivos de derrames de lava basalto-andesítica de olivino y piroxeno con diferente grado de alteración por lo tanto corresponden a distintos eventos y unidades litológicas. Entre ellos, se describieron diferentes estratos que corresponden a depósitos fluviales compuestos por areniscas finas y medianas con estratificación cruzada y grietas de desecación intercalados con depósitos piroclásticos y de caída con laminación de cenizas y pómez. Por encima, se presentan depósitos de gravas de pómez redondeadas y areniscas finas intercaladas con paleosuelos que corresponden a depósitos fluviales de llanuras de inundación que representan una estabilidad en el medio con acumulación de materia orgánica. Finalmente, en la cima, como contacto se presentan

depósitos de peperita que representan un sistema lacustre de material fino que interactuó con las lavas basálticas de la unidad superior. La secuencia granular se consideró como producto volcánico retrabajado debido a la presencia de matrices vítreas, pómez, y fragmentos de roca redondeados.

**- Sitio Centro de Congresos.** Este sitio corresponde a depósitos de derrames de lava basalto-andesíticas de olivino y piroxeno con sus respectivas brechas de contacto intercaladas con depósitos piroclásticos de ceniza y pómez que de acuerdo con Aguirre *et.al.* (1998) es considerado como producto de la Pómez Ezequiel Montes. Las características petrográficas de las lavas en este punto afirman que fueron diferentes eventos con distintas velocidades de enfriamiento, donde el primer evento (estrato 2) presentó cristales más grandes en la matriz, y el segundo (estrato 7) un intercrecimiento de plagioclasas y olivino con matriz más fina.

#### *V.1.3. Litoestratigrafía de las unidades en la zona central*

**- Pozo PQro1.** En este pozo se identificó el contacto entre dos unidades; en la base, una unidad volcánica de lavas basalto-andesíticas vesiculares rellenas de calcita considerada como la unidad volcánica TmtAB. Sobre ésta, se presentan estratos compuestos de arenas limosas (SM) con mayor contenido de limo-arcilla en la cima disminuyendo hacia la base, por lo que se consideró un depósito normalmente gradado que es característico de un ambiente fluvial de inundación y que representa a la secuencia de areniscas y conglomerados TpArCg. A partir de la visualización de micrografías, la porosidad podría estar representada por los agregados de las partículas de menor tamaño con influencia de la materia orgánica presente a lo largo de la secuencia.

❖ **- Pozo PQro2.** En este pozo se identificaron tres unidades distintivas de acuerdo a sus características. La unidad más somera se relaciona con la descrita en el pozo PQro1 por presentar una gradación normal con mayor contenido de limos y arcillas en la cima considerada como un depósito fluvial por lo que corresponde a la secuencia de areniscas y conglomerados TpArCg. La unidad que la subyace se describió como lava basalto-andesítico

vesiculada similar a la descrita en el PQro1 siendo la unidad volcánica TmtAB. La unidad más profunda corresponde a la secuencia lacustre y piroclástica TomPyLac con gradación inversa, característico por presentar un depósito fluvial de arenas limosas (SM) intercalados con depósitos piroclásticos retrabajados pobremente graduados (SP), depósitos de caída bien graduados (SW) en la cima y un depósito arcilloso rosa en la base, de 13 m de espesor considerado como producto de alteración. El aumento de densidad en esta secuencia se da de la cima a la base probablemente por procesos post deposicionales como la compactación que se da durante el proceso de litificación, durante la sedimentación de depósitos suprayacentes, o bien, por efecto de la extracción de agua subterránea. Con base en lo anterior, se explica la baja porosidad que presenta esta secuencia en comparación con la secuencia sedimentaria TpArCg.

En la figura V.2. se presentan las diferentes facies descritas de depósitos fluviales, aluviales y lacustres y depósitos piroclásticos dentro de las columnas litoestratigráficas.

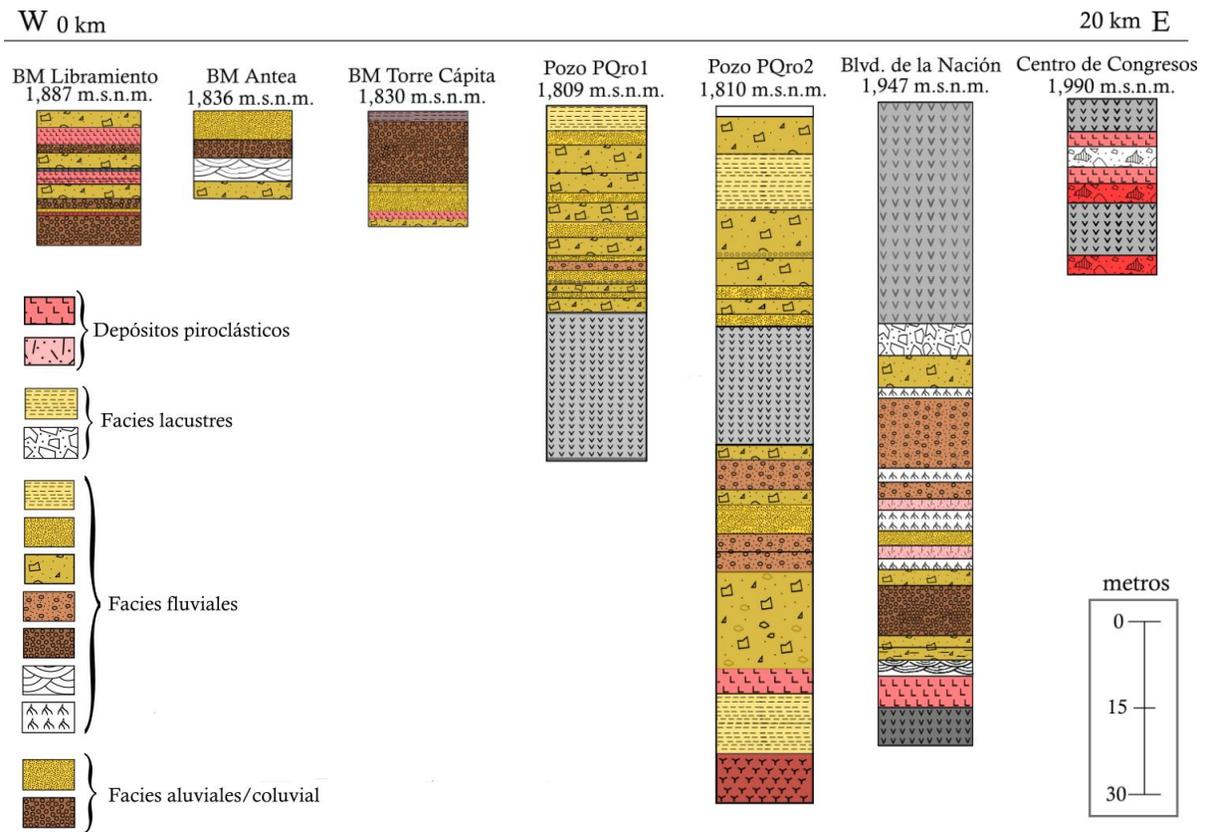


Figura V.2. Esquema de las columnas litoestratigráficas con sus diferentes facies interpretadas según la litología y estructuras sedimentarias. Las columnas presentan su elevación topográfica en la parte superior y están ordenadas de acuerdo a su distribución de W a E con una distancia de 20 km a lo largo del graben.

En el modelo de la figura V.3 se muestra la distribución de los depósitos que dieron origen a las unidades sedimentarias a lo largo del graben de Querétaro, dentro de los bloques de piso y techo de las fallas principales.

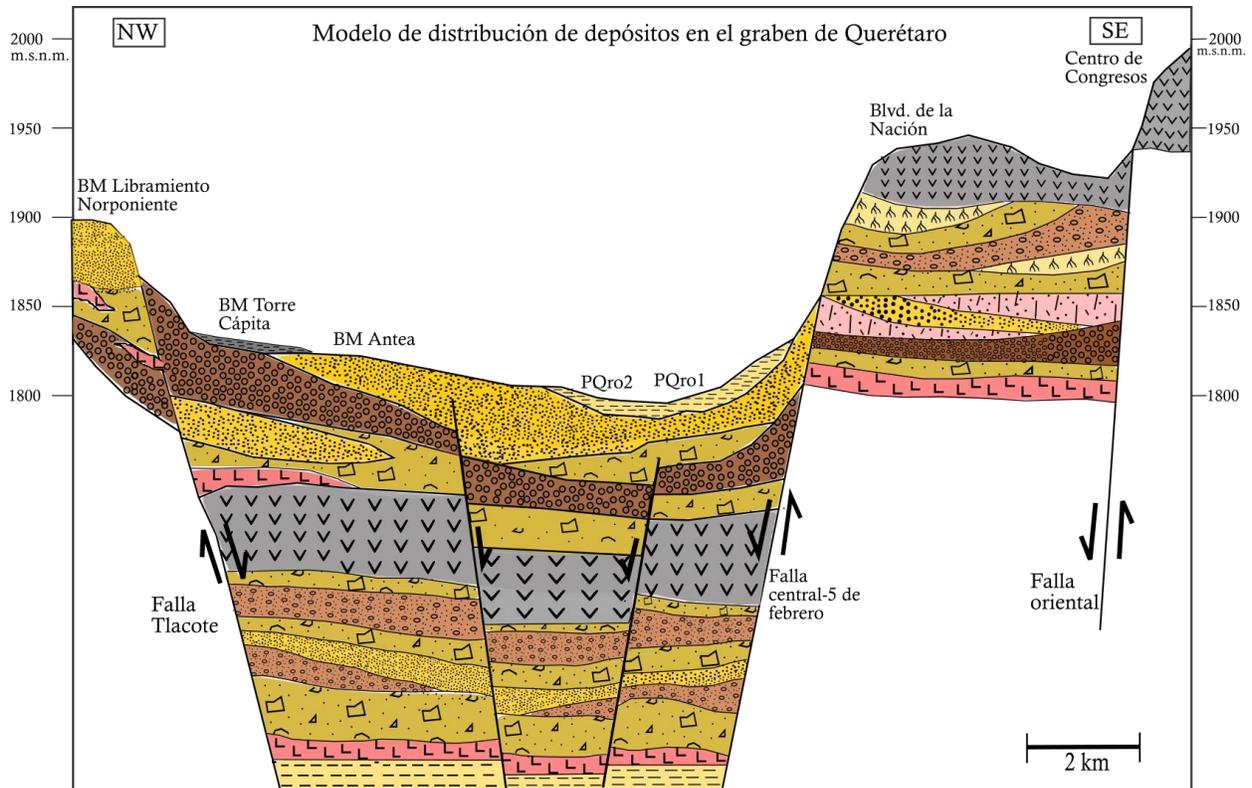


Figura V.3. Modelo sedimentológico que muestra la distribución de los depósitos fluviales, aluviales, lacustres y volcánicos a lo largo del graben de Querétaro. La simbología litológica es la misma que en las figuras anteriores.

## V.2. Relación comportamiento mecánico – mineralogía de arcillas

A partir de la prueba de Difracción de Rayos X (DRX) se determinó la mineralogía de las arcillas que, de acuerdo a Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (2005), el contenido de estas y su forma laminar son factores que influyen en la plasticidad y son determinantes de la compresibilidad de los materiales. Esto se comprobó con la relación entre los diferentes minerales arcillosos y la obtención del índice de plasticidad y el límite líquido en los diferentes estratos de las unidades. En el trabajo de Ochoa *et. al.* (2018) documentaron los valores de compresibilidad de diferentes unidades y usaron valores teóricos en la secuencia granular lacustre y piroclástica TomPyLac. Como resultados se obtuvo que esta última es más

compresible que la secuencia granular de areniscas y conglomerados TpArCg, posiblemente por presentar mayor contenido de arcillas (por alteración de cenizas).

**- Unidad de areniscas y conglomerados del Plioceno TpArCg.** A lo largo de esta secuencia, únicamente cuatro estratos denominados como franco-arcillosos con mayor contenido de limo-arcilla reflejaron una alta plasticidad, mientras que el resto de la secuencia estuvo conformado por arenas poco limosas de baja plasticidad. Esta secuencia está compuesta por minerales arcillosos de montmorillonita y caolinita de las cuales predomina el mineral caolinítico que se caracteriza por ser una arcilla con una estructura estable en presencia de agua. Con base en lo anterior se puede inferir que el bajo contenido de limos-arcillas y la presencia de minerales caoliníticos en toda la secuencia determina la baja plasticidad y, por lo tanto, una compresibilidad menor.

**- Unidad de rocas piroclásticas y sedimentos lacustres del Oligoceno TomPyLac.** En esta secuencia se encontraron estratos intercalados de arenas limosas de alta plasticidad por el alto contenido de limo-arcilla, arenas limosas de baja plasticidad, y estratos no plásticos de arenas uniformes y arenas bien gradadas. Estos últimos fueron considerados como depósitos piroclásticos de ceniza y pómez, por lo tanto, son estratos no compresibles. La composición mineralógica comprende de minerales como illita, saponita y montmorillonita, esta última predomina y que, de acuerdo a sus características, son arcillas poco estables en presencia de agua con una capacidad de intercambio catiónico alto, por lo tanto, son consideradas altamente plásticas. Esto determina que es una secuencia altamente compresible con intercalaciones de depósitos piroclásticos no compresibles.

De acuerdo con los límites líquidos obtenidos en ambas secuencias, se infiere que la secuencia sedimentaria pliocénica TpArCg presenta un comportamiento compresible bajo-medio, mientras que la unidad sedimentaria oligocénica TomPyLac una compresibilidad media-alta (Figura V.4). La caolinita es una arcilla muy estable que, a diferencia de la montmorillonita, no permite la entrada del agua a los espacios interplanares (Velde, 1995), por lo tanto, es una arcilla poco plástica. La presencia de la arcilla illita en la secuencia granular oligocénica TomPyLac es lo que permite decir que presenta un comportamiento más compresible que la

secuencia granular pliocénica TpArCg, ya que esta arcilla presenta características similares a la montmorillonita en cuanto a su estructura, sin embargo, presenta una plasticidad menor (Juárez-Badillo, 2005). Por lo tanto, se comprueba lo documentado por Ochoa *et. al.* (2018).

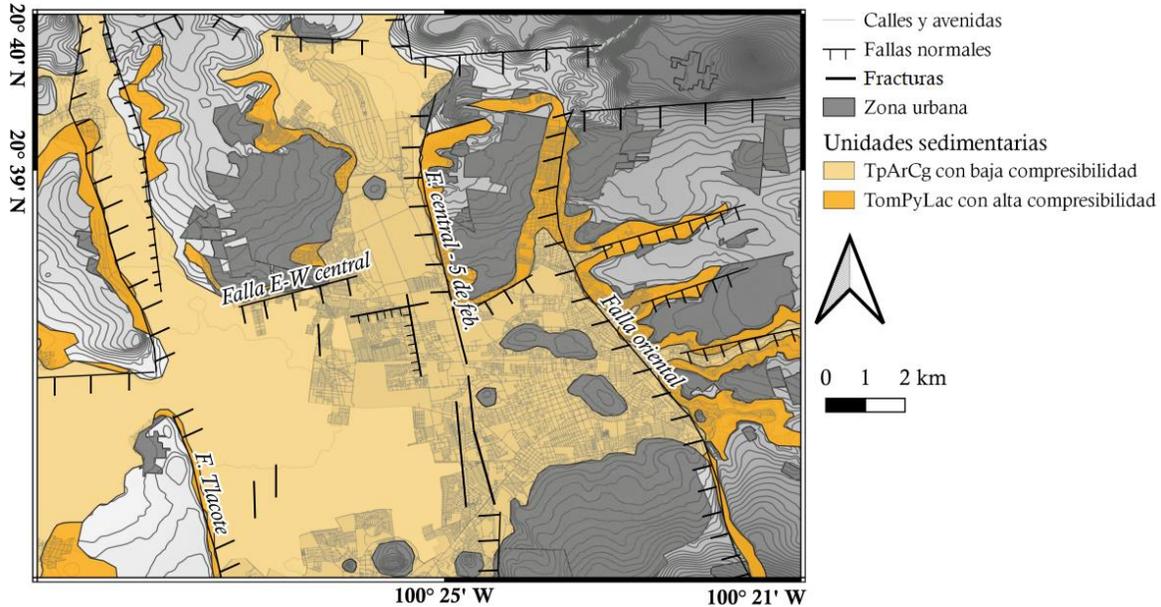


Figura V.4. Mapa del graben con las unidades sedimentarias y su grado de compresibilidad.

### V.3. Correlación estratigráfica en el graben de Querétaro

La correlación estratigráfica realizada en el graben de Querétaro se basó en las características litológicas y en la posición estratigráfica de las unidades descritas en los puntos de verificación (p.v.e.). En la sección de resultados IV.3.1. se mostró la correlación de pozos en la zona central del graben que, de acuerdo a las descripciones, se afirma que son las unidades: de areniscas y conglomerados pliocénica TpArCg en los primeros metros, seguido de la unidad volcánica de basalto-andesitas miocénica TmtAB y finalmente, la unidad más profunda de rocas piroclásticas y sedimentos lacustres oligocénica TomPyLac.

Con base en el análisis de pozos dentro del relleno sedimentario, se estimaron desplazamientos de las unidades someras sedimentaria pliocénica TpArCg y volcánica miocénica TmtAB de 4 a 20 m con direcciones N-S y E-W tomando en cuenta los contactos entre ellas. Estos desplazamientos son considerados como fallas secundarias asociadas a las fallas principales N-S central-5 de febrero y falla E-W central debido a que presentan el mismo

patrón de desplazamiento (líneas moradas en el mapa de la figura V.1). Esto se debe a que la deposición de las secuencias sedimentarias está asociada al fallamiento regional por la actividad sincrónica de procesos sedimentarios, tectónicos y volcánicos, por lo tanto, el fracturamiento tendrá un patrón similar al de las pallas principales. En la misma figura se muestran los perfiles geológicos en las zonas norte y oriental del graben. Las correlaciones estratigráficas se describen a continuación.

### V.3.1. Correlación estratigráfica en la zona norte del graben

En la figura V.5. se muestra la correlación litoestratigráfica entre las columnas de los bancos de material BM Torre Cápita y BM Libramiento Norponiente distribuidas esquemáticamente en la zona norte. Ambos sitios se describieron como depósitos coluviales de areniscas y conglomerados intercalados con depósitos piroclásticos, que de acuerdo a las descripciones se consideran como parte del relleno sedimentario o bien, la unidad sedimentaria pliocénica TpArCg. En cuanto al depósito de arcillas negras en la superficie del BM Torre Cápita, son conocidas como las arcillas negras del Cuaternario en la zona urbana de Querétaro.

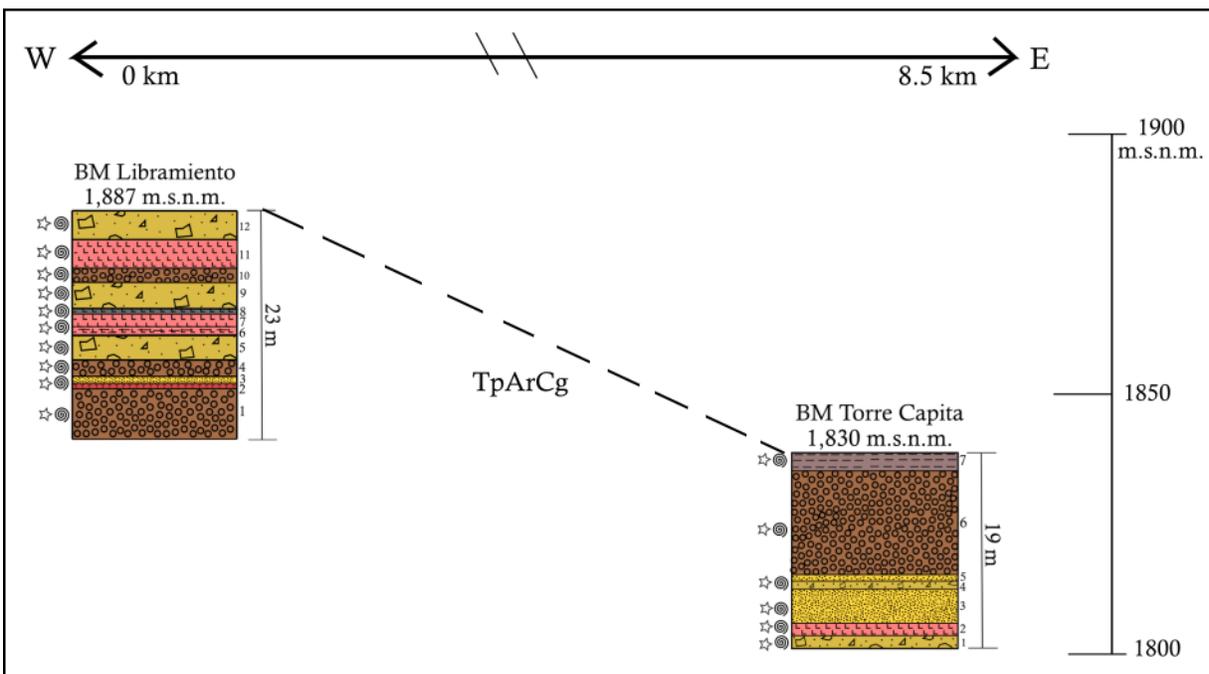


Figura V.5. Correlación litoestratigráfica en la zona norte con las columnas de los puntos BM Torre Cápita y BM Libramiento Norponiente.

El perfil geológico con dirección E-W en la zona norte (Figura V.6) muestra la distribución de los p.v.e. respecto a las fallas geológicas. El punto BM Libramiento Norponiente se ubica en el bloque de piso de la falla Tlacote al oeste del graben mientras que el punto BM Torre Cápita se encuentra en el bloque de techo al este de la misma falla con una altitud menor que la anterior. Al considerarse la misma unidad en ambos puntos, la diferencia de altitud implica que el desplazamiento de la falla Tlacote es reciente a la deposición de la unidad.

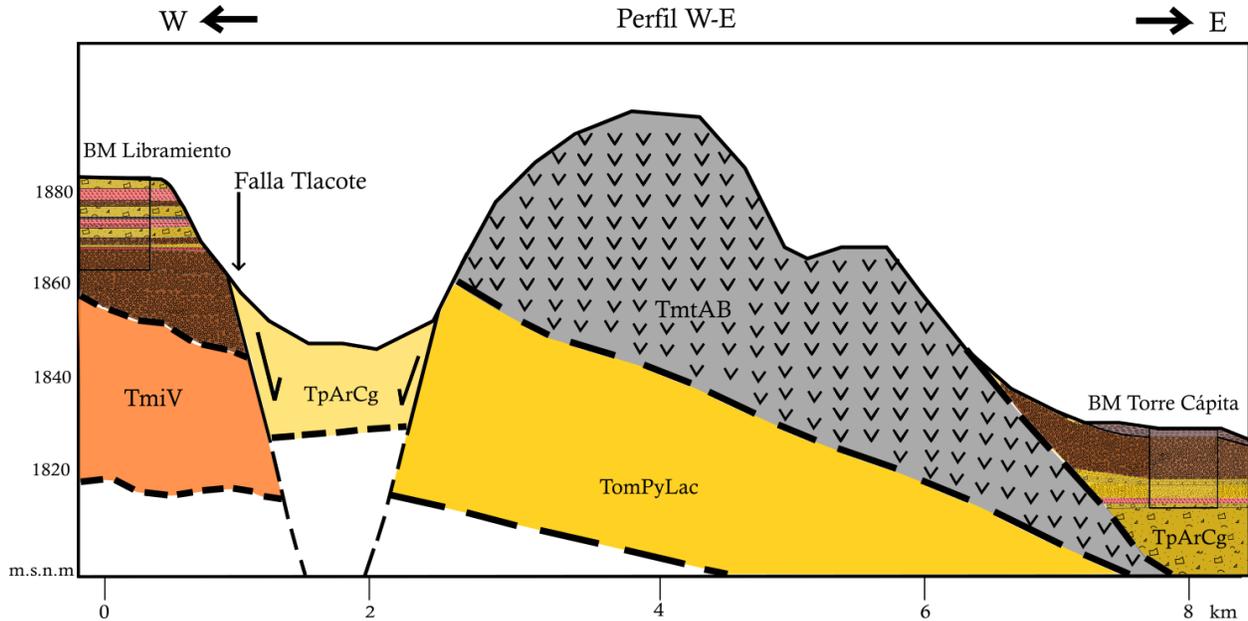


Figura V.6. Perfil geológico sintético E-W en la zona norte del graben con las columnas litoestratigráficas del BM Libramiento Norponiente y BM Torre Cápita con respecto a las fallas geológicas. El color de las unidades corresponde a las que presentó el mapa de la Figura IV.1.

### V.3.2. Correlación litoestratigráfica en la zona oriental del graben

En la Figura V.7. se muestra la correlación litoestratigráfica entre las tres columnas de la zona oriental cuya distribución se representa esquemáticamente. El banco de material BM Antea con la menor altitud, se consideró como un depósito fluvial de arenisca y conglomerados de composición volcánica que, corresponde a las características de la unidad sedimentaria de areniscas y conglomerados del Plioceno TpArCg. Por debajo de esta unidad se encontrarían las unidades del sitio Blvd. de la Nación, con dos unidades masivas volcánicas basalto-andesíticas de olivino y piroxeno consideradas como las unidades volcánicas del Mioceno TmmAB y TmtAB, intercaladas con depósitos fluviales, lacustres finos, depósitos

piroclásticos y de caída alterados, las cuales corresponden con la descripción de la unidad sedimentaria lacustre y piroclástica del Oligoceno TomPyLac de gran espesor, así como lo descrito dentro del pozo PQro2. El sitio Centro de Congresos, se describió como una unidad compuesta de derrames de lava basalto-andesítico de olivino y piroxeno intercalados con depósitos piroclásticos que se correlaciona con la unidad volcánica de la cima del Blvd de la Nación, la unidad volcánica basáltica del Mioceno TmtAB.

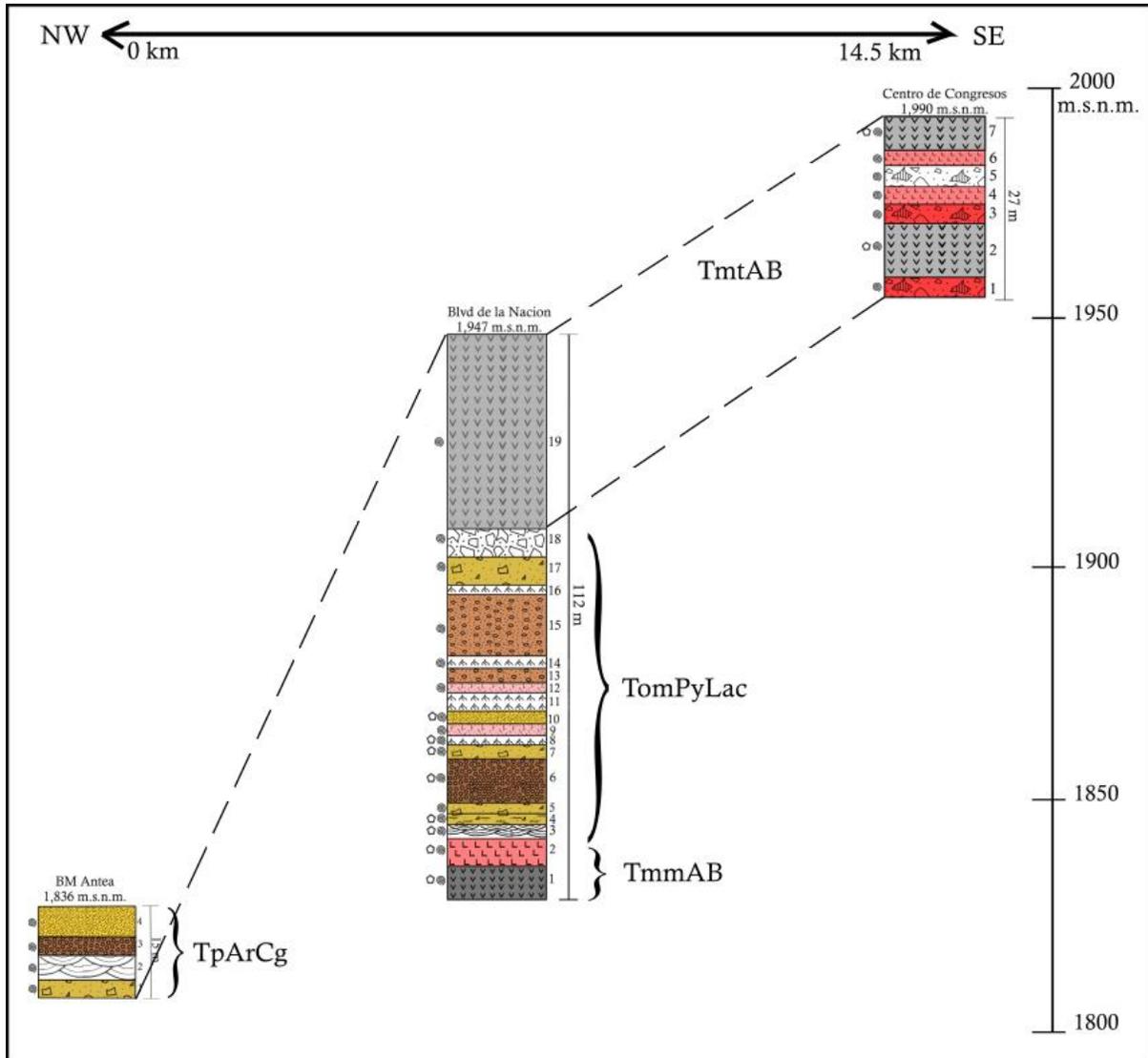


Figura V.7. Esquema de correlación litoestratigráfica en la zona oriental con las unidades identificadas en cada columna basándose en las descripciones, ubicación geográfica y altitud.

En la Figura V.8. se presenta el perfil geológico NW-SE que muestra la distribución de las unidades descritas en cada columna de la zona oriental del graben y que son desplazadas por fallas principales. Los 3 puntos de verificación estratigráfica se ubican a diferentes altitudes debido a la presencia de fallas normales y edificios volcánicos. El BM Antea se localiza en el bloque de techo de la falla central-5 de febrero y al igual que el BM Torra Cápita y los pozos PQro1 y PQro2, se encuentra en las zonas bajas del graben, por lo tanto, forma parte del relleno sedimentario. El sitio Blvd de la Nación se localiza en el bloque de piso de la misma falla cuyas unidades son expuestas por el desplazamiento con dirección N-S estimado de aproximadamente 150 m generado por dicha falla. Esta estimación se llevó a cabo a partir de la posible observación del contacto entre la unidad sedimentaria oligocénica TomPyLac y la unidad volcánica que la sobreyace TmtAB en este sitio y dentro del pozo PQro2. Con base en lo anterior, se explica que las unidades que subyacen al relleno sedimentario se encuentran a mayor altitud que el mismo. En cuanto al sitio Centro de Congresos, este se ubica en el bloque de piso de la falla oriental, es decir, al este del graben de Querétaro y se encuentra a mayor altitud debido al desplazamiento de la misma.

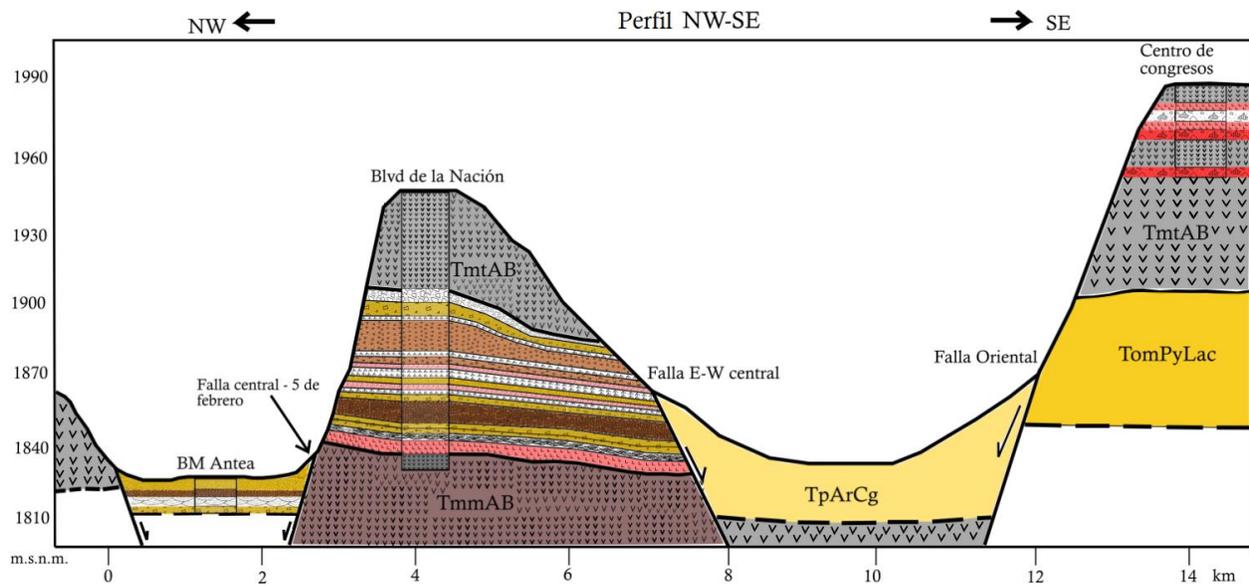


Figura V.8. Perfil geológico sintético NW-SE con las columnas litoestratigráficas del BM Antea, Blvd de la Nación y Centro de Congresos con respecto a las fallas. El color de las unidades corresponde a las representadas en el mapa de la Figura V.1.

# VI

## Conclusiones

A partir del estudio litológico en campo y laboratorio se concluyó que las variaciones de las propiedades físicas y mecánicas se asocian a los procesos geológicos que dieron origen a las secuencias vulcano-sedimentarias en el graben de Querétaro. Asimismo, se llevó a cabo una evaluación del comportamiento mecánico de ambas unidades basándose en dichas propiedades que permitió la relación del origen de los sedimentos con la plasticidad y compresibilidad de las unidades granulares.

❖ Utilizando el Sistema Unificado para la Clasificación de los Suelos (SUCS) se determinó la relación entre los procesos geológicos y las propiedades físicas y mecánicas de las secuencias vulcano-sedimentarias. Estas propiedades son: el análisis de distribución granulométrica, la mineralogía de arcillas, la plasticidad y compresibilidad de la fracción fina.

❖ El comportamiento mecánico de la fracción fina de las secuencias estudiadas se estima a partir de sus variaciones de la plasticidad y la compresibilidad; que a su vez están determinadas por el contenido de limos y arcillas y de su composición mineralógica arcillosa.

❖ Los depósitos fluviales y coluviales de areniscas y conglomerados de la secuencia pliocénica TpArCg se clasificó como una secuencia con gradación normal de arenas bien graduadas y en ocasiones limosas (SM/SW) así como gravas bien graduadas (GW) en la base. La composición mineralógica del material fino es principalmente caolinítica que presenta baja plasticidad (ML). La parte superior de la secuencia se compone de mineral montmorillonítico de alta plasticidad (MH) que corresponde a la llanura de inundación. Se concluye que la baja plasticidad y el bajo contenido de arcilla en esta secuencia representa un grado bajo de compresibilidad.

❖ Los sedimentos finos de depósitos fluviales y lacustres de la secuencia oligocénica TomPyLac se clasificó como una secuencia con gradación inversa de arenas limosas (SM) y piroclásticos retrabajados bien graduados (SW). En esta secuencia la parte arcillosa que se debe al alto grado de alteración presenta una alta plasticidad (MH) con más arcillas montmorilloníticas y en menor proporción de illita de baja plasticidad (ML). A partir de las propiedades analizadas se concluye que esta secuencia es más compresible.

❖ Ambas secuencias presentan estratos intercalados de depósitos piroclásticos de arenas uniformes (SP), por lo tanto, la actividad volcánica fue continua y el aporte de material a lo largo del graben fue muy importante dando como resultado grandes espesores. Estos depósitos, al igual que las cenizas volcánicas, son considerados no plásticos y no compresibles.

❖ A partir de la diferencia de la mineralogía de arcillas encontradas en las secuencias, se comprueba que la secuencia fluviolacustre y piroclástica del oligoceno TomPyLac es más compresible por tener más montmorillonita. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ochoa *et al.* (2018) en los que la mayor parte de la deformación vertical dentro del graben se acomoda en TomPyLac.

❖ La caracterización física y mecánica de las secuencias vulcano-sedimentarias obtenidas en este trabajo son datos que aportan información para estudios posteriores sobre extracción de agua subterránea, hundimiento y la ruptura de las secuencias, así como para el desarrollo de estudios de planeación urbana en la zona metropolitana de Querétaro.

Otro resultado importante en este trabajo es el análisis de desplazamiento por fallamiento regional en el graben de Querétaro. A partir de las correlaciones estratigráficas y en los perfiles geológicos en las diferentes zonas del graben se observó la distribución de las secuencias vulcano-sedimentarias en las zonas altas y bajas del graben (Figura VI.1), tomando en cuenta su litología y los contactos con la unidad volcánica de basaltos TmtAB.

❖ El fallamiento regional de la zona de estudio ha dado como resultado desplazamientos verticales que permiten la posible observación en superficie de secuencias que se encuentran a centenas de metros de profundidad. Se estimó un desplazamiento de 150 m generado por la falla central-5 de febrero donde se describió la secuencia vulcano-sedimentaria TomPyLac que subyace a la unidad volcánica TmtAB en los afloramientos en el bloque de piso de la falla. Esta relación se observa dentro de los pozos.

❖ A partir de la correlación estratigráfica de pozos en la zona central del graben, se infirieron fallas secundarias cuyas direcciones son NW-SE y E-W y están asociados a las fallas principales por presentar el mismo patrón estructural. Los desplazamientos estimados fueron menores a 30 m en la unidad de areniscas y conglomerados pliocénica TpArCg y la unidad volcánica de basaltos TmtAB.

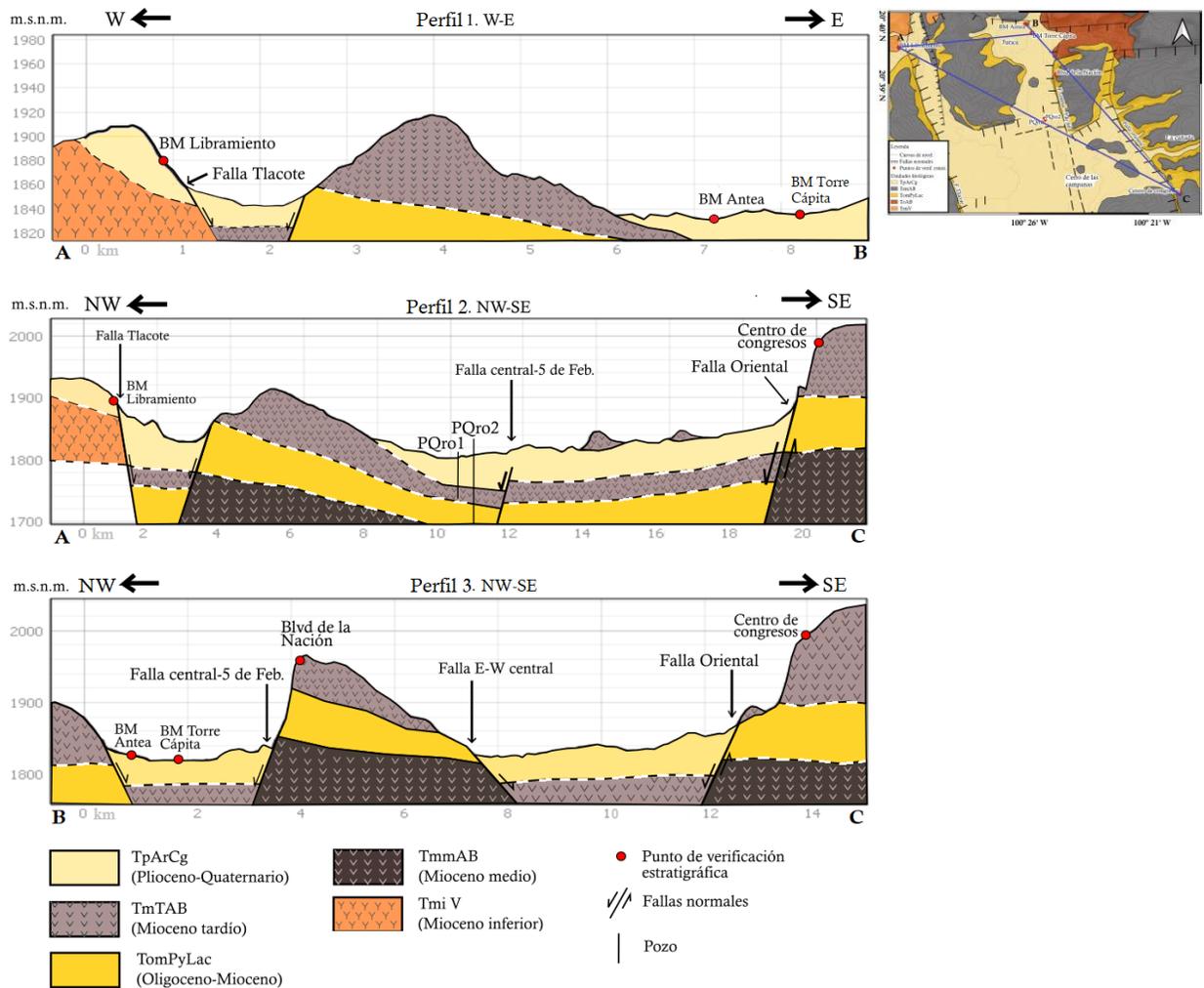


Figura VI.1. Mapa geológico con 3 perfiles geológicos A-B, A-C y B-C representados en superficie con líneas azules, los puntos de verificación estratigráfica y los pozos de la zona central localizados con puntos rojos. Perfiles geológicos representados transversalmente (m.s.n.m.) con direcciones W-E y NW-SE para observar las fallas que cortan las secuencias que rellenan el graben.

## Referencias bibliográficas

- Aguirre-Díaz, G.J., Valdez-Moreno, G., López-Martínez, M. (1998) El volcán la Joya, estados de Querétaro y Guanajuato: un estratovolcán miocénico del Cinturón Volcánico Mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 15 (2), pp. 181- 197.
- Aguirre-Díaz, G.J., Zúñiga-Dávila Madrid, R., Pacheco-Alvarado, F.J., Guzmán-Speziale, M., Nieto-Obregón, J. (2000). El graben de Querétaro, México, Observaciones del fallamiento activo. *GEOS*. 20 (1), pp. 2-7.
- Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M. (2001). The Amazcala caldera, Querétaro, México. Geology and geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 111, pp. 203-218.
- Aguirre-Díaz, G.J., Nieto-Obregón, J., Zúñiga, F.R. (2005). Seismogenic Basin and Range and intra-Arc normal faulting in the central Mexican Volcanic Belt, Querétaro, México. *Geological Journal*. 40, pp 215-243.
- Alaniz-Álvarez, Susana A., Nieto-Samaniego, Ángel F., Reyes-Zaragoza, Ma. Andrea, Orozco-Esquivel, Ma. Teresa, Ojeda-García, Ángel C., Vasallo, Luis F. (2001). Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 8 (2), pp. 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Orozco-Esquivel, Ma. T., Vasallo, L.F., Xu, S. (2002) El sistema de fallas Taxco-San miguel de Allende: Implicaciones en la deformación por eocénica del centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. (1), pp. 12-29.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F. (2007) El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas el centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. (1), pp. 65-82.

- Alonso-Rodríguez, F.J. (2010). Propiedades físicas: densidad y porosidad. Departamento de geología, Universidad de Oviedo.
- Arango-Guevara, A.F., Mitre-Salazar, L.M., Martínez-Reyes, J. (2007) Actualización del conocimiento geológico en la cuenca del río Chichimequillas, Estado de Querétaro, México, *Universidad de Oviedo*. 27, pp. 29-39.
- Arche, A. (2010). *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*, Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- ASTM D422-63: *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, American Society for Testing and Materials, (2007), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM 152H o D1140: *Standard Test Method for Amount of Materials Soils Finer than the No 200 (75- $\mu$ m) Sieve*, American Society for Testing and Materials, (2007), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM 7181-11: *Standard Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*, (2011), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D854-92: *Standard Test Method for Specific Gravity of Soils*, American Society for Testing and Materials, (2014), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D4531-86: *Standard Test Methods for Bulk Density of Peat and Peat Products*, American Society for Testing and Materials, (2015), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D4318: *Standard test method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils*, American Society for Testing and Materials, (2017), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D2487-17: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, (2017), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D4972-19: *Standard Test Method for Measuring pH of Soil Testing*, American Society for Testing and Materials, (2019), West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org)

- Barton, C.D., Karathanasis, A.D., (2002). Clay Minerals: Encyclopedia of soil science. pp. 187-192.
- Blanco, F. (2012). Estratigrafía y Sedimentología: Prácticas de Geología. España, Universidad Complutense de Madrid.
- Blandón-Molina, F.C., Ramírez-Guzmán, B.J. (2016). Estabilidad estructural de los agregados del suelo en la Finca El Plantel Municipio de Tipitapa. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua.
- Boggs, S. (2013). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. (5° Ed.) Estados Unidos: Editorial Pearson Education.
- Botía-Díaz, W. A., (2015), *Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo*, (TESIS de Licenciatura), Facultad de Ingeniería, Universidad Militar de Nueva Granada, Bogotá Colombia.
- Braja M. Das (2008). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. (5ª Ed.) México, D. F.
- Burt R. (Ed.). (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture (USDA). 700 ps.
- Carreón-Freyre, D. C., Cerca-Martínez, M., Luna-González, L., Gámez-González, F. J., (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 22 (1), pp. 1-18.
- Carreón-Freyre, D.C., González-Hernández, M., Cerca-Martínez, L.M., Gutiérrez-Calderón, R., Jimenez-Sánchez, C.A. (2011) Caracterización geomecánica de los suelos de Iztapalapa, México, para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial. *Pan-AM CGS Geotechnical Conference*.

- Cerca-Martínez, L.M. Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., (2000). The geological evolution of the southern Sierra de Guanajuato; a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *International Geology Review*. 42, pp131-151.
- Coe, A. I., (2010), *Geological field techniques*, United Kingdom: Editorial Wiley-Blackwell.
- Comisión Federal de Electricidad, (2016), *Estudio Geológico Regional*. México.
- Dávalos-Álvarez, O.G., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Gómez-González, J.M., (2005). Las fases de deformación Cenozoica en la región de Huimilpan, Querétaro, y su relación con la sismicidad local: México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 22 (2), pp 129-147.
- Echegoyén-Sánchez, J., Romero-Martínez S., Velázquez-Silva, S., (1970). Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato: México. *Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín*, 75, p 36.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marret, R., (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 53 (1), pp 1-26.
- Ferrari, L., (2000). Avances en el conocimiento de la Faja volcánica transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 53. pp 84-92.
- Flores-Delgadillo, L., Alcalá-Martínez, J.R., (2010). Manual de procesos analíticos. Instituto de Geología, Laboratorio de física de suelos, UNAM, México.
- Gómez-Giraldo, J.C. (2013). *Manual de prácticas de campo y del laboratorio de suelos*: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia.
- Hugget, J.M. (2015) Clay Minerals. *Reference module in Earth System and Environmental Sciences, El sevier*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2016) Carta topográfica F14C65: Conjuntos de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000.

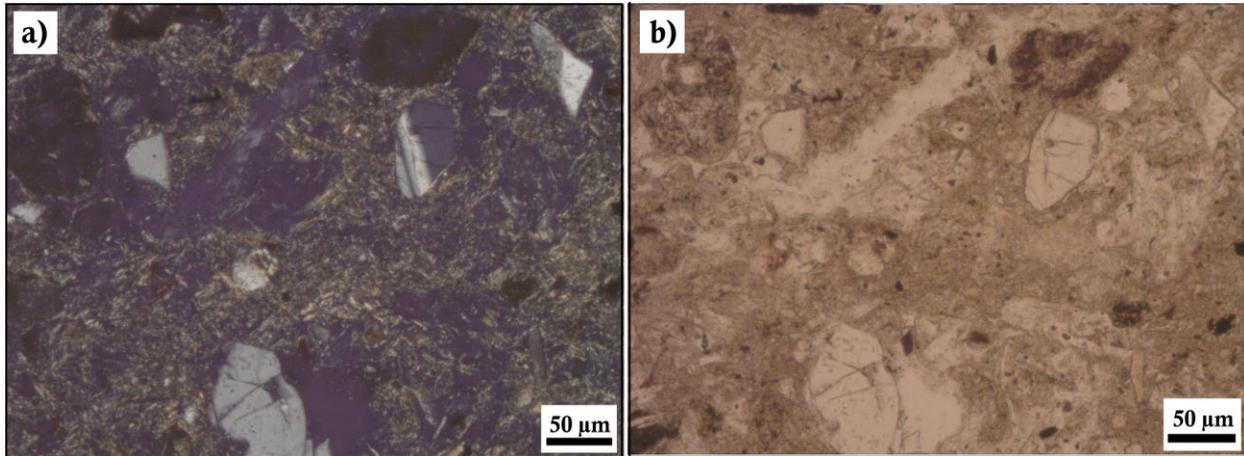
- Juárez-Badillo, E., Rico-Rodríguez, A., (2005), *Mecánica de suelos Tomo I: Fundamentos de mecánica de suelos* (3° Ed.) México: Editorial Limusa.
- Justo, A., Morillo, E., (1999). Técnicas de difracción de rayos X para la identificación cualitativa y cuantitativa de minerales de arcilla. *Ciencia y Tecnología de Materiales II*, Ayuntamiento de Castellón de la Plana.
- Martínez-Reyes, J., Nieto-Samaniego, A.F., (1990), Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto de Geología*. 9 (1), 33–50.
- Neal, A., (2004). *Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress*. *Earth Science Reviews*, 66, 261-330.
- Nichols, G., (2009), *Sedimentology and Stratigraphy* (2° Ed.), United Kingdom: Editorial Wiley-Blackwell.
- Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., Alaniz-Álvarez, S.A., Labarthe- Hernández, G., Rosas-Elguera, J. (1999a.). Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental Volcanic Province, México. *Geological Society of America Bulletin*. 111, pp 347-363.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., Camprubí í Cano, A., (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (3), pp. 285-318.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000: especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos: estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la federación del 31 de diciembre del 2002.
- Ochoa-González, G.H., Carreón-Freyre, D.C., Franceschini, A., Cerca-Matrínez, M., Teatini, P., (2018). Overexploitation of groundwater resources in the faulted basin of Querétaro, México: a 3D deformation and stress analysis. *Engineering Geology*, 245, pp. 192-206.

- Ojeda-García, A.C., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. (2000) Estudio estructural del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende, en la región de Querétaro: Hermosillo, Sonora, Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, Colección Científica, 1, pp. 25-38.
- Ortiz, B. & Ortiz, C., V. Gómez Cueva (Ed.) (1990). *Edafología*. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, México.
- Pellegrini, A. (2018). *Tema 3: Textura y color del suelo*, Departamento de ambiente y recursos naturales, Facultad de Ciencias Agraria y Forestales, U.N.L.P, Argentina.
- Pérez-Venzor, J.A., Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F., Solorio-Munguía, J.G., (1996). Geología del volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 13 (2), pp. 174-183.
- Salamanca-Jiménez, A., Siavosh Sadeghian, K. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé, Colombia.
- Salas, O.V., (2011). Ensayos triaxiales para suelos, *Revista Métodos y materiales*. 1 (1). DOI: 10.15517/MYM.V1I1.8391
- Servicio Geológico Mexicano, (2017). *Petrografía*: México.
- Silva Romo, G., Mendoza Rosales, C.C., Campos Madrigal, E., (2001), *Elementos de la cartografía geológica*, UNAM, Facultad de Ingeniería, México.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., Johnson, C.A., (1992). Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican volcanic belt, Mexico: The Venta de Bravo fault. *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 11983-11993.
- Torra, R. (2003) Geología del subsuelo del Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR), Provincia del Chaco al Nordeste de Argentina. *Ciencia & Natura: Universidad Nacional del Noreste de Argentina*, 25., pp. 83-100.

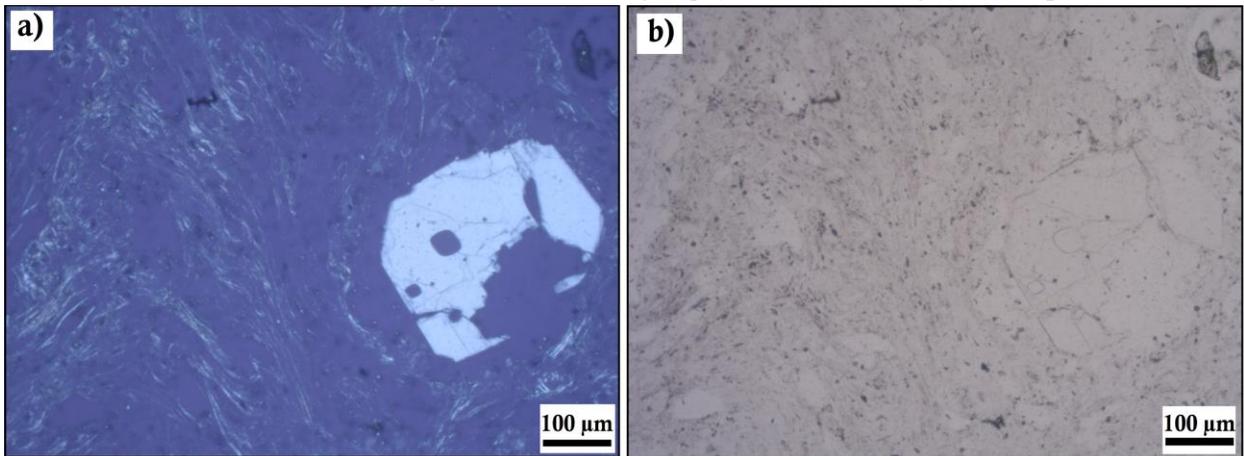
- Tucker, M., (1982), *The field description of sedimentary rocks*. United Kingdom: Geological Society of London.
- Velde, B., (1995), *Origin and mineralogy of clays: clays and the environment*, New York: Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Villegas-Soto, M., Aguilera-Herrera, N., Flores-Delgadillo, L., (1978). Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. *Revista Universidad Nacional Autónoma de México*. 2 (2), pp. 188-193.
- Wu, Ch., Ye, G., Zhang, L., Bishop, D., Wang, J., (2015) Depositional environment and geotechnical properties of clay: a comparison with Ariake and Bangkok clays. *Bulletin Engineering Geologic Environment*, 74, pp. 717-732. DOI 10.1007/s10064-014-0670-0
- Xu, S., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Cerca-Martínez, M. (2011) Structural analysis of a relay ramp in the Querétaro graben, central Mexico: Implications for relay ramp development. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28 (2), pp. 275- 28.

# ANEXOS

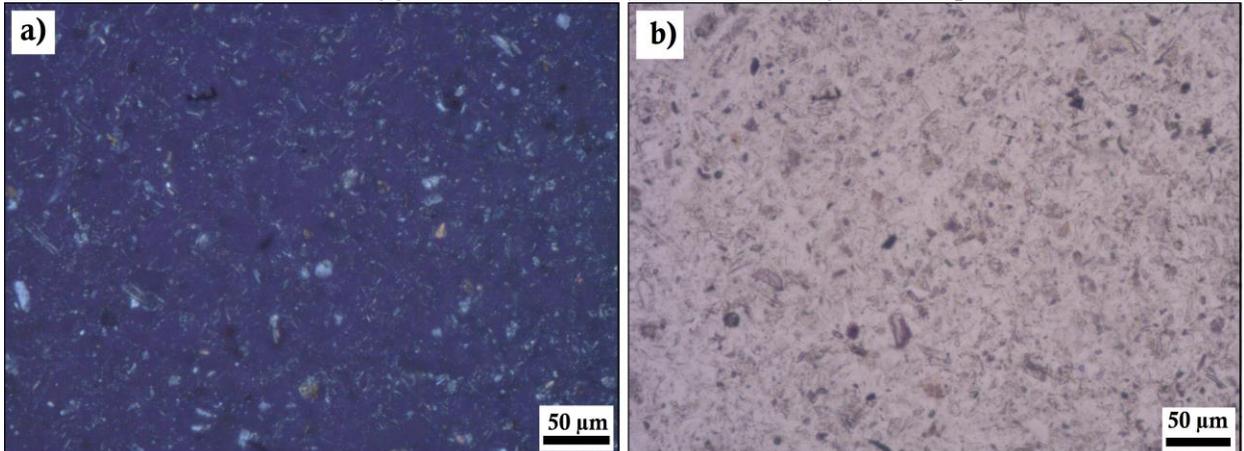
## 1. Petrografía



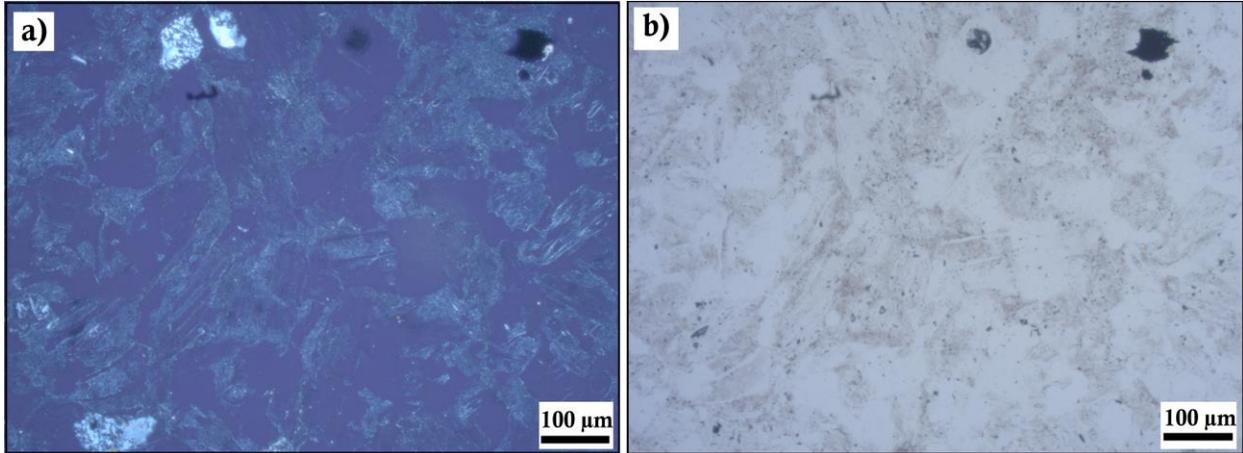
A.1.1. Estrato 2 con matriz vítrea con fenocristales de Qz y Plg. a) nicoles cruzados y b) nicoles paralelos.



A.1.2. Estrato 6 con matriz vítrea y fenocristales de Qz. a) nicoles cruzados y b) nicoles paralelos.



A.1.3. Estrato 7 con matriz vítrea con microcristales de Qz y Plg fracturada. a) nicoles cruzados y b) nicoles paralelos.

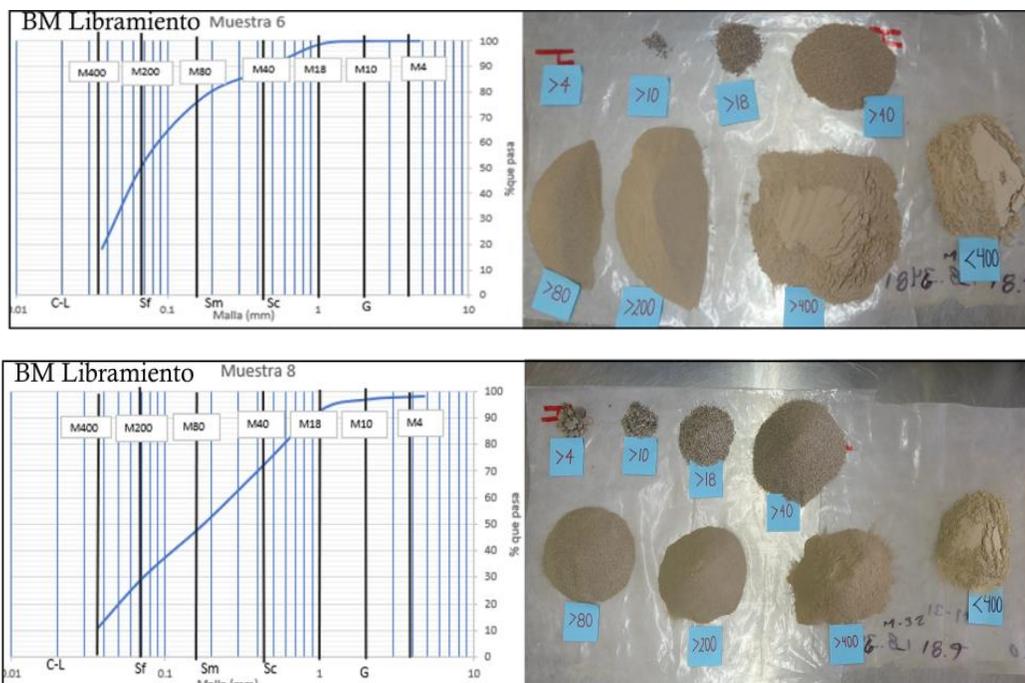


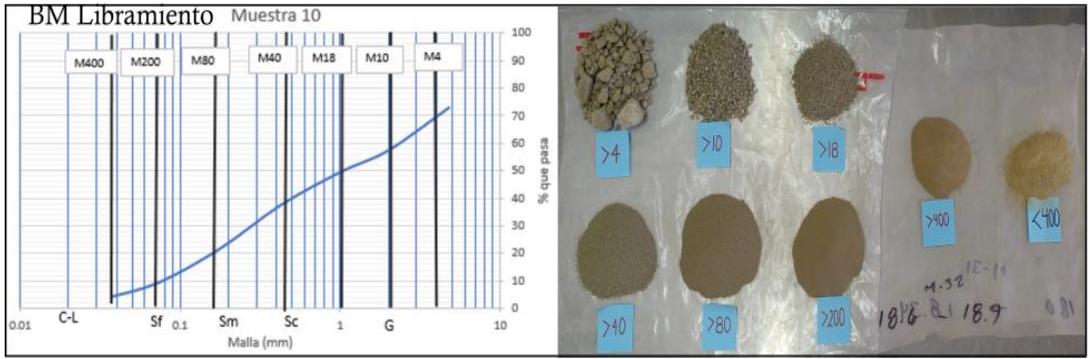
A.1.4. Estrato 10 con matriz vítrea y microcristales de Qz y sanidina. a) nicoles cruzados y b) paralelos.

## 2. Análisis granulométrico de gruesos (Curvas granulométricas).

En esta sección del Anexo se presentan las gráficas de las curvas granulométricas para obtener la distribución de los diferentes tamaños de grano de cada una de las muestras a partir del porcentaje de muestra que pasa en cada uno de los tamices y poder determinar la gradación o uniformidad de estas. A un lado de cada curva se observan las imágenes de las muestras ya separadas por los tamices que indican a simple vista la predominancia de tamaño de grano.

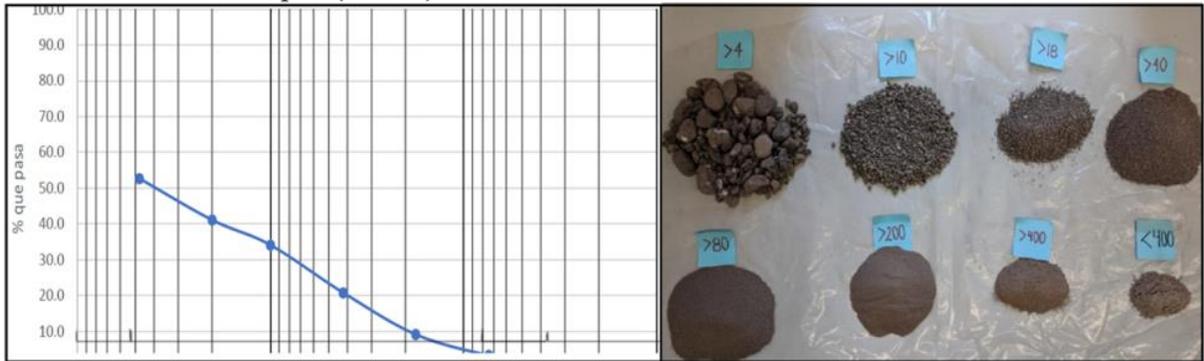
### A.2.1. Curvas granulométricas del banco de material BM Libramiento Norponiente.



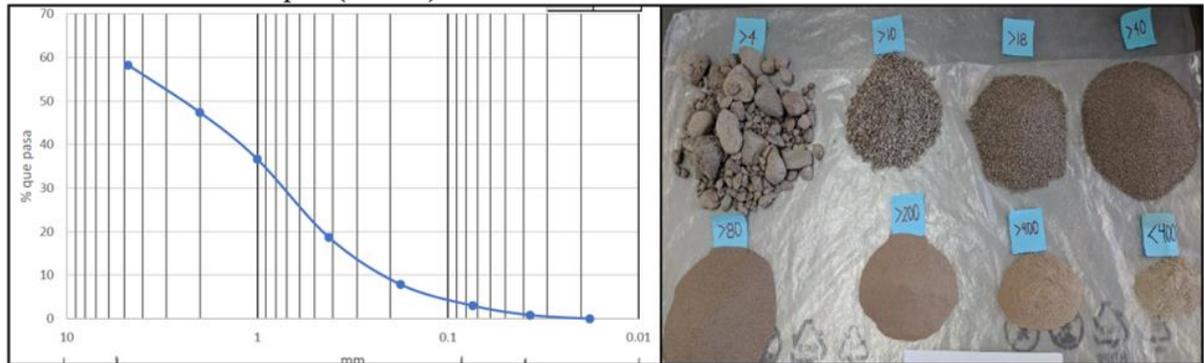


A.2.2. Curvas granulométricas del banco de material BM Torre Cápita.

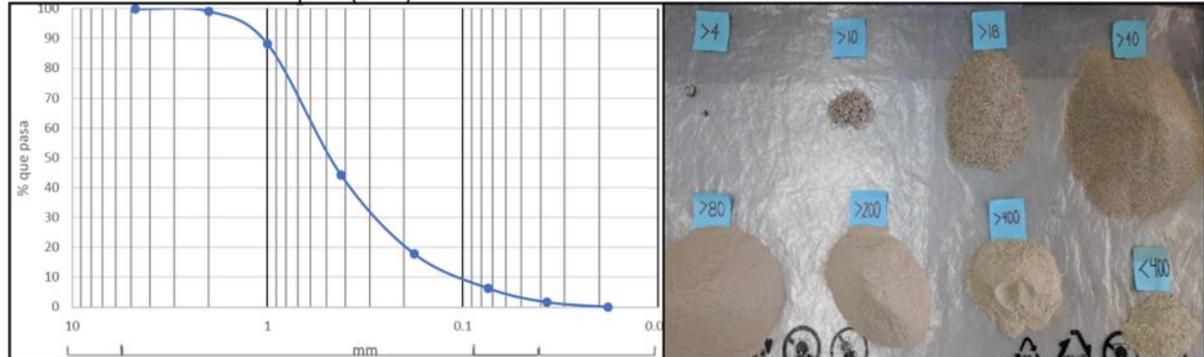
BM TCapita (16.6 m)



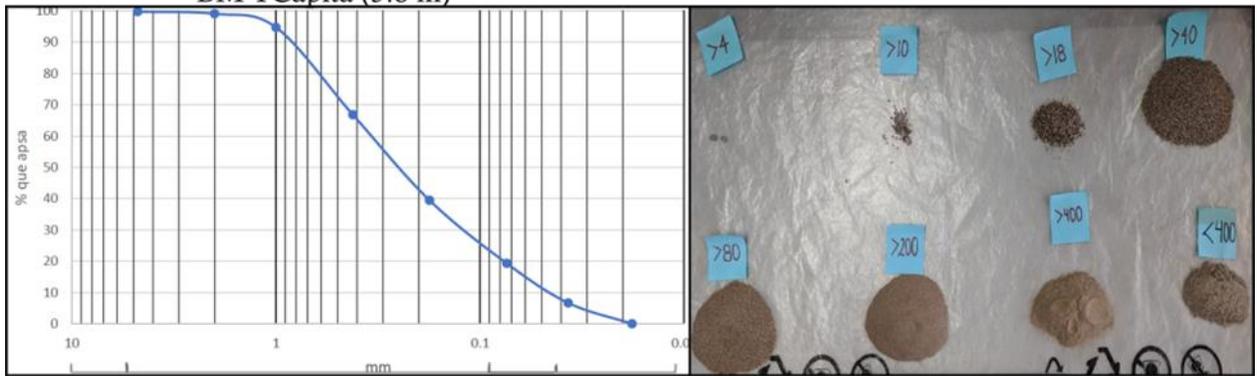
BM TCapita (15.6 m)



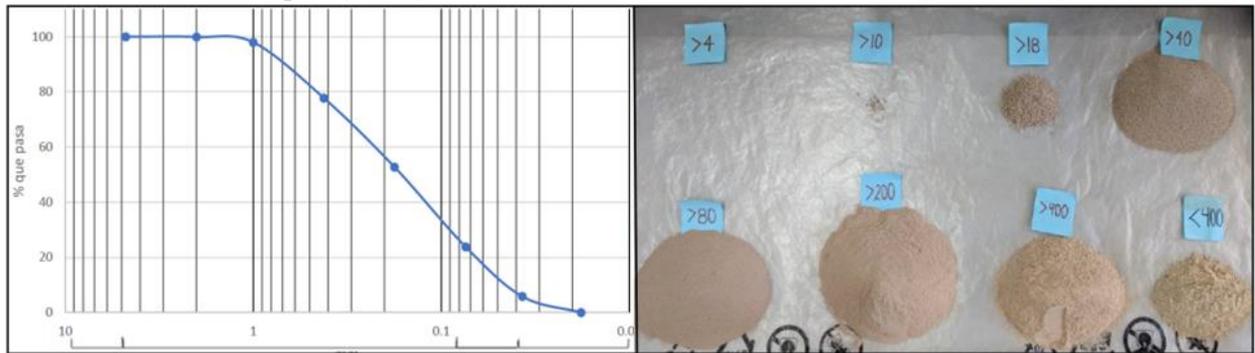
BM TCapita (6 m)



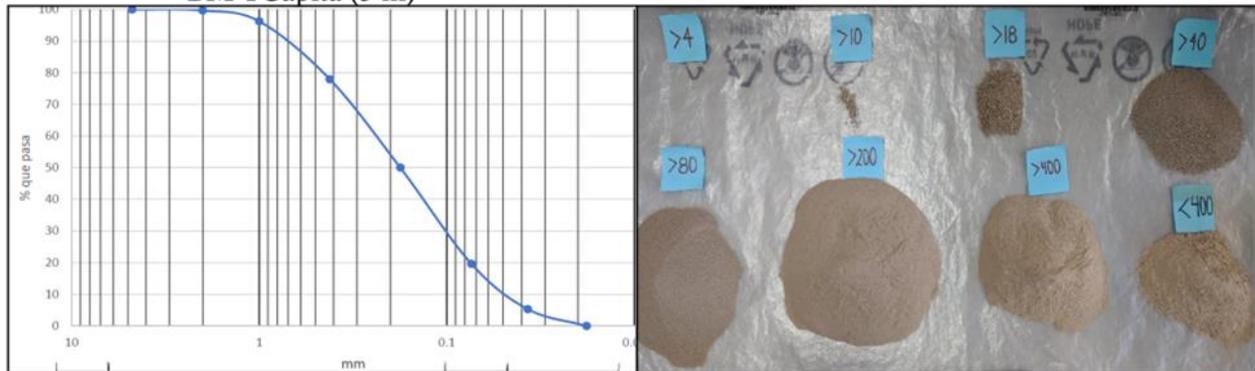
BM TCapita (5.8 m)



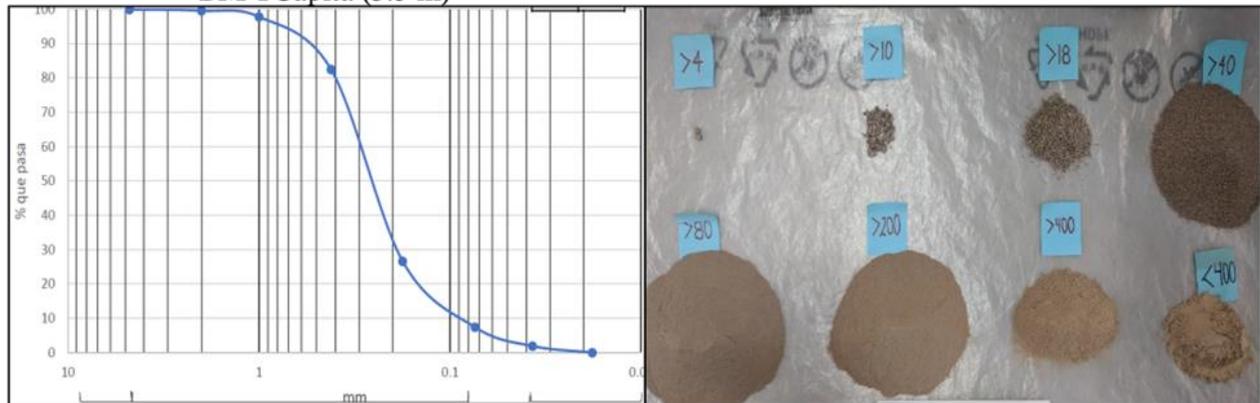
BM TCápita (5.7 m)



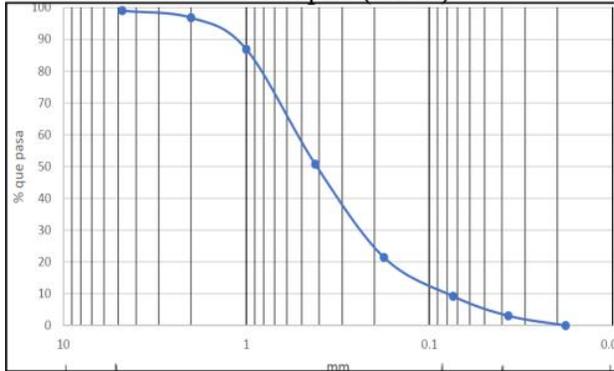
BM TCápita (5 m)



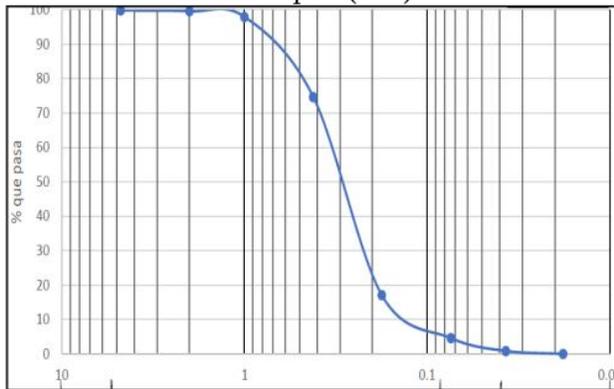
BM TCápita (3.5 m)



BM TCápita (1.5 m)

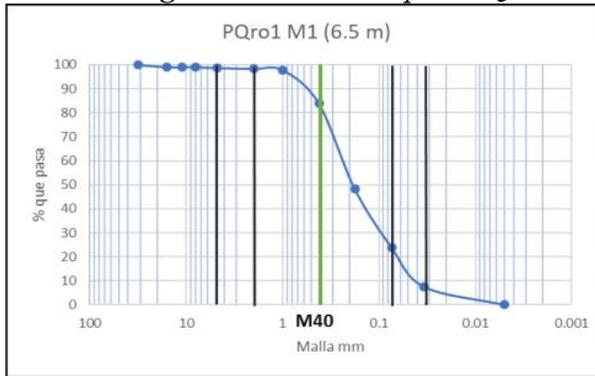


BM TCápita (1 m)

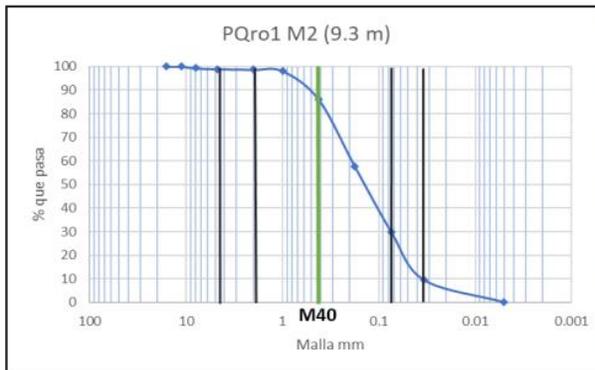


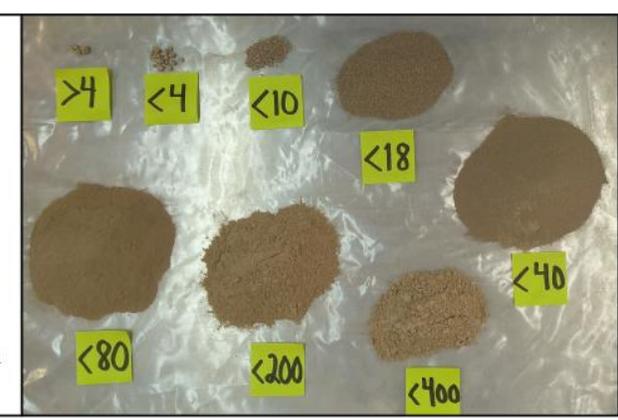
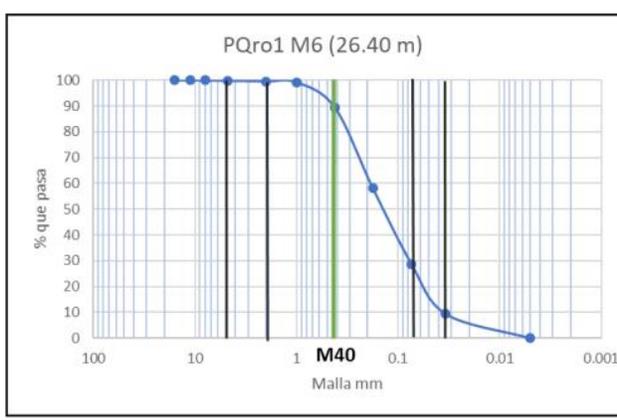
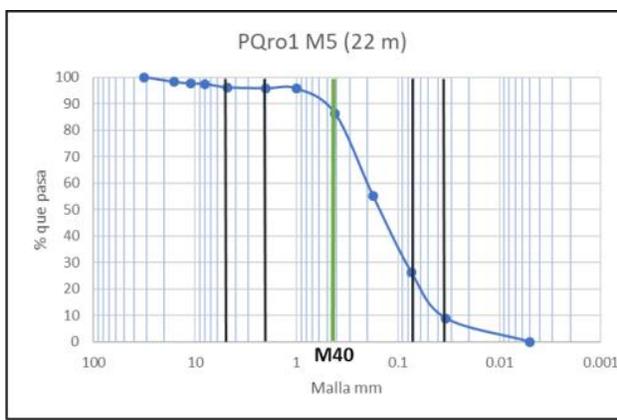
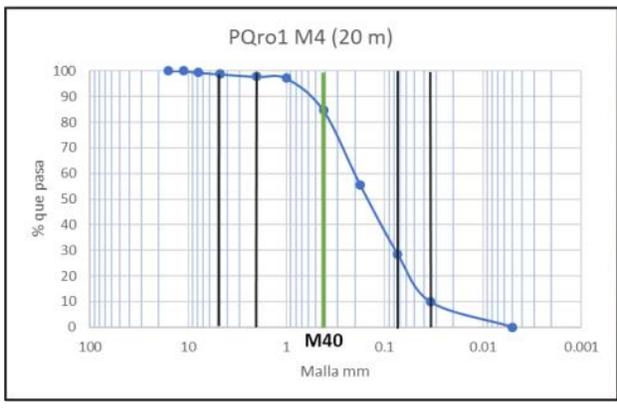
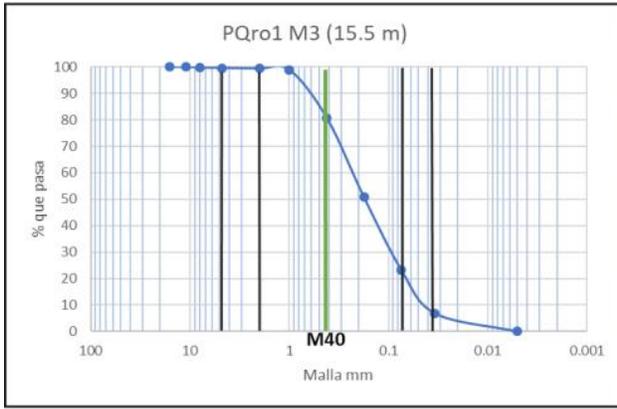
A.2.3. Curvas granulométricas del pozo PQro1

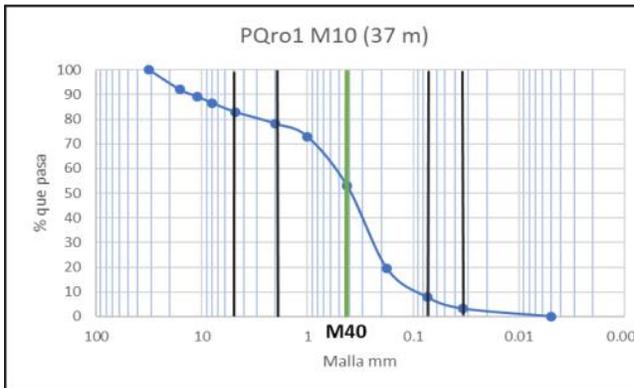
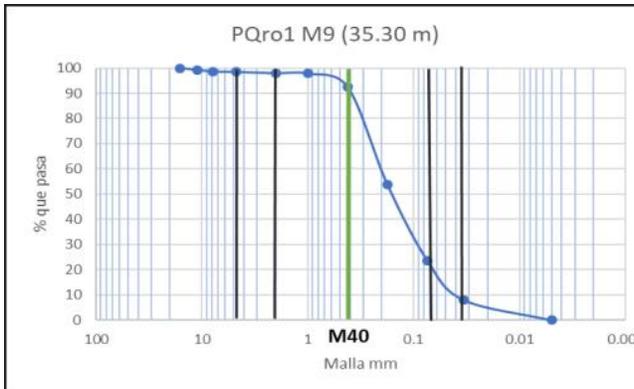
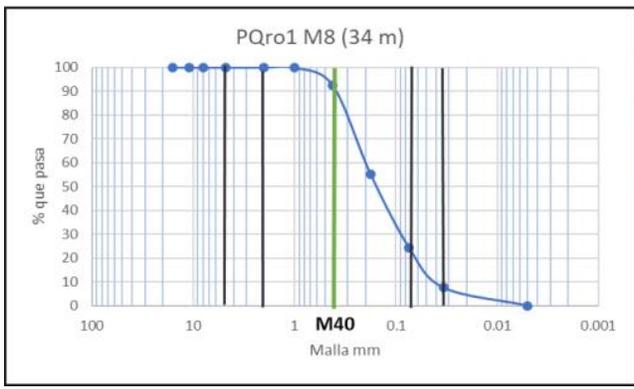
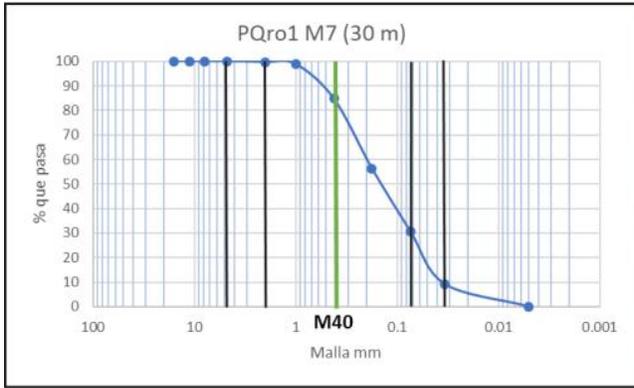
PQro1 M1 (6.5 m)

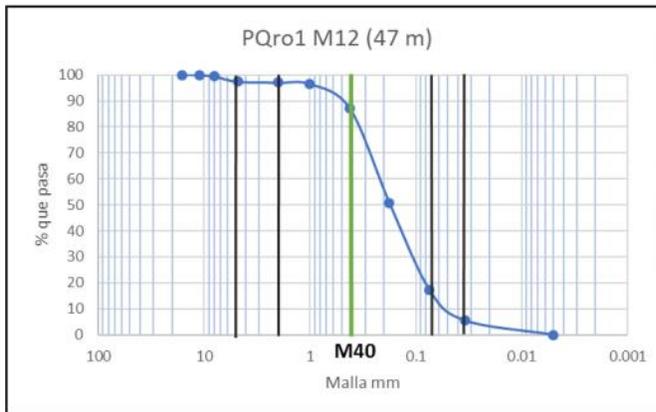
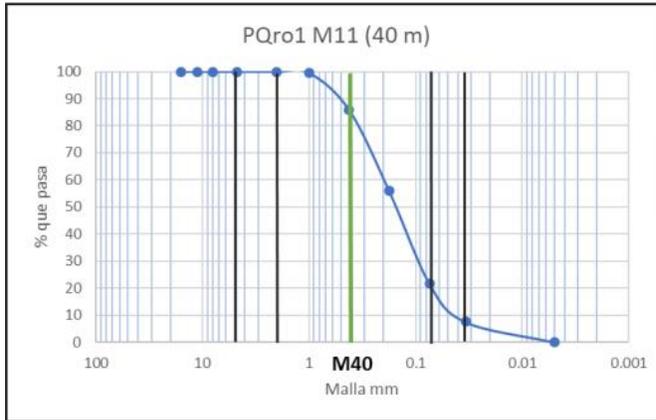


PQro1 M2 (9.3 m)

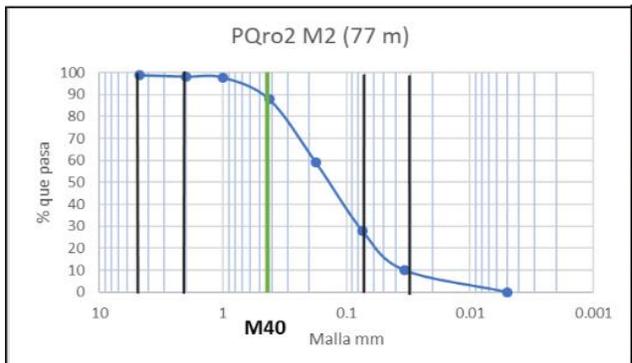
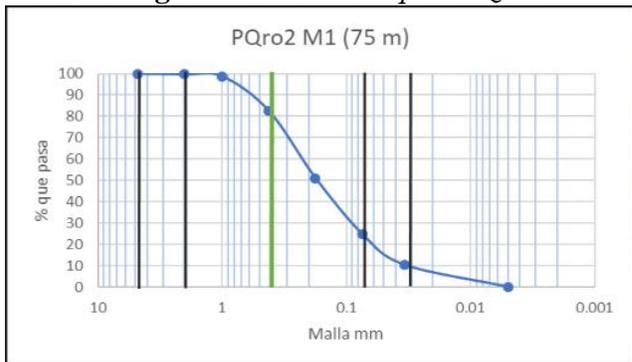


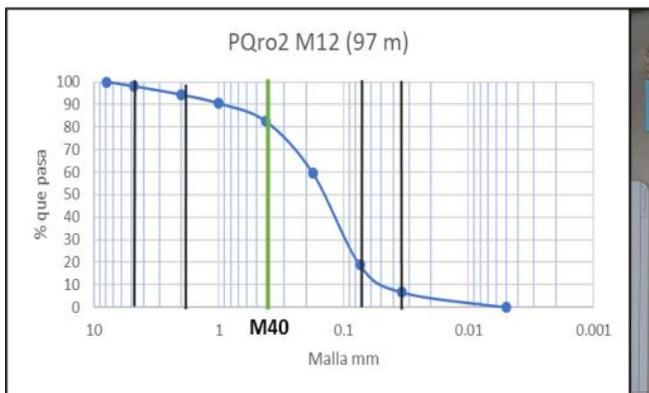
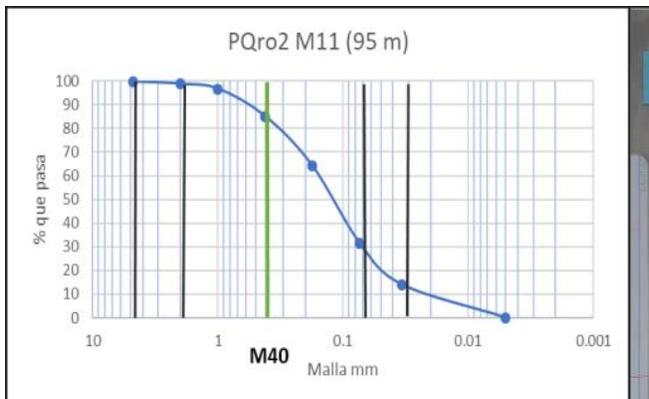
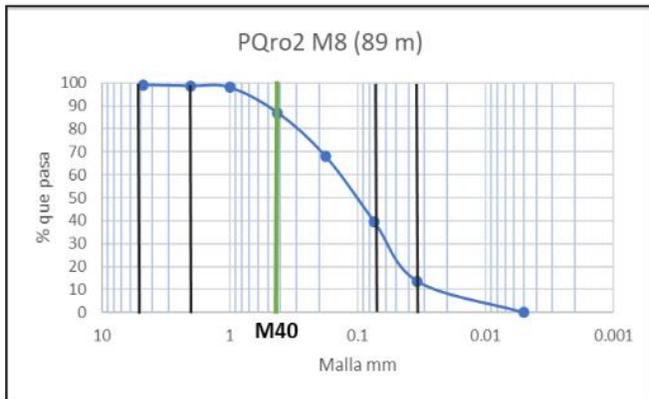
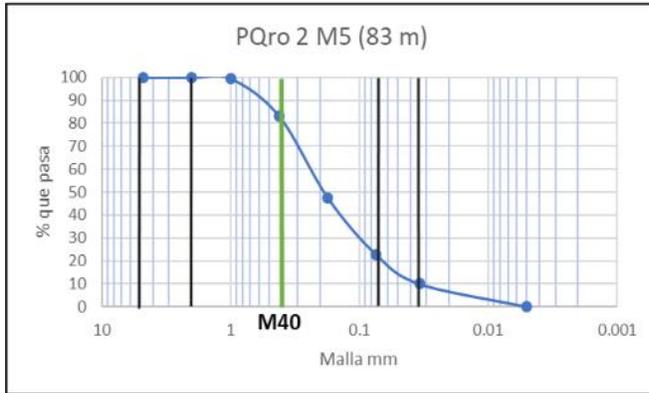


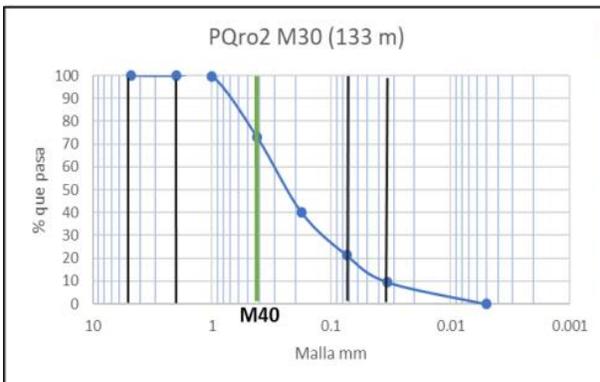
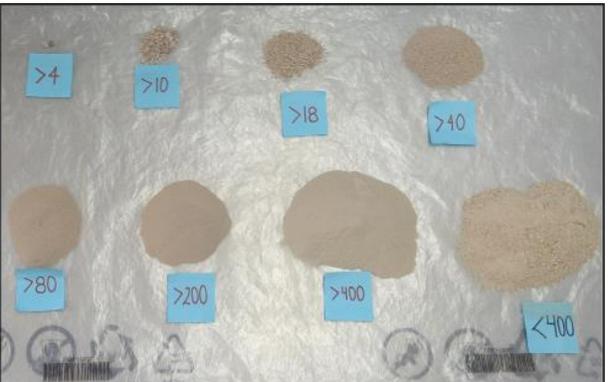
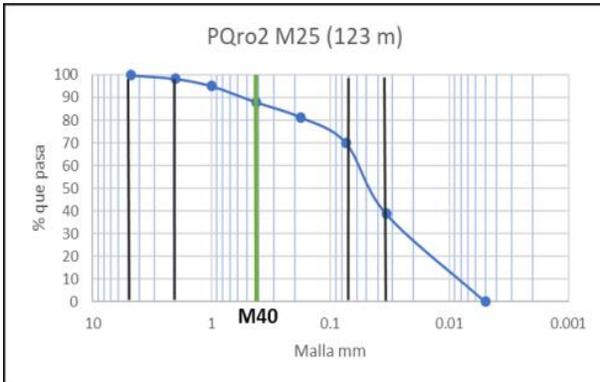
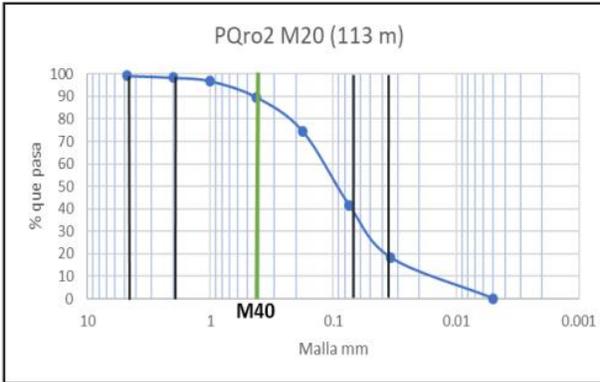
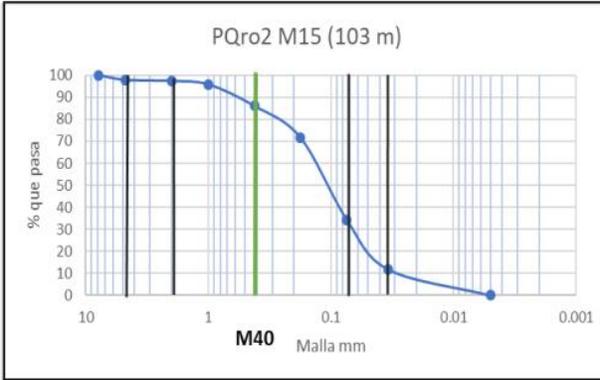


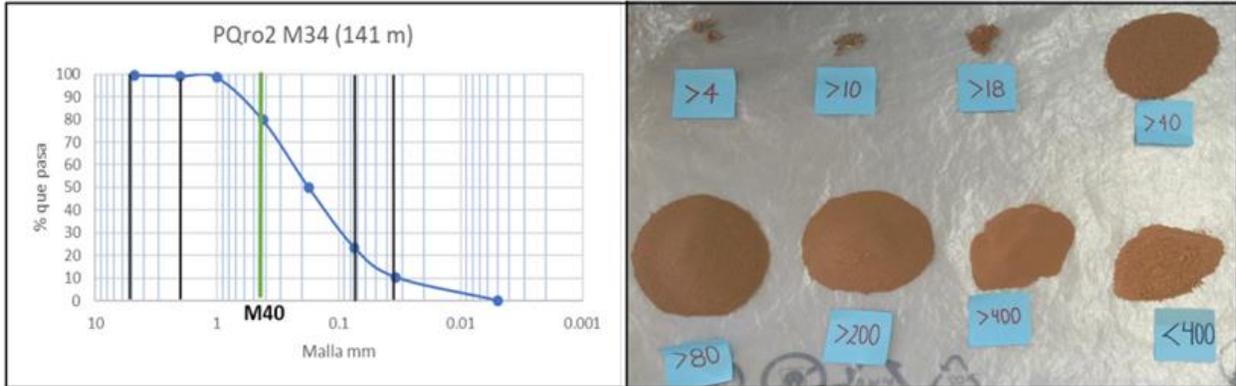


A.2.4. Curvas granulométricas del pozo PQro2





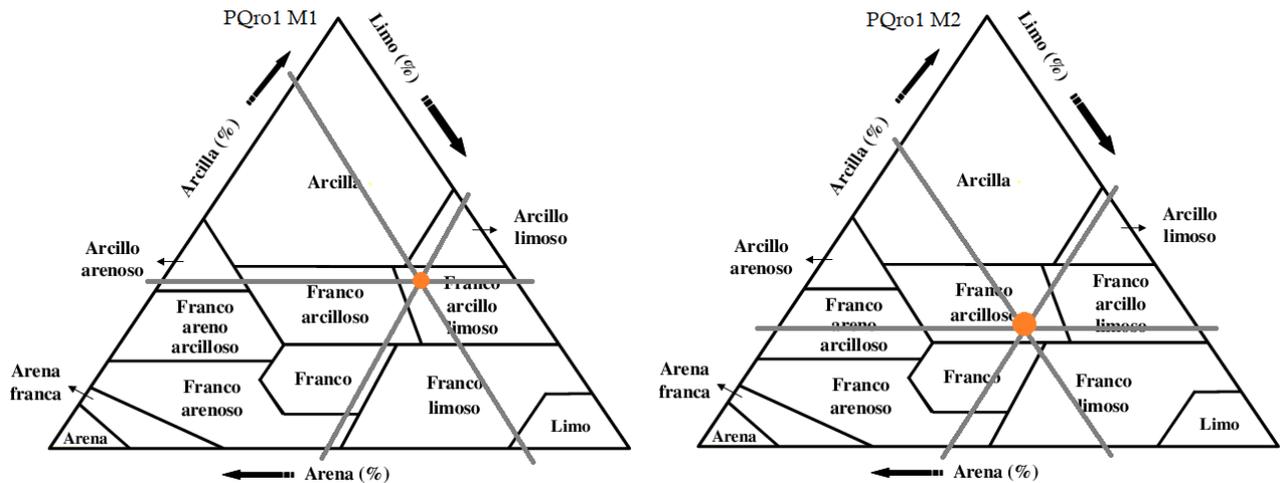


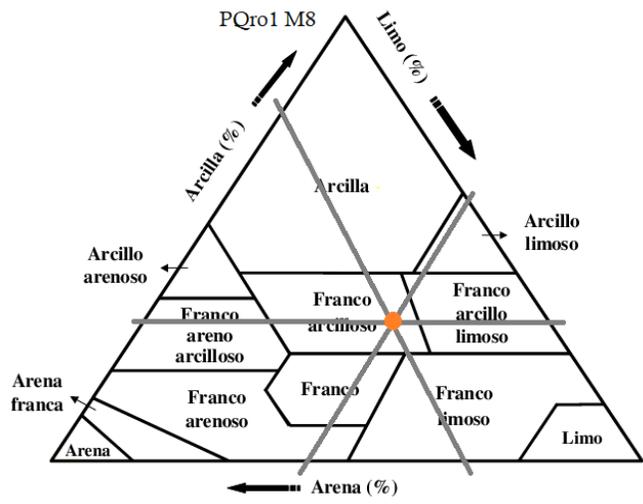
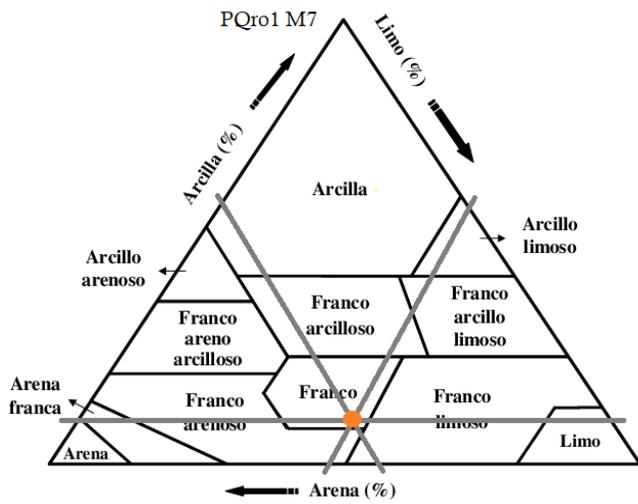
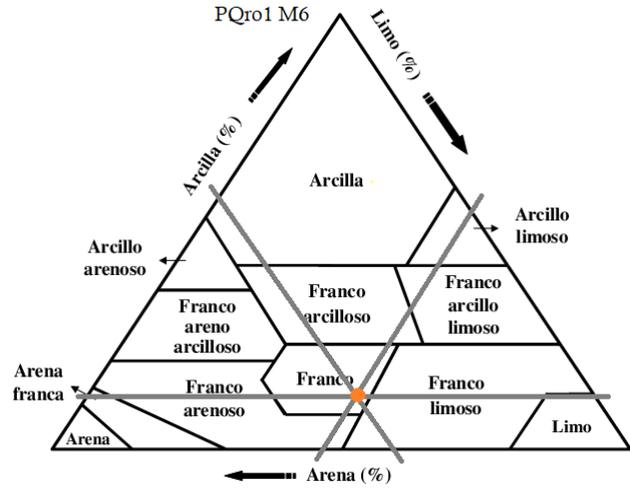
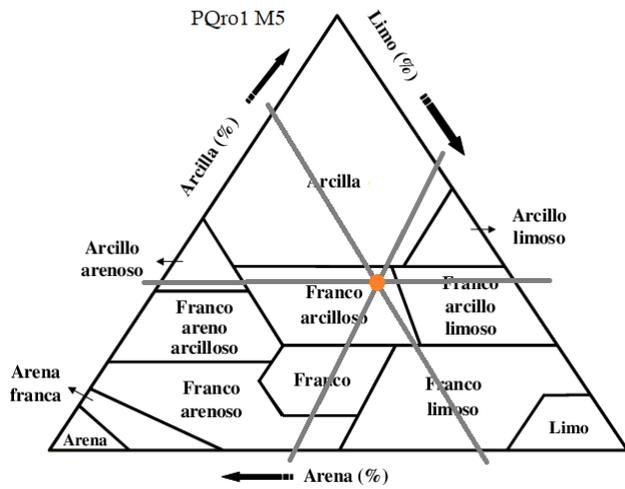
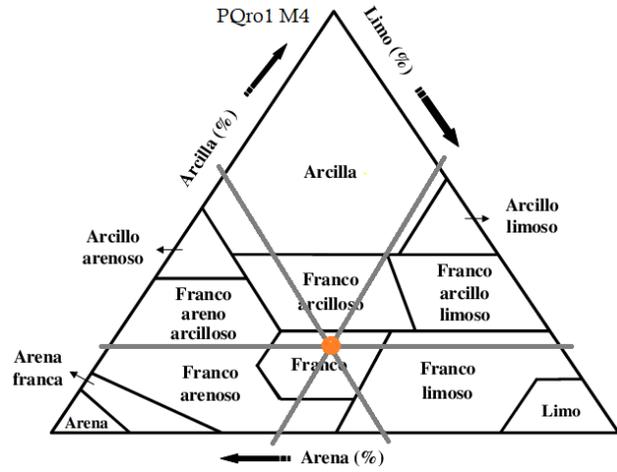
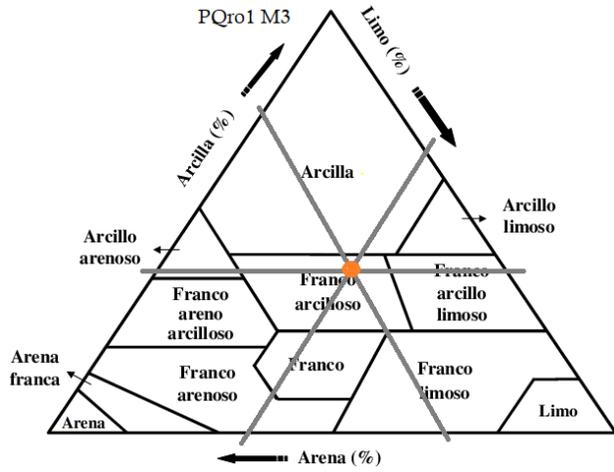


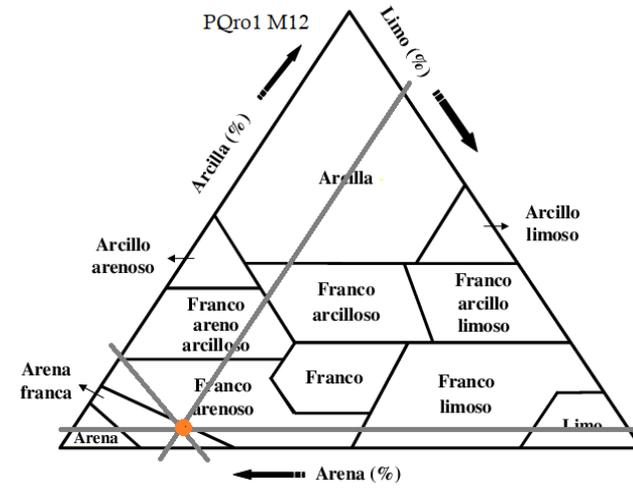
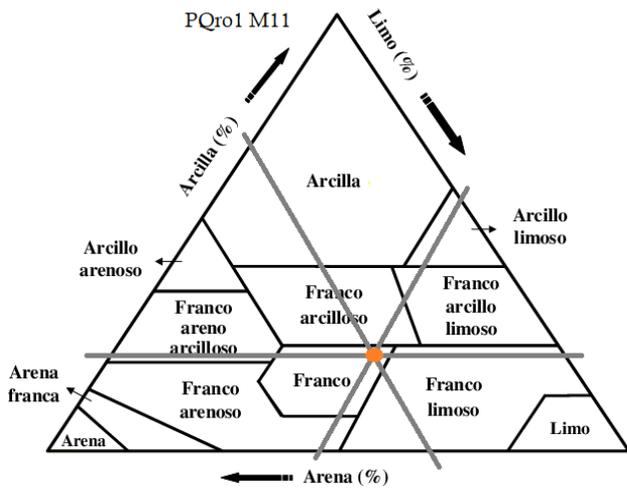
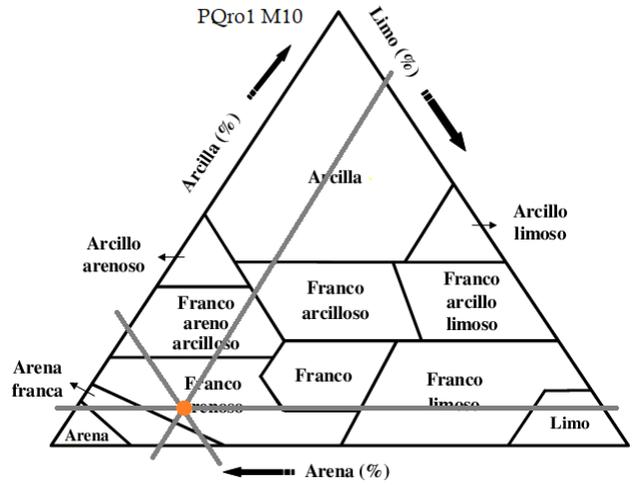
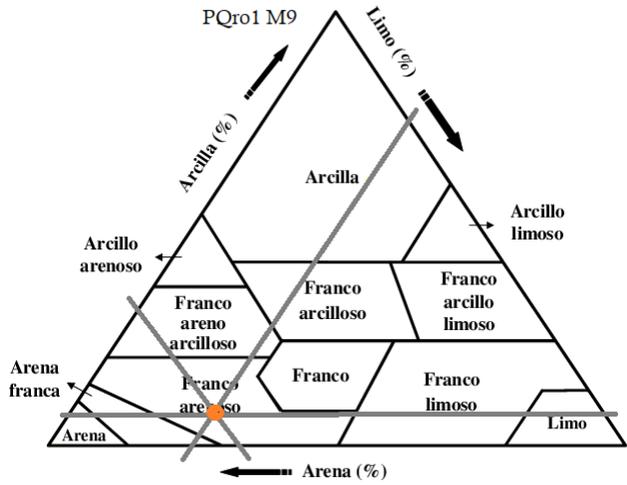
### 3. Análisis granulométrico de finos

En esta sección del Anexo se presentan los triángulos de textura de la USDA (escala 0 a 100%) de cada una de las muestras, obtenidos a partir del porcentaje de cada tamaño de grano fino (arena, limo y arcilla) con base en los tiempos de sedimentación de las partículas para finalmente poder nombrar la muestra.

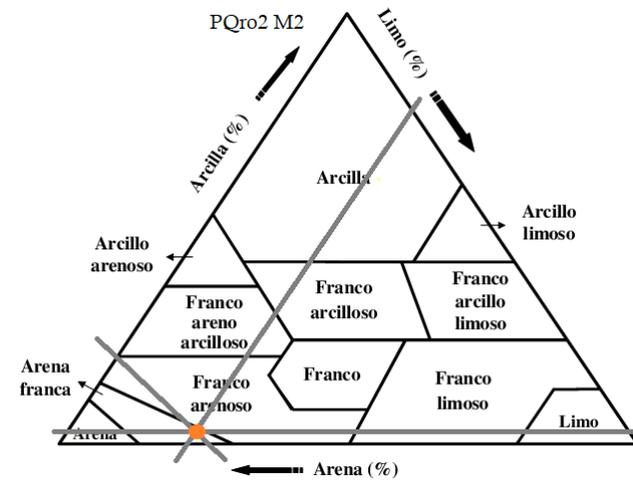
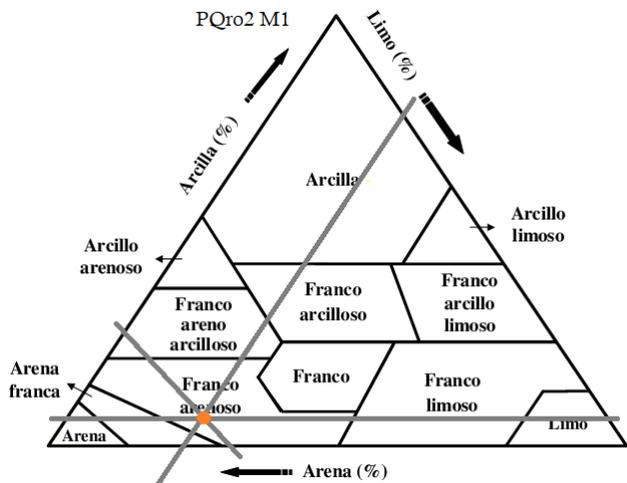
#### A.3.1. Triángulos de textura del pozo PQro1

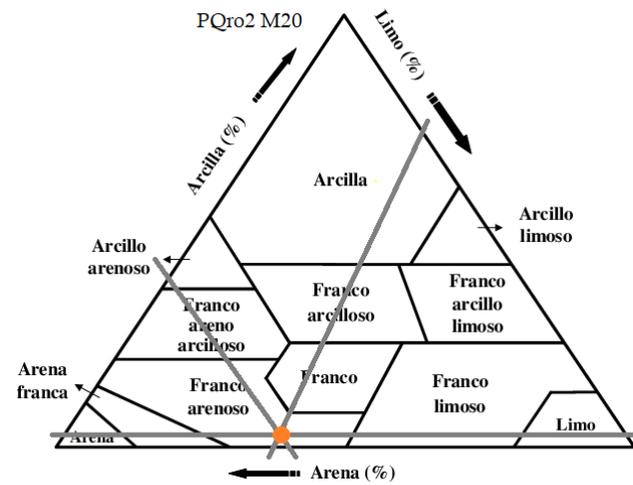
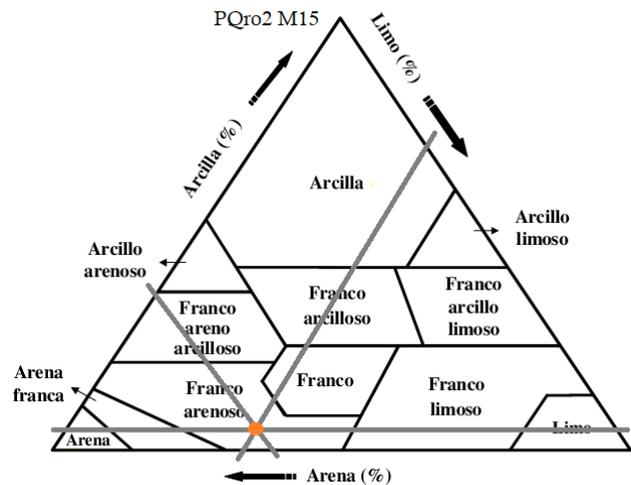
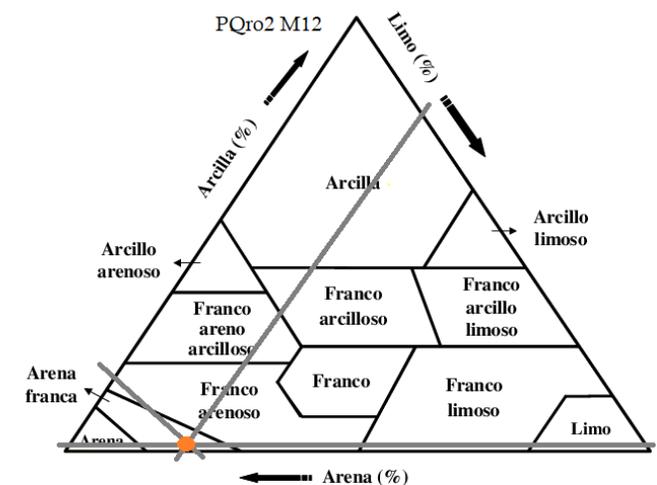
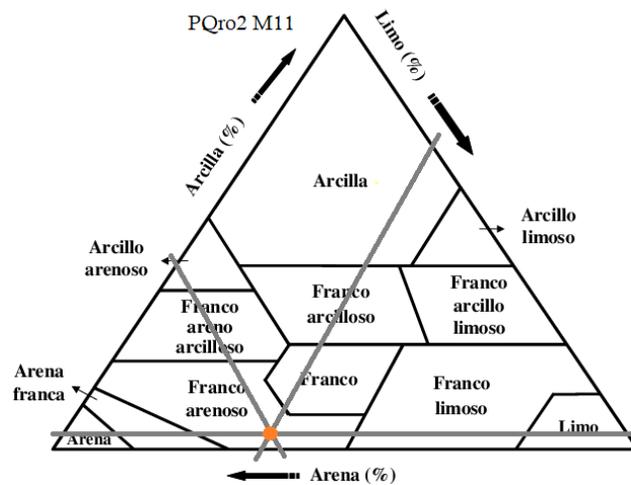
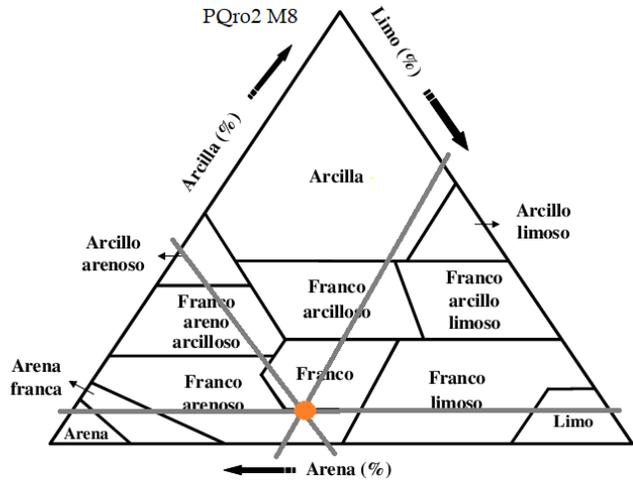
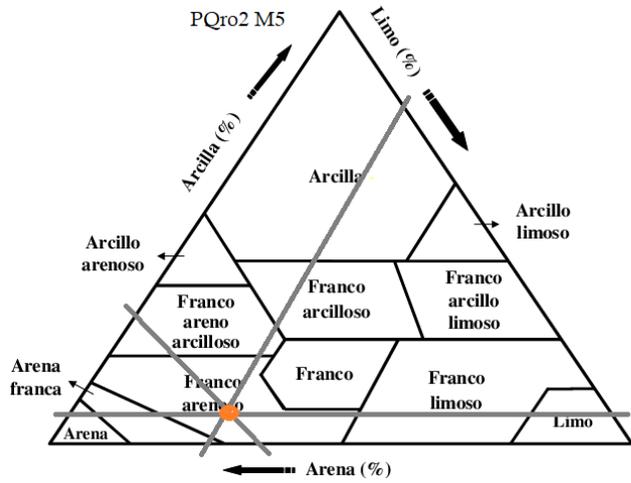


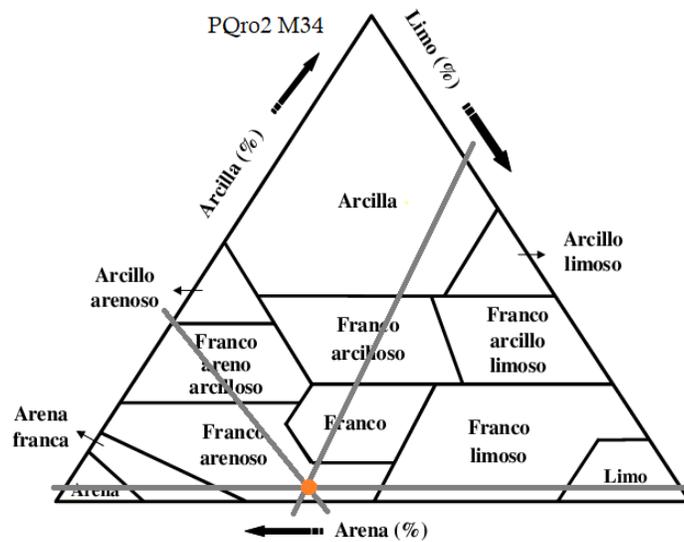
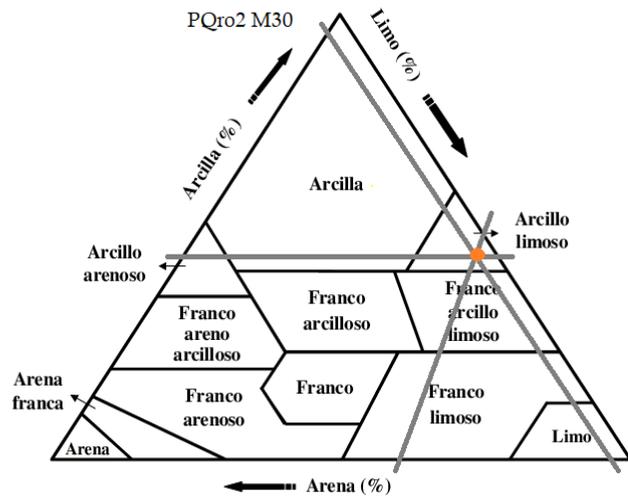
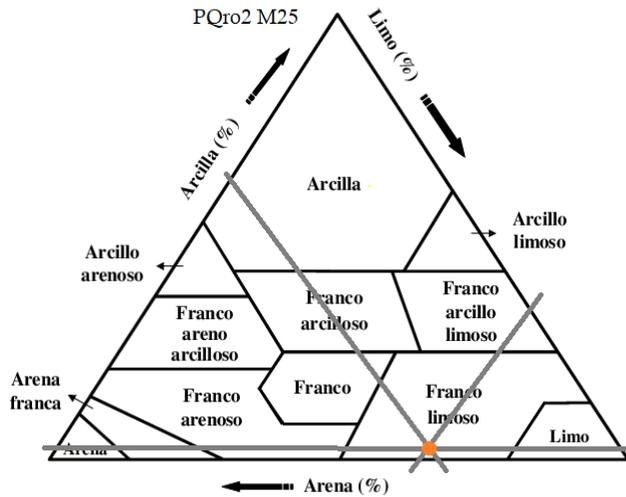




A.3.2. Triángulos de textura del pozo PQro2



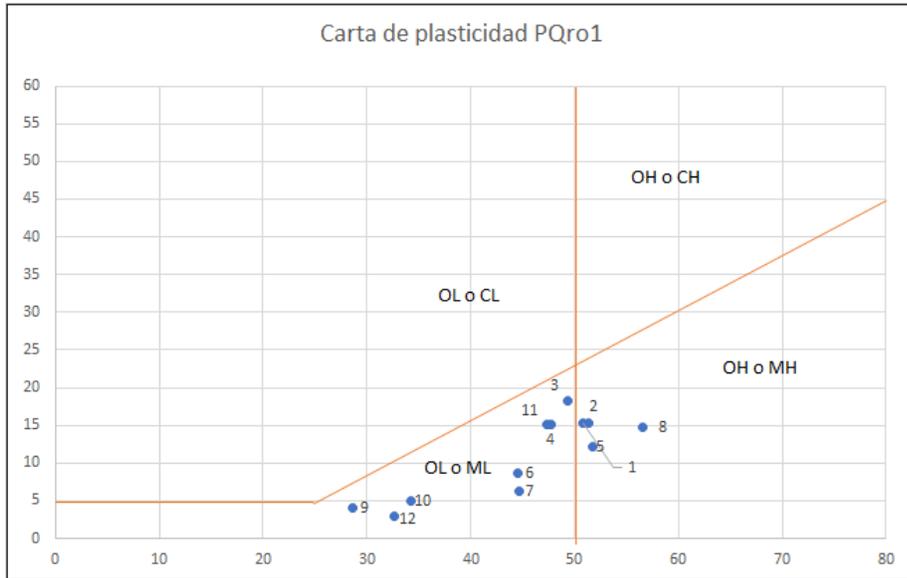




#### 4. Cartas de plasticidad, límites líquido, plástico e índice de plasticidad

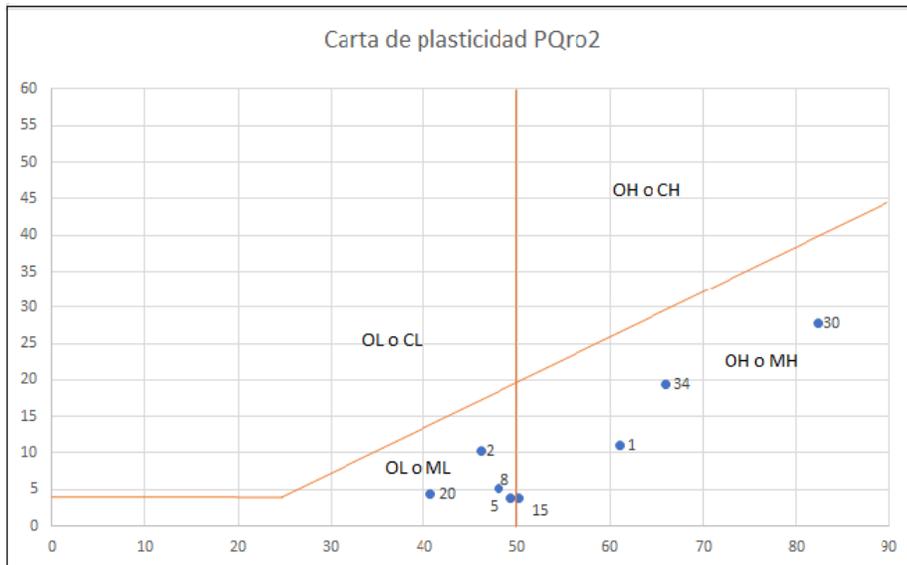
En esta sección del Anexo se presentan las cartas de plasticidad de los pozos obtenidas a partir del límite líquido en el eje de las  $x$  y el índice de plasticidad en el eje de las  $y$ , para dar como resultado la clasificación de limos (M) y arcillas (C) con baja o alta plasticidad utilizada de igual manera por la SUCS. Como se observan los dos gráficos, las muestras se clasifican únicamente en limos de baja plasticidad (ML de *low* en inglés) y alta plasticidad (MH de *high* en inglés).

A.4.1. Carta de plasticidad, límites líquido y plástico e índice de plasticidad del pozo PQro1



Muestra	IP	LL	LP
1	15.3	50.8	35.5
2	15.35	51.3	35.95
3	18.25	49.3	31.05
4	15.15	47.4	32.35
5	12.25	51.7	39.45
6	8.7	44.5	35.8
7	6.25	44.7	38.45
8	14.75	56.5	41.75
9	4.05	28.6	24.55
10	4.94	34.22	29.28
11	15.07	47.75	32.68
12	2.88	32.6	29.72

A.4.2. Carta de plasticidad, límites líquido y plástico e índice de plasticidad del pozo PQro2



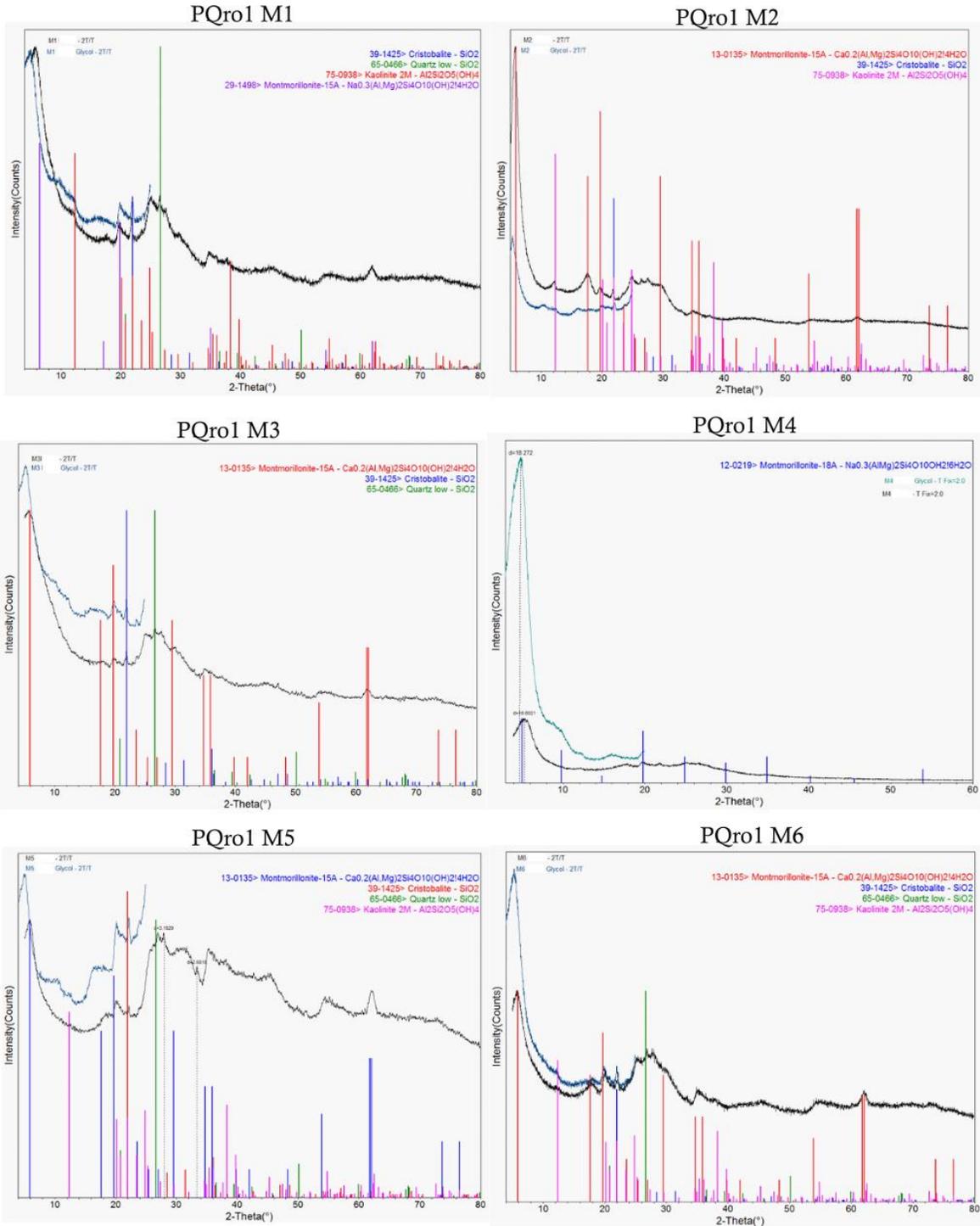
Muestra	IP	LL	LP
1	11	61	50
2	10.31	46.1	35.79
5	3.78	49.3	45.52
8	5.2	48	42.8
11	-	-	-
12	-	-	-
15	3.87	50.15	46.28
20	4.38	40.7	36.32
25	-	-	-
30	27.85	82.5	54.65
34	19.46	66.1	46.64

## 5. Difractogramas

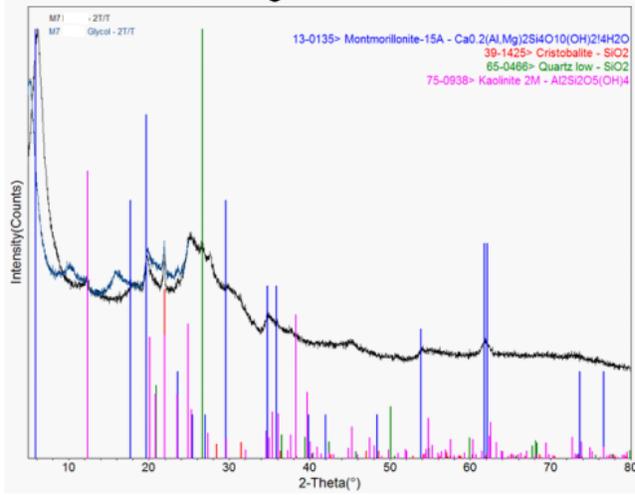
En esta sección del Anexo se presentan los difractogramas de cada muestra donde se observan dos lecturas diferentes (azul y negra) que representan las lecturas con y sin glicol. Esto con el objetivo de poder determinar si las muestras presentan la característica de contracción y

expansión. En cuanto a las líneas de colores, que marcan los picos más representativos, cada color significa un mineral o elemento que contiene cada muestra. Los picos más grandes son los elementos más predominantes.

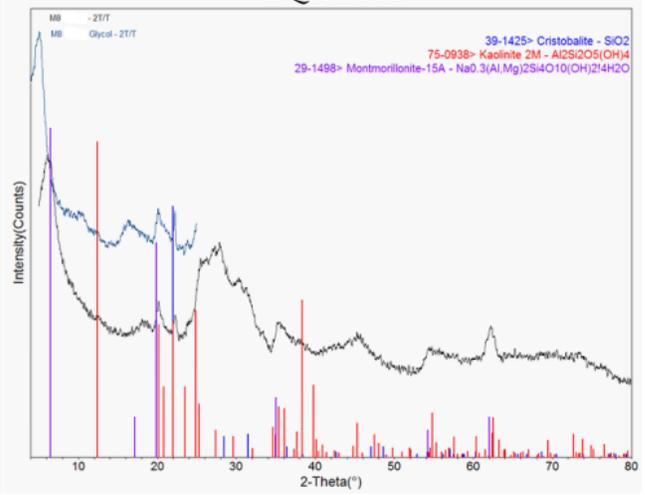
### A.5.1. Difractogramas del pozo PQro1



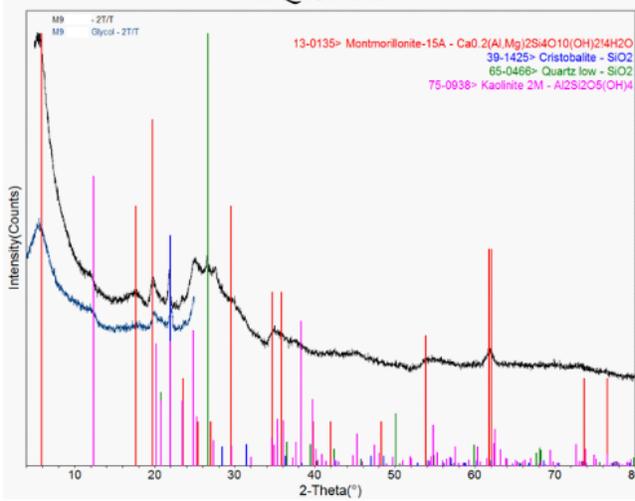
PQro1 M7



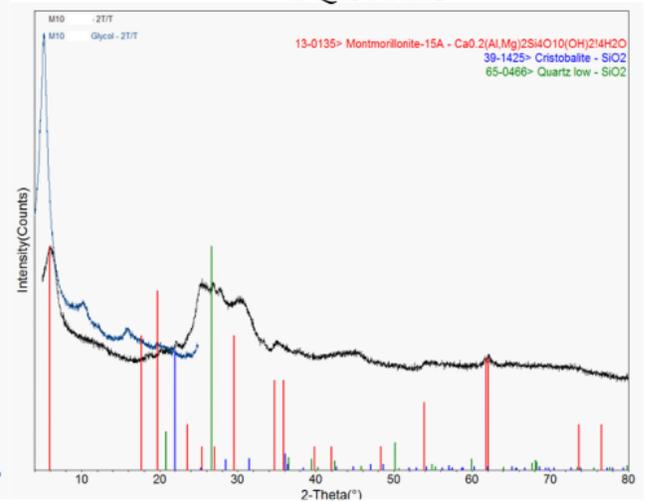
PQro1 M8



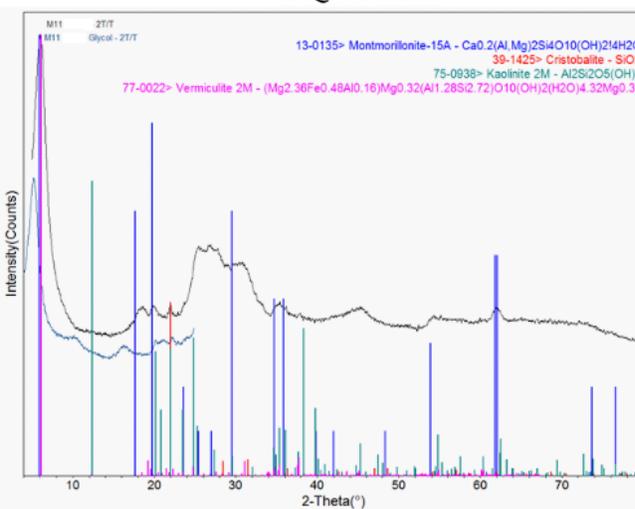
PQro1 M9



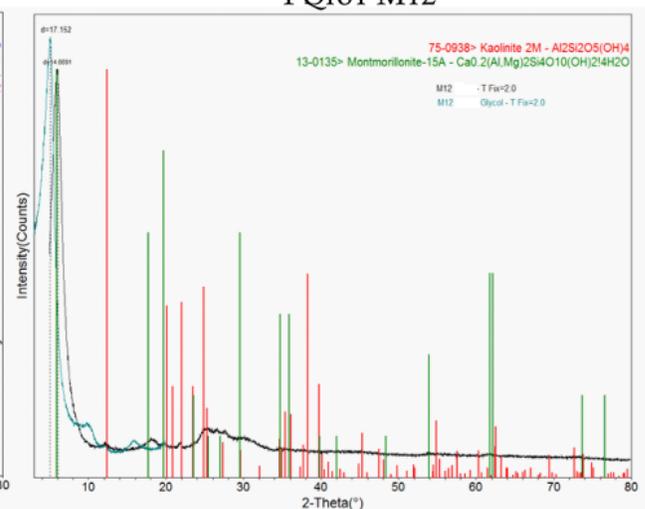
PQro1 M10



PQro1 M11

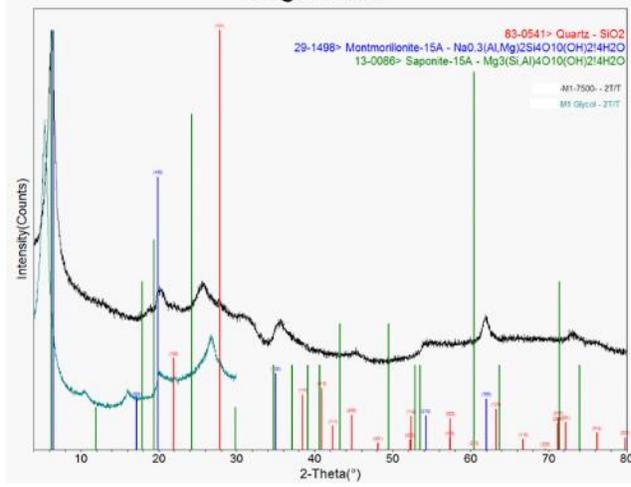


PQro1 M12

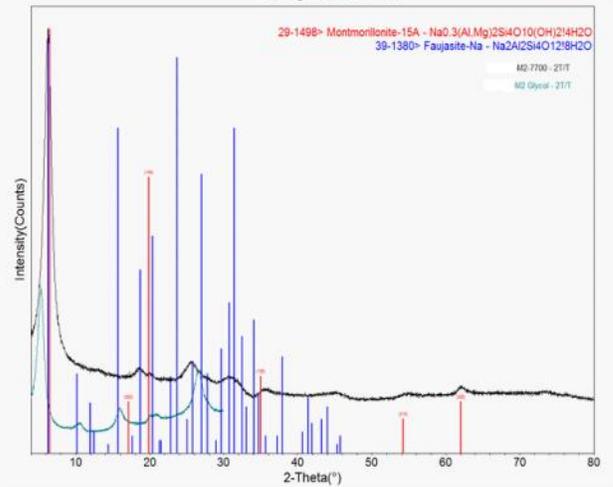


A.5.2. Difractogramas del pozo PQro2

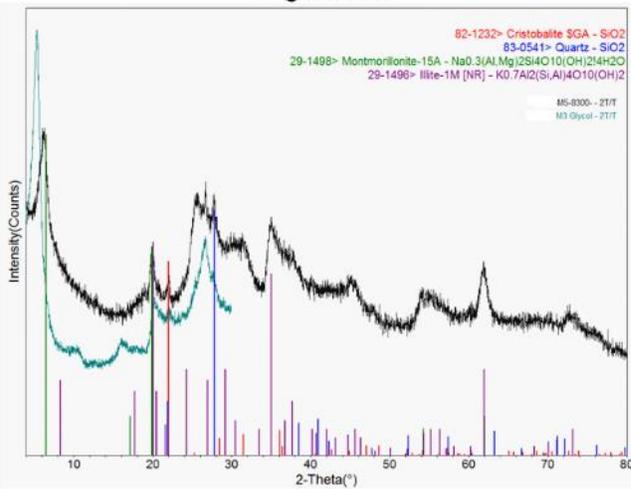
PQro2 M1



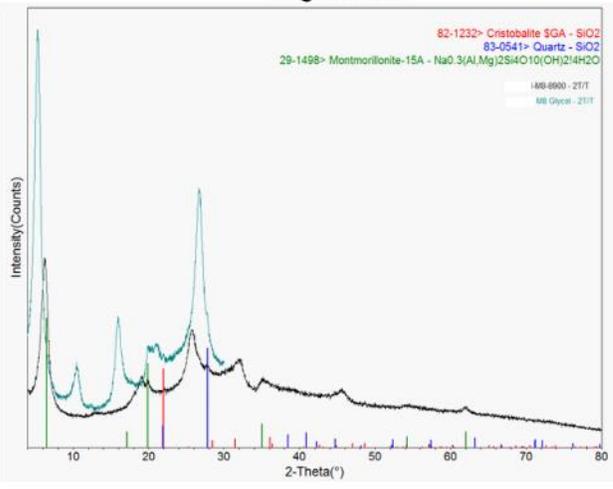
PQro2 M2



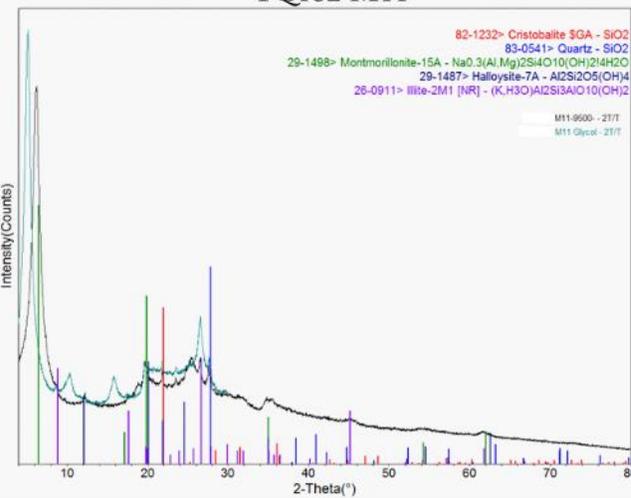
PQro2 M5



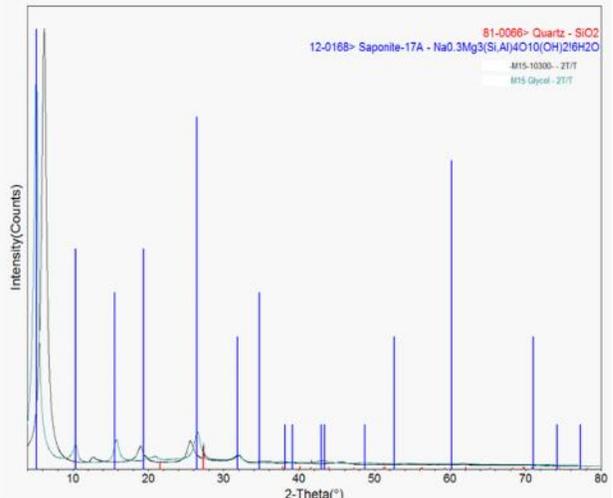
PQro2 M8



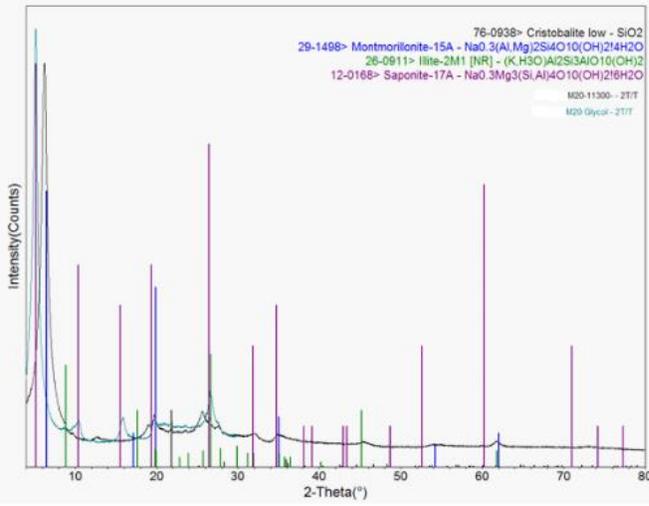
PQro2 M11



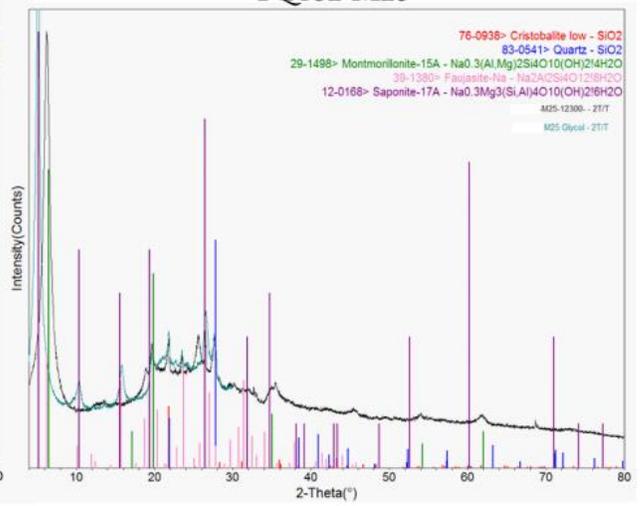
PQro2 M15



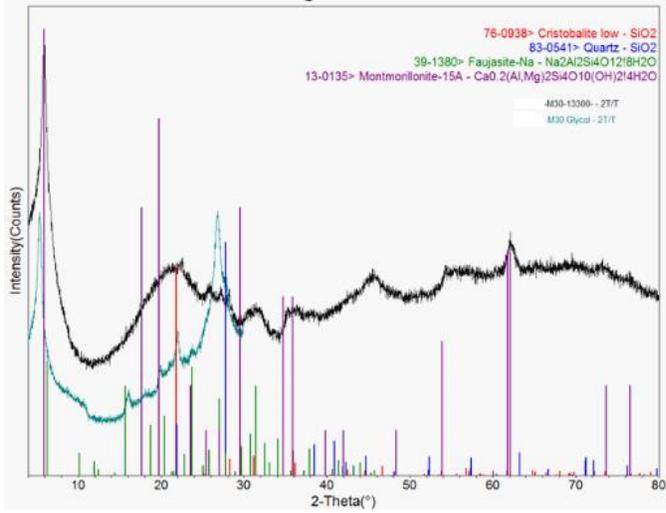
PQro2 M20



PQro2 M25



PQro2 M30



PQro2 M34

