



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
MÉXICO**

**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza**

Arqueoedafología de rellenos de los  
suelos/sedimentos y tecnosoles de la Ciudadela, en  
Teotihuacán, México  
(Proyecto Tlalocan)

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**B I Ó L O G A**

PRESENTA

**BEATRIZ STEPHANIE FERNÁNDEZ GALÁN**

Directora de Tesis

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

**México, D.F. 2013**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

El Dios Tlaloc residía en un gran palacio, con cuatro aposentos, y en medio de la casa había un patio con cuatro enormes barreños llenos de agua. El primero es el del agua que llueve a su tiempo y fecundiza la tierra para que dé buenos frutos. El segundo es el del agua que hace anublarse las nieves y perderse los frutos. El tercero es el del agua que hace helar y secar las plantas. El cuarto es el del agua que produce la sequía y la esterilidad. Tiene el Dios a su servicio muchos ministros, pequeños de cuerpo, los cuales moran en cada uno de los aposentos, cada uno según su color, pues son azules como el cielo, blancos, amarillos o rojos. Ellos, con grandes regaderas y con palos en las manos van a regar sobre la tierra, cuando el supremo Dios de la lluvia lo ordena. Y cuando truena, es que resquebrajan su cántaro, y si algún rayo cae, es que un fragmento de la vasija rota viene sobre la tierra.

Épica Náhuatl.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM) por todos los años que me brindo una excelente educación universitaria a través de docentes entregados a su enseñanza y sobre todo con una gran calidad humana. Una de las personas que forma parte de esta Universidad es el Dr. Efraín R. Ángeles Cervantes, quien me ha apoyado como amigo y como profesor me hizo ser más independiente y no darme por vencida en mis proyectos de investigación. Gracias a él conocí a la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena del Colegio de Postgraduados quién me proporcionó las herramientas para analizar el suelo e interpretarlo para conocer una parte de la historia que guardaba sobre la civilización teotihuacana y así realizar esta tesis que ha sido uno de los logros más satisfactorios de mi vida ya que me permitió conocer lo que es trabajar bajo presión, recorrer largas distancias en tan solo un día y sobre todo disciplinarme para investigar en uno de los proyectos más interesantes de la arqueología mexicana, el proyecto Tlalocan, Camino bajo la Tierra, a cargo del Arqueólogo Sergio Gómez Chávez a quien le agradezco la oportunidad de haber colaborado en su equipo de trabajo .

También quiero agradecer a la Dra. Emily McClung de Tapia del Instituto de Investigaciones Antropológicas quién sin conocerme me brindó su apoyo y confianza para realizar los análisis polínicos en el laboratorio de paleoetnobotánica donde conocí a la M. en A. diana Martínez, M. en C. Cristina Adriano y al M. en C. Emilio Ibarra, quienes me asesoraron en diversos aspectos arqueológicos, me apoyaron, confiaron en mí y ahora me llevo una bonita amistad.

Para realizar mis análisis de suelos conté con el apoyo del laboratorio de génesis de suelos del Colegio de Postgraduados, integrado por el M en C. Patricio Guzmán y el M en C. Enrique Suasteguí, por lo que les agradezco el tiempo invertido para esta investigación.

Agradezco las observaciones y correcciones de mis sinodales el M. en C. Manuel Rico Bernal, Dra Rosalva García y el Biol. Juan Manuel Valderrabano .

Finalmente quiero agradecer a Luis Alberto Acosta Tovar por cada momento maravilloso que he vivido con él y por estar conmigo en la adversidad (PyP43). A mis grandes amigos, la Biol. Elizabeth González Montiel por su amistad, cariño y apoyo, Lic. Gina Kruczynski por ser una gran estratega y confidente, Roy por acompañarme en los momentos trascendentes sin importar la distancia y horario, al Dr. Arcadio Monroy Ata por mostrarme nuevos horizontes y a Pher porque hace un año me reanimaste cuando todo parecía ir no tan bien y ahora eres muy especial para mí.



G R A C I A S

## DEDICATORIA



Con amor, esfuerzo y gozo para J.N

Para mi familia

Mi Papá Gabriel Fernández Saucedo por inculcarme el interés en la Ciencia, forjar mi carácter y por su amor.

A mi mamá Ma. Dolores Galán por sus cuidados y por haberme hecho una persona con valores, gracias mamá se que aún me falta mucho por conocerte.

Sharon I. Fernández Galán por ser mi amiga sanguínea, mi cómplice de travesuras, de secretos y adversidades.

Gabriel Fernández Galán por ese recuerdo azul que aún conservo y que influyó en mi interés por la naturaleza, nos vemos cuando sea el momento.

Beatriz G. y Javier G. por su amor y apoyo en mi educación a lo largo de mi vida.

*Stephanie.*

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÍNDICE DE CUADROS .....</b>                             | <b>7</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                               | <b>1</b>  |
| <b>2. MARCO TEORÍCO.....</b>                               | <b>3</b>  |
| 2.1 TEOTIHUACÁN COMO CIUDAD .....                          | 3         |
| 2.2 DEFINICIÓN DE SUELO .....                              | 4         |
| 2.3 TIPOS DE SUELO .....                                   | 4         |
| <b>2.4 MICROMORFOLOGÍA .....</b>                           | <b>8</b>  |
| 2.5 MINERALES .....  | 9         |
| 2.6 <i>POLEN</i> .....                                     | 11        |
| <b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>                               | <b>11</b> |
| <b>4. HIPOTESIS.....</b>                                   | <b>12</b> |
| <b>4.1 HIPOTESIS PARTICULARES .....</b>                    | <b>12</b> |
| <b>5. OBJETIVOS .....</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>6. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                       | <b>17</b> |
| 6.1. ZONA DE ESTUDIO .....                                 | 13        |
| <b>6.2. TRABAJO DE CAMPO .....</b>                         | <b>17</b> |
| <b>6.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO .....</b>                  | <b>19</b> |
| <b>6.4. EXTRACCIÓN POLÍNICA .....</b>                      | <b>21</b> |
| <b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                     | <b>23</b> |
| 7.1. CERRO GORDO.....                                      | 23        |
| <b>7.2. INTERIOR DEL TÚNEL .....</b>                       | <b>31</b> |
| 7.2.1. <i>A 3 m del interior del túnel .....</i>           | <i>31</i> |
| 7.2.2. <i>13 metros al interior del túnel .....</i>        | <i>46</i> |
| 7.2.3. <i>20 m al interior del túnel .....</i>             | <i>47</i> |
| 7.2.4. <i>25 m al interior del Túnel .....</i>             | <i>47</i> |
| 7.2.5. <i>Resumen de los rasgos micromorfológicos.....</i> | <i>49</i> |
| 7.3. CIUDADELA.....  | 51        |
| <b>8. ANÁLISIS POLÍNICO .....</b>                          | <b>57</b> |
| 8.1. BOSQUE DE ENCINO UBICADOS EN CERRO GORDO. ....        | 57        |
| 8.2 INTERIOR DEL TÚNEL TLALOCAN .....                      | 58        |
| <b>10. CONCLUSIONES .....</b>                              | <b>64</b> |
| <b>11. LITERATURA CITADA.....</b>                          | <b>65</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Microestructura y rasgos de los suelos. Faeozems. A) Granular, B) bloques subangulares; C) Bloques angulares. Vertisoles, D) fabrica-b estriada y E) grano estriadas; Fluvisoles, F) estructura laminar.....   | 9  |
| Figura 2. Ubicación de la zona de estudio .....  | 13 |
| Figura 3. Relicto de Bosque en Cerro Gordo en el Edo. de México. ....  | 14 |
| Figura 4. Túnel de excavación del proyecto Tlalocan.(Foto cortesía del INAH para El periódico El Universal).....   | 18 |
| Figura 5. Diagrama de flujo de la Técnica de extracción polínica (Ibarra, 2011).....   | 22 |
| Figura 6. A) Perfil de Cerro Gordo; B) imágenes en luz plana se observa una estructura de bloques subangulares y migajosa; C) luz cruzada donde se observa una fábrica indiferenciada, con más del 5% de vidrio volcánico.....   | 24 |
| Figura 7. Relleno con diferente tipo de materiales en el interior del túnel a 3 m de distancia. ....   | 31 |
| Figura 8. A) Acercamiento del suelo 2; B) Estructura del suelo donde predominan los agregados granulares y bloques subangulares de 0.5 a 1 cm de diámetro; (40%); material suelto (60%). ....  | 32 |
| Figura 9. Minerales; A=olivino; B=hornablenda; C=hiperstena D=feldespatos; E y F=magnetita = Gy H=vidrios volcánicos ácidos; I e J= vidrios volcánicos básicos.....  | 39 |
| Figura 10 Material suelto de los sedimentos 9 y 10. ....   | 43 |
| Figura 11. Acercamiento de los sedimentos 9, 10, 11, 12 y 13.....  | 44 |
| Figura 12. Secciones delgadas de los suelos, rellenos y sedimentos del interior del Túnel. (10) muestra con sedimentos, agregados y Andosol; (11) muestra con sedimentos, agregados y Luvisol; (12) muestra con sedimentos y agregados, Andosol, l= cerámica; (13) muestra con sedimento y agregados, Luvisol, tepetate con carbonatos. ....                                 | 45 |
| Figura 13. Corte 13 donde se encuentra el tiro vertical de 0.83m de diámetro descubierto en el 2003, frente al Templo de la Serpiente Emplumada. ....  | 46 |
| Figura 14. Corte 25 m indicando el punto de toma de muestras y su numeración.....  | 47 |
| Figura 15. Corte en el metro 25, indicando el punto de toma de muestras y su numeración.....   | 48 |
| Figura 16. Rasgos micromorfológico; A= Sedimento; B= Sedimento con agregados; C=Luvisol; D=Tepetate con carbonatos. Lp= luz polarizada; Lpc= Luz polarizada cruzada. ....  | 51 |
| Figura 17. Cala del exterior de la Ciudadela. ....   | 53 |
| Figura 18. . Secciones delgadas de los suelos, rellenos y sedimentos de las muestras 27,28,29 y 30 ubicadas en la Ciudadela. (27) muestra con sedimentos, agregados y vertisol; (28) muestra con sedimentos, agregados y Luvisol; (29) muestra con sedimentos, agregados y luvisol; (30) muestra con sedimento y agregados, Luvisol, tepetate con carbonatos y Andosol. .... | 54 |
| Figura 19. Cala en el exterior del Túnel con -2 metros de profundidad.....   | 55 |
| Figura 20. Porcentaje polínico del perfil de Cerro Gordo. ....   | 58 |
| Figura 21. Porcentaje de los granos de polen encontrados en el interior del túnel .....  | 59 |
| Figura 22. Polen; A= Betulaceae 100X; B= <i>Cupressus</i> 100X; C=Cyperaceae 100X; D= <i>Pinus</i> 40X; E= <i>Quercus</i> 100X ; F= <i>Populus</i> 100X; G=Fabaceae(poliada) 100X;I=Cheno-am 40X; J=Poaceae (3 granos) 100X.....   | 61 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| Cuadro 1. Número de muestras colectadas y puntos de muestreo.....  | 19 |
| Cuadro 2. Descripción del perfil de Cerro Gordo .....  | 25 |
| Cuadro 3. Propiedades química del suelo de Cerro Gordo. ....   | 27 |
| Cuadro 4. Análisis químico de Ditionito y Oxalato .....  | 27 |
| Cuadro 5. Propiedades físicas del suelo de Cerro Gordo. ....   | 28 |
| Cuadro 6. Elementos fabrica del perfil de Cerro Gordo.....   | 28 |
| Cuadro 7. Propiedades químicas y físicas de los suelos, sedimentos y tepetates del interior del túnel. ....                      | 33 |
| Cuadro 8. Propiedades químicas de los suelos, sedimentos y tepetates a 3 m del interior del túnel. ....                          | 33 |
| Cuadro 9. Elementos fabrica de los suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada (3 m). ....                            | 34 |
| Cuadro 10. Análisis mineralógico de los suelos y sedimentos a 3 m del interior del túnel. ....                                   | 37 |
| Cuadro 11. Análisis de Oxalato ácido de los suelos y sedimentos del interior del túnel (corte 13, 20 y 25m .....                 | 49 |
| Cuadro 12. Porcentaje del tipo de suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada del relleno del interior del túnel..... | 50 |
| Cuadro 13. Porcentaje del tipo de suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada de la Ciudadela. ....                   | 56 |
| Cuadro 14. Elementos fábrica de los suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada.....                                  | 56 |
| Cuadro 15. Numero de granos polínicos encontrados en el perfil de Cerro Gordo. ....  | 57 |
| Cuadro 16. Ubicación de los granos del polen a lo largo del túnel Tlalocan. ....   | 58 |

## RESUMEN

Las torrenciales lluvias del 2003, dejaron al descubierto una oquedad, la cual conduce a un túnel que tiene 12m de profundidad y aproximadamente 130m de largo alcanzando el centro de la pirámide de Quetzalcóatl, en Teotihuacán. La construcción de túneles por los Teotihuacáanos era una práctica común. Este túnel fue relleno por los Teotihuacáanos con diferentes materiales (suelos y tepetates), durante la fase Patlachique y sellado finalmente por sedimentos aluviales, por lo que representa una cápsula de tiempo. Los objetivos fueron: 1) Determinar el tipo de suelos o materiales que utilizaron para el relleno del túnel de acuerdo con sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas, micromorfológicos y 2) Determinar, a través del análisis de polen, el tipo de vegetación que rodeaba a la Ciudad de Teotihuacán en las primeras fases de su desarrollo. Se tomaron muestras alteradas e inalteradas de suelo-sedimento a lo largo y ancho del túnel (RT), así como en los suelos de la plaza Ciudadela y bajo el Bosque de encino del Cerro Gordo. Los resultados mostraron que los Teotihuacáanos utilizaron un suelo, que reúne las características de un Andosol Utrico, en las primeras fases del relleno; posteriormente utilizaron diversos materiales como sedimentos aluviales. El túnel presentó dos tipos de sedimentos: con arenas y agregados del suelo y de arenas. El Andosol ahora solo se encuentra en las partes altas del cerro gordo y sus agregados y propiedades edáficas son similares con la del relleno del túnel y de la plaza de la ciudadela, y de los agregados presentes en los sedimentos. El análisis polínico mostró similitud en la abundancia de polen de pino (*Pinus*), encino (*Quercus*) y gramíneas en las muestras de Cerro Gordo y las del RT. Se concluye que en las primeras fases de desarrollo, los Teotihuacáanos vivieron en una zona donde el bosque de pino y encino debió de estar cerca de la ciudad y sustentaba un suelo muy frágil como es el Andosol, el cual ya presentaba erosión hídrica. En la actualidad este suelo prácticamente ha desaparecido como resultado de una intensa degradación del ambiente.

## 1. INTRODUCCIÓN

La construcción de túneles para los Teotihuacáanos era una práctica común. Se han descubierto túneles en la Pirámide del Sol, en la Pirámide de la luna (Sugiyama y Cabrera, 2003; Sugiyama, 2004), y en la pirámide de la serpiente emplumada. El túnel de la pirámide del sol se descubrió en 1973, y su estudio ayudó a comprender mejor su ubicación (Heyden, 1973; Millon, 1981), el uso de dos sistemas calendáricos (Drucker, 1977; citado en Millon, 1992; Malstrom citado en Galindo, 1994) y su significado cosmológico (Millon, 1992); sin embargo, no fue posible determinar la época de su construcción y el uso que tuvo durante su funcionamiento.

Como parte de los trabajos del Proyecto de Investigación y Conservación del Templo de la Serpiente Emplumada (por sus siglas PICTSE), en 2003 se descubrió un túnel de manera casuística perteneciente a las primeras fases de Teotihuacán, pues su construcción se remonta por lo menos a la fase Patlachique (200 A.C). Este túnel se ubica en la Ciudadela, tiene 12 m de profundidad y aproximadamente 130 m de largo, alcanzando el centro de la pirámide de la serpiente emplumada y está relleno por diferentes materiales, además de una gran cantidad de artefactos (Gómez, 2010).

Esto originó que la nueva excavación se realizara de manera detallada y sistemática de este nuevo elemento (subproyecto Tlalocan, liderado por el Arq. Sergio Gómez Chávez), donde están participando expertos en diferentes áreas del conocimiento. Por las características del túnel se espera que este proyecto aporte información trascendental del pensamiento, disposición particular de los principales edificios, en especial de La Ciudadela, la traza urbana en general, ideología y grupos de poder, además del ambiente (suelo-vegetación) que rodeaba a la ciudad.

El relleno del túnel con diferentes materiales (suelos y tepetates) representa una cápsula de tiempo en donde se puede determinar el tipo de suelos que rodeaban a la ciudad de Teotihuacán al inicio de su construcción (aparentemente en el año 225 d.C, cuando se construyó la pirámide de la serpiente emplumada o bien durante la construcción de la ciudadela (Matos, 1990). Asimismo, se puede determinar el origen de los sedimentos (si son de una o varias fuentes), ya que aparentemente el proceso de arrastre de materiales ocurrió durante el periodo de los Teotihuacanos.

Con el estudio de estos rellenos se pretende establecer el impacto de las prácticas antropógenicas en el ambiente, sobre todo degradación, debido a que la extracción de madera y otros materiales era una práctica común por los Teotihuacáños (Barba y Córdova, 2010; Sedov *et al.*, 2012), lo cual provoca inestabilidad de los suelos al removerles la cubierta vegetal.

El estudio de los rellenos en túneles no es reciente, ya que desde 1998 durante las excavaciones realizadas en la Pirámide de la Luna, dejaron al descubierto los materiales que fueron utilizados como relleno en cada uno de los edificios que se encuentran en el interior de la pirámide (Sugiyama y Cabrera, 2003; Sugiyama 2004). Uno de los materiales encontrados es un suelo o sedimento limo arcilloso, suelto o formando adobes (Murakami 2007). Esos sedimentos encontrados al interior de la estructura son reconocidos como el horizonte cultivado o Ap, que fuera removido de las áreas circunvecinas a la ciudad por los antiguos constructores para formar parte del monumento sagrado en sus distintas etapas constructivas. Barba (1995) plantea que hubo extracciones de suelos en grandes extensiones cercanas a la ciudad, por lo que actualmente la zona carece de horizonte superficial, presentándose sólo un tepetate en la superficie. Sin embargo, este solo hecho no es prueba de que hubo extracción solo de suelos pues la presencia del tepetate en la superficie puede estar relacionada con erosión por otras actividades naturales o inducidas por la remoción vegetal.

Por otra parte, los estudios de las propiedades edáficas, de sedimentos y del polen han sido utilizados por varios autores para determinar el impacto de las actividades antrópicas en el ambiente. Algunos ejemplo son los realizados en Michoacán (Fisher *et al.*, 2003), en Yucatán y Guatemala (Beach *et al.*, 2006) y Tlaxcala ( Borejsza *et al.*, 2008) ; sin embargo, pocos estudios en México han empleado a la micromorfología de suelos a pesar de que es una disciplina a nivel internacional que ha contribuido a generar conocimiento en los estudios arqueológicos de diversas culturas (Macphail y Goldberg, 2010), y en la identificación de rasgos antropogénicos (Adderley *et al.*, 2005).

## 2. MARCO TEORÍCO

### 2.1 Teotihuacán como ciudad

Teotihuacán quiere decir en nahuátl “lugar donde los hombres se convierten en dioses” y su inicio data en el 100 a.C. y alcanza su auge durante el Clásico temprano (250-400 d.C.) y fue el eje de la historia mesoamericana. Fue el centro de peregrinación por excelencia, el lugar donde se crearon el tiempo y los espacios sagrados, el arquetipo de ciudad civilizada (Manzanilla, 1993).

Entre 150 y 250 d.C. se construye la actual fachada de la Pirámide del Sol, se extiende la Calle de los Muertos y se inicia la construcción de la Ciudadela. La plataforma adosada de la Pirámide del Sol se terminó alrededor del 175 d.C.; mientras que el Templo de la Serpiente Emplumada en la Ciudadela fue concluido aproximadamente en 225 d.C. Millon señala que la inversión de energía en la construcción de las pirámides y la Ciudadela es una demostración notable del ejercicio de poder (Barba, 2012).

La ciudadela es un conjunto arquitectónico de Teotihuacán construido sobre una superficie de 160 000 m<sup>2</sup> en la que se ubican tres grandes áreas habitacionales de dieciocho basamentos piramidales, entre los cuales sobresale por su magnificencia el templo de Quetzalcóatl (Matos, 1990). Ha sido identificada como la sede del gobierno Teotihuacano o en términos más generales como centro administrativo de primer orden (Armillas, 1964). Marquina y Dosal reportan algunos entierros en este conjunto y se calcula que alrededor de 200 individuos fueron sacrificados al unísono con motivo de la construcción del templo. La mayoría de esqueletos de sexo masculino se considera que son guerreros; mientras que, los femeninos se consideran sacerdotisas y/o damas nobles de la elite (Cabrera *et al.*, 1991), y sus ajuares funerarios son de los más ricos, además de figurillas y orejeras de piedra verde, conchas marinas, navajas y figurillas de obsidiana entre otros. Por lo anterior, fueron saqueados en fases posteriores y no permite saber si existiría una tumba principal (Cabrera *et al.*, 1993).

Millon (1993) comenta que Teotihuacán se caracterizó por el desarrollo de un origen mítico centrado en la creencia de que el cosmos y el ciclo del tiempo presente comenzaron allí. Menciona que a partir del año 200 d.C. se definen los elementos de planificación urbana y la vida doméstica en conjuntos habitacionales multifamiliares. Después de la

construcción de las pirámides principales y de la Calle de los Muertos, la población abandonó el sector noroeste y se dispersó por el resto de la ciudad.

A partir del año 200 d.C. se definen los elementos de planificación urbana y la vida doméstica en conjuntos habitacionales multifamiliares. Después de la construcción de las pirámides principales y de la Calle de los Muertos, la población abandonó el sector noroeste y se dispersó por el resto de la ciudad. Millon (1993), coincide y comenta que Teotihuacán se caracterizó por el desarrollo de un origen mítico centrado en la creencia de que el cosmos y el ciclo del tiempo presente comenzaron allí.

## 2.2 Definición de suelo

El término suelo se deriva de la palabra *solum*, que significa piso o superficie de tierra. En general, el suelo se refiere a la superficie suelta de tierra que se distingue de la roca sólida (Foth y Turk, 1980). El Soil Survey Staff (2010), lo define como un cuerpo natural, constituido por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que ocurren en la superficie de la tierra y que ocupa un lugar en el espacio; además, se caracteriza por horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía o por la habilidad de soportar plantas enraizadas en un ambiente natural.

## 2.3 Tipos de Suelo

Los principales grupos de suelos que se han reportado para la región de Teotihuacán son: Phaeozems, Vertisoles, Cambisoles y Leptosoles (McClung *et al.*, 2003). En cuanto a su superficie, INEGI menciona que los suelos dominantes son Phaeozems (90.37%), Durisoles (2.41%), Leptosoles (1.3%) y Vertisoles (0.66%); mientras que la página oficial del Municipio de San Martín de las Pirámides menciona que los suelos predominantes son: Leptosoles (2.9%), Regosoles (7.5%), Phaeozemes (82.51%), Fluvisoles (0.65%) y Vertisoles (0.42%).

Sergey *et al.*, (2012) analizaron los pedosedimentos de Teotihuacán y reportaron la ocurrencia de un Vertisol Calcico y Fluvisoles fechados en 600 años d.C.

A continuación se describen las principales características de los suelos clasificados de acuerdo con la Base de Referencia Mundial de Suelos (WRB, 2006):

*a) Cambisoles*

Son suelos con formación de por lo menos un horizonte sub-superficial incipiente (Bw). La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos. FAO acuñó el nombre Cambisoles, adoptado de los suelos de Brasil. La Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos clasifica a la mayoría de estos suelos como Inceptisoles. Estos suelos presentan evidentes cambios en la estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato; se desarrollan a partir de diversos materiales parentales principalmente de textura media a fina derivados de un amplio rango de rocas. Los Cambisoles también abarcan suelos que no cumplen una o más características de diagnóstico de incluyendo los altamente meteorizados. Estos suelos se ubican en terrenos llanos a montañosos, en todos los climas y amplio rango de tipos de vegetación.

*b) Leptosoles*

Son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos; son azonales y particularmente comunes en regiones montañosas. Los Leptosoles incluyen los: Litosoles del Mapa de Suelos del Mundo (FAO–UNESCO, 1971–1981); subgrupos Lítico del orden Entisol (Estados Unidos de Norteamérica); Leptic Rudosols y Tenosols (Australia); y Petrozems y Litozems (Federación Rusa). En muchos sistemas nacionales, los Leptosoles sobre roca calcárea pertenecen a las Rendzinas, y aquellos sobre otras rocas, a los Rankers.

El material parental abarca varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 por ciento (en volumen) de tierra fina y generalmente, ocurren en tierras en altitud media o alta con topografía fuertemente disectada. Estos suelos se encuentran en todas las zonas climáticas (muchos de ellos en regiones secas cálidas o frías), en particular en áreas fuertemente erosionadas. Asimismo, los Leptosoles tienen roca continua en o muy cerca de la superficie o son extremadamente gravillosos y se pueden desarrollar a partir de material calcáreo meteorizado pueden tener un horizonte mólico.

*c) Phaeozems*

Son suelos de pastizales, relativamente húmedos y de regiones forestales en clima moderadamente continental. Son parecidos a los Chernozems y Kastanozems, pero están más intensamente lixiviados; además, tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus y en comparación con Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases. Los Phaeozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación de bases en el metro superior del suelo. Nombres usados comúnmente para los Phaeozems son: Brunizems (Argentina y Francia); Suelos gris oscuro de bosque y Chernozems lixiviados y podzolizados (antigua Unión Soviética); Tschernoseme (Alemania); Dusky-red prairie soils (antigua clasificación de Estados Unidos de Norteamérica); Udoles y Alboles (Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos); y Phaeozems (incluyendo la mayoría de los antiguos Greyzems) (FAO).

Estos suelos se desarrollan de materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), morenas glaciares y otros y se caracterizan por la presencia de un horizonte mólico (más delgado y en muchos suelos menos oscuro que en los Chernozems), y sobre yace a un horizonte cámbico o árgico. El horizonte mólico presenta más de 0.6 % de carbono orgánico, más de 50 % de saturación de bases, pH alcalinos, colores que varían de acuerdo con el contenido de carbonato de calcio, estructura de bloque subangulares, granulares a migajosos (Brady y Weil, 1999; Pape y Lager, 1995).

*d) Vertisoles*

Los Vertisoles son suelos muy arcillosos (más de 30%), con alta proporción de arcillas expandibles (esmeclitas); forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan, lo que ocurre en la mayoría de los años. El nombre Vertisoles (del latín *vertere*, dar vuelta) se refiere al reciclado interno constante del material de suelo. Nombres comunes locales para muchos Vertisoles son: suelos negros de algodón, regur (India), black turf soils (Sudáfrica), margalites (Indonesia), Vertosols (Australia), Vertissolos (Brasil), y Vertisoles (Estados Unidos de Norteamérica).

Se localizan principalmente en depresiones y áreas llanas u onduladas, de climas tropicales, subtropicales, semiárido a subhúmedo y húmedos con una alternancia clara de estación seca y húmeda. La vegetación clímax es sabana, pastizal natural y/o bosque.

En cuanto al desarrollo del perfil, la expansión y contracción alternada de arcillas expandibles resulta en grietas profundas en la estación seca, y formación de slickensides o caras de deslizamiento y agregados estructurales cuneiformes en el suelo subsuperficial. El microrelieve gilgai es peculiar de los Vertisoles aunque no se encuentra comúnmente.

#### *e) Tecnosoles*

Los Tecnosoles comprenden un nuevo orden en la WRB (2006) y combina suelos cuyas propiedades están originadas por su origen técnico. Contienen una cantidad significativa de artefactos (algo en el suelo reconociblemente hecho o extraído de la tierra por el hombre), o están sellados por roca dura técnica (material duro creado por el hombre, que tiene propiedades diferentes a la roca natural). Incluyen suelos de desechos (rellenos, lodos, escorias, escombros o desechos de minería y cenizas), pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, suelos con geo-membranas y suelos construidos en materiales hechos por el hombre.

Los Tecnosoles son frecuentemente referidos como suelos urbanos o de minas. Se reconocen en el nuevo sistema ruso de clasificación de suelos como Formaciones Tecnogénicas Superficiales. En cuanto al desarrollo del perfil generalmente no muestra ninguno, aunque en vaciaderos antiguos (e.g. escombros romanos) puede observarse evidencia de pedogénesis natural, tal como translocación de arcilla. Los depósitos de lignito y hollín con el tiempo pueden exhibir propiedades vítricas o ándicas (Zikeli, Kastler y Jahn, 2004; Zevenbergen *et al.*, 1999). El desarrollo original del perfil puede todavía estar presente en suelos naturales contaminados.

#### *f) Tepetates*

Tepetate es un término que tiene un amplio rango semántico en el uso popular y técnico, deriva del náhuatl *tepétatl*, vocablo compuesto por raíces *tet* que significa piedra y *pétlatl*, petate. Literalmente se le ha traducido como “petate de piedra”, parecido a piedra o “roca suave”. Para los aztecas, este término estaba contenido en su clasificación de

materiales y representaba el taxón de un tipo de suelo agrícola difícil de labrar (Gibson, 1996). En contraste, al arribo de los españoles, el término tepetate fue sinónimo de suelo no agrícola, por su baja calidad (Ortiz- Solorio, 1999, citado por Gama-Castro *et al.*, 2007).

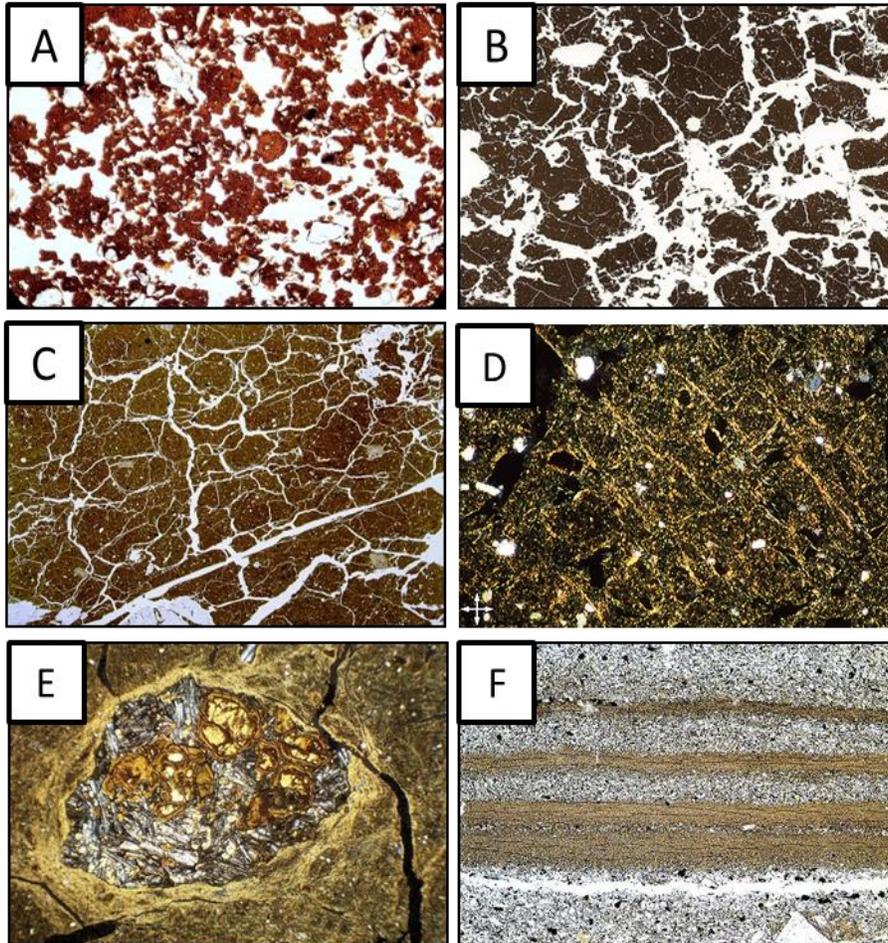
Los tepetates también se clasifican por su color en rojos, grises y blancos. Los rojos son tobas andesíticas vítricas (Rodríguez *et al.*, 1999) o bien son clasificados como Paleosuelos. Los tepetates con alto contenido de carbonato de calcio se ubican en la parte superior de la toba (Gutiérrez-Castorena y Ortiz Solorio, 1992), después de que el suelo se ha erosionado. Al parecer se formaron por un cambio de clima más drástico, de clima húmedo a árido o semiárido.

#### **2.4 Micromorfología**

El estudio de la micromorfología del suelo se basa en el análisis de secciones delgadas preparadas a partir de muestras no alteradas del suelo y es un método que se utiliza actualmente para evaluar efectos que tienen diversos factores ecológicos (fauna, lluvia, fuego, cultivos, sequías.) sobre las propiedades del suelo (Vera *et al.*, 2007). Aunque históricamente la micromorfología está estrechamente relacionada con la génesis del suelo, su aplicación se ha incrementado en otras áreas, las cuales incluyen a la física, química, biología y bioquímica del suelo (Bullock *et al.*, 1985). No sólo en la agricultura su uso es amplio, sino que su utilidad empieza a apreciarse en la arqueología, ecología, geología y mecánica de suelos (Stoops y Mees 2010).

De acuerdo con Stoops (2003), cada tipo de suelo se caracteriza por una serie de rasgos como resultado de los procesos pedogenéticos que en ellos ocurren. Los Phaeozems se caracterizan por la presencia de agregados granulares (Figura 1a) en la superficie como consecuencia de la actividad biológica (pastos y lombrices) y bloques subangulares (Figura 1b) con una gran cantidad de restos de raíces de pastos y también presentan bloques angulares (Figura 1c). Los Vertisoles presentan fabricas vérticas (Figura 2d) como resultado de la expansión y contracción de las arcillas, de ahí que ocurran superficies de fabricas-b estriadas, y grano y poros estriadas (Figura e). Los Cambisoles (Figura 3) presentan desarrollo de estructura edáfica pero con restos del material que le dio origen, como distribución en bandas de los depósitos lacustres o aluviales. Finalmente, los Fluvisoles presentan distribuciones básicas en bandas como resultado de la depositación de

los materiales lacustres o aluviales en donde su diferencia es el tamaño de las partículas: arcillas y limos en los primeros (Figura 4) y arenas y limos en los segundos, además los sedimentos lacustres presentan una fabrica-b paralela.



**Figura 1. Microestructura y rasgos de los suelos. Faeozems. A) Granular, B) bloques subangulares; C) Bloques angulares. Vertisoles, D) fabrica-b estriada y E) grano estriadas; Fluvisoles, F) estructura laminar.**

## 2.5 Minerales

Los sedimentos pueden estar constituidos por un solo tipo de material o de varios materiales parentales. La identificación de cada mineral permite determinar el origen de los sedimentos; además de su ambiente de formación y tipo de transporte. A continuación se describen los minerales característicos en una zona de origen (Rodríguez Tapia, 1999).

a) *Vidrio*: el vidrio volcánico se define como un silicato líquido súper-enfriado, con una estructura poco ordenada formada por cadenas de  $\text{SiO}_4$ , sin cohesión y con considerable

espacio intermolecular. El desorden de su estructura permite que su disolución ocurra en mucha mayor magnitud respecto a la de los cristales. En sus poros hay agua intersticial que favorece su desintegración; en este proceso pierde parte de sus elementos químicos que al precipitar forman minerales secundarios autógenos que reemplazan las partículas de vidrio y rellenan el espacio poroso creado por su misma disolución. En las rocas piroclásticas, el vidrio presenta un amplio rango de estabilidad y composición intermedia (andesítica), se presentan vidrio volcánico ácido y básico, denominado así por su contenido de silicio. En el vidrio ácido, perlita (obsidiana), la alteración de éstos se caracteriza por la formación de curvas concéntricas (fracturas perlíticas), que resultan de la expansión del vidrio cuando éste se hidrata y no del enfriamiento rápido en la superficie de la corteza terrestre como se pensaba.

b) *Olivino* Es una serie mineral ferromagnesiana cuya composición es variable, e incluye a los silicatos de magnesio puro (forsterita), de fierro y magnesio (crisolita) y el silicato de hierro (fayalita). La serie del olivino se forma a partir del magma, a temperaturas superiores a 500°C y favorece, más que otros minerales ferromagnesianos, a la movilización de la sílice. Los productos de su alteración son hidróxidos de fierro, goethita, clorita e iddingsita.

c) *Hornablenda*: Es un anfíbol aluminico que se forma a temperaturas intermedias, contiene generalmente alúmina o hierro férrico ó ferroso, manganeso, calcio y álcalis. Su principal característica es su crucero en ángulos de 56° y 124°.

d) *Hiperstena*: Es un mineral del grupo de los piroxenos que se forma a temperatura intermedia, menor que la de la formación de los anfíboles. Su composición es compleja, es un silicato de calcio, sodio, magnesio, fierro, aluminio o titanio, en donde los cationes se pueden presentar solos o combinados. El contenido de Fe es mayor de 15% y en algunas ocasiones presenta alúmina en su composición, con contenidos mayores a 10%, y en esos casos es similar a un piroxeno aluminoso. Su característica distintiva es su crucero recto. Los principales productos de su alteración son ferrihidrita, goethita y hematita.

*e) Sílice (óxido de silicio):* Es el compuesto más abundante en la corteza terrestre, por lo que se encuentra en todos los tipos de roca a temperatura ambiente y magmáticas bajas que a temperaturas ambiente y a temperaturas magmáticas bajas se divide en dos grandes grupos: cristalino y amorfo. La sílice amorfa, desordenada, ha sido llamada con nombres diversos y ambiguos, que han provocado confusión. Estas variedades de sílice amorfa se forman a temperatura ambiente por la precipitación de la sílice coloidal del agua. Algunas de estas variedades son cristobalita  $\alpha$  y la tridimita  $\alpha$ , y aunque son raras, se representan en algunas rocas sedimentarias y suelos.

## **2.6 Polen**

El grano de polen o microgametófito en reposo de los espermatofitos (antófitos o fanerógamas) se origina en el saco polínico o microesporangio, como consecuencia de la meiosis de las células madres del polen desarrolladas a partir de la división reductiva (meyósporas). Son originariamente unicelulares y provistos de una cubierta recia o esporodermis, por divisiones sucesivas y características de cada grupo taxonómico de gran rango, se hace pluricelular en su interior (Sáenz, 1978).

Tanto el polen como las esporas necesitan ser dispersados por factores bióticos y abióticos para cumplir su función reproductiva. El estudio polínico no es nuevo ya que se ha utilizado desde la época de los años veinte y treinta del siglo pasado; sin embargo, dichos estudios se han enfocado principalmente en estudios taxonómicos, morfológicos y geológicos. El análisis del polen arqueológico es importante porque brinda información sobre el uso que le daban a las plantas los pueblos prehispánicos; por ejemplo, alimentación, rituales, medicinales y ofrendas (Ibarra & Fernández 2012).

## **3. JUSTIFICACIÓN**

Con el análisis de los rellenos del túnel se podrá identificar el suelo o los materiales que utilizaron los Teotihuacanos, hace aproximadamente 1800 años. Con estos datos se pretende conocer sus características y propiedades y relacionarlos con los suelos actuales. Además con el análisis polínico es posible determinar la vegetación que presentaba la región si los suelos eran forestales o tenían un uso agrícola, según el fechado de la cerámica hallada en el interior del túnel (Gómez, 2010).

#### 4. HIPOTESIS

Los suelos que rodeaban a la ciudad de Teotihuacán en las primeras fases estaban constituidos por Phaeozems, los cuales se erosionaron en la fase Patlachique. Los Vertisoles y Fluvisoles en las zonas bajas son suelos de origen aluvial de origen reciente por lo que no están relacionados con los rellenos.

##### 4.1 HIPOTESIS PARTICULARES

Los suelos que rodeaban a la Ciudad de Teotihuacán en las primeras fases de su desarrollo fueron utilizados como material de relleno en el túnel de la pirámide de Quetzalcóatl, por lo que deben de presentar propiedades edáficas y rasgos micromorfológicos similares.

Si el túnel bajo el templo de Quetzalcóatl fue rellenado por procesos de erosión natural entonces el polen arrastrado entre ellos establecerá la vegetación característica de las primeras fases de desarrollo de Teotihuacán.

Si los suelos de la Ciudadela son de origen natural, no deben presentar artefactos, ni roca dura dentro de los 5 cm de la superficie.

#### 5. OBJETIVOS

- ✚ Caracterizar los suelos relictos del Cerro Gordo para comparar sus propiedades con los suelos enterrados en el túnel de la pirámide de Quetzalcóatl.
- ✚ Caracterizar física, química, mineralógicamente los suelos de los rellenos del túnel del proyecto Tlalocan, así como de la Ciudadela; además de los rasgos micromorfológicos que caracterizan a cada unidad de suelo para determinar el tipo o tipos de suelos que rodeaban a la ciudad de Teotihuacán en las primeras fases de su desarrollo.
- ✚ Analizar los perfiles de suelos de la Ciudadela para determinar su origen.
- ✚ Estimar la vegetación característica de las primeras fases de la antigua ciudad de Teotihuacán a través de la determinación taxonómica del tipo de polen en el suelo del relleno.

### 6.1. Zona de estudio

San Juan Teotihuacán se encuentra en la porción central este de la Cuenca de México, ocupando un pequeño valle de altitud superior a 2,250 m tributario de la región de Texcoco (Figura 2); está limitado al oeste por el cerro de Chiconautla, al norte por el Cerro Gordo, al sur por el Cerro de Patlachique y al este por una serie de lomas que en conjunto con los dos cerros arriba mencionados corresponden a las estribaciones más boreales de la sierra Nevada (Mooser, 1968).

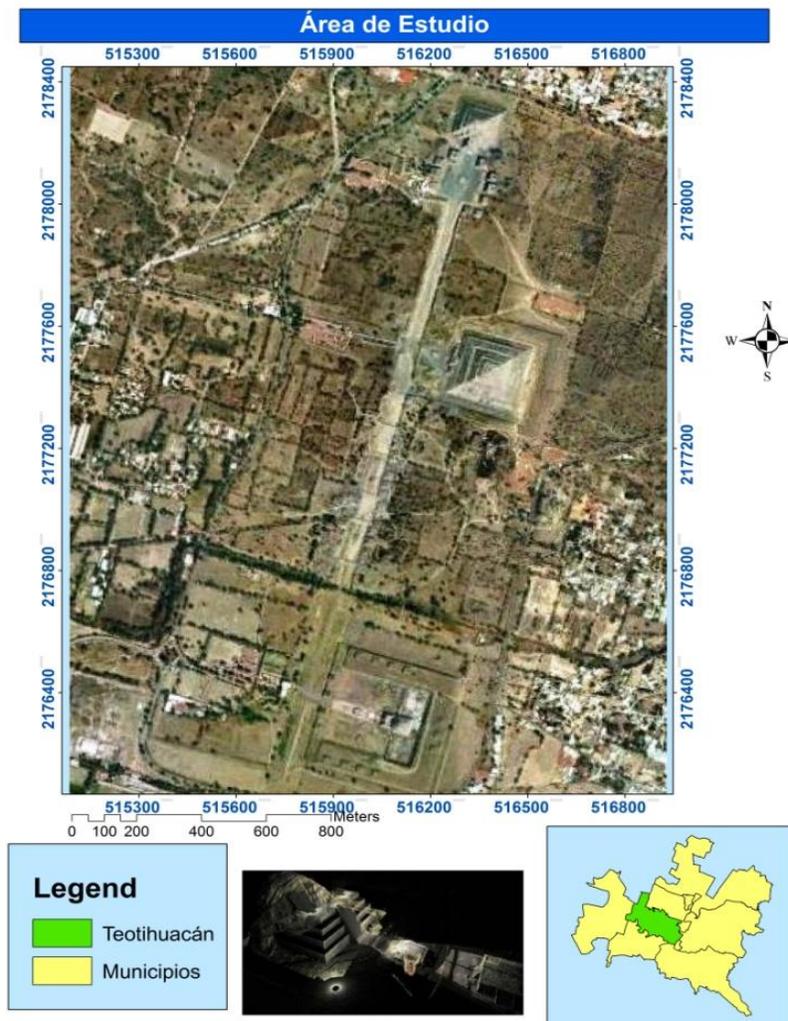


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio

La cima del Cerro Gordo se localiza en la comunidad de San Cristóbal Colhuacán y se ubica, a una elevación de 2964 msnm y cuyas coordenadas geográficas son las siguientes: 19°45'24.8" de latitud norte y 98°49'36.2" de longitud oeste. La vegetación corresponde a un bosque relicto de encino en el estrato arbóreo y diversidad de herbáceas y pasto en el estrato inferior (Figura 5). El material parental está compuesto por materiales piroclásticos y tobas volcánicas. Geomorfológicamente se define como un sitio donador pasivo, con una pendiente regular de 40% y con exposición al Nor-Noreste.



**Figura 3. Relicto de Bosque en Cerro Gordo en el Estado de México.**

*a) Geología*

Las prominencias que encierran el valle de Teotihuacán son todas de origen volcánico. Varían en edad desde el Terciario medio al Cuaternario y en composición van de obsidiana a basaltos; esto es, de rocas ácidas a básicas. Entre los elementos geológicos más antiguos figuran el cerro de Malinalco, situado al NW de San Juan Teotihuacán y las elevaciones al Este de Xometla, constituyendo aparatos volcánicos muy erosionados. Entre los elementos más jóvenes figuran las lavas sobre las que se elevan las pirámides y el extenso Malpaís al oriente de Otumba. El cerro Gordo, elevación máxima que domina el valle desde el norte, es un aparato volcánico de edad intermedia, activo desde el plioceno superior; abanicos aluviales bien desarrollados cubren sus faldas. El cerro Gordo constituye un estrato-volcán andesítico-básaltico, compuesto de lavas y escorias inter-estratificadas. El cerro de Patlachique, elevación prominente al sur de las pirámides, es un domo de lavas ácidas, láticas; pertenece también al Plioceno. El cerro Soltepec, del cual se derramaron las corrientes de obsidiana que afloran en la barranca de los Estetes, es un sitio de la primera industria Teotihuacána de navajas, estrato- volcán, igualmente pliocénico. Por último, la multitud de elevaciones menores que todavía conservan a forma de pequeños volcancitos, como los sitio de al norte de Santiago (Mooser, 1968).

*b) Hidrología*

El valle de Teotihuacán sufre de un estrechamiento que mide unos 1,500 m de ancho y se presenta entre los abanicos aluviales que descienden de la sierra de Patlachique y aquellos que bajan del cerro Malinalco. El estrechamiento divide al Valle de Teotihuacán en dos partes: los “altos”, planicie prácticamente sin drenaje. De esta forma las lluvias que caen en los altos fluyen en la parte de los tres ríos principales; el de San Juan, el de Huixulco y el de San Lorenzo, siendo este último el más caudaloso por originarse en las Sierras más elevadas y lluviosas. Al pasar por la angostura, se unen todos en uno que posteriormente se pierde en la planicie inferior pantanosa para dar finalmente en el Lago de Texcoco. Por otra parte, las aguas que se infiltran por las lavas permeables de los altos; por ejemplo, del Malpaís al norte del cerro de Soltepec, migran lentamente hacia el oeste y al llegar a la

angostura ya mencionada, afloran, originando numerosos y ricos manantiales entre San Juan y Puxtla.

Los suelos húmedos al pie del pedregal puede que hayan estado cubiertos por una franja de vegetación tupida, y aflorado, como consecuencia de la infiltración de lluvias en la zona boscosa del cerro Coronillas y algunos manantiales, que en total sumarían de 100L a 20 L/s. Es posible que también haya existido agua (nivel freático) en el fondo de ciertas cuevas profundas en la lava que sustenta la ciudad arqueológica. Por lo demás, puede decirse que en épocas de grandes lluvias, la planicie al sur del pedregal, en la que se unía los tres ríos, era propensa a inundaciones, ya que inmediatamente aguas abajo se situaba la angostura o estrechamiento, que siempre actuó como cuello de botella.

#### b) Edafología

Los principales grupos de suelos de la región son: Phaeozems, Vertisoles, Cambisoles y Leptosoles (McClung et al., 2003). El INEGI reporta Phaeozem (90.37%), Durisol (2.41%), Leptosol (1.3%) y Vertisol (0.66%) y la página oficial del Municipio de San Martín de las Pirámides menciona que los suelos predominantes del área son: Leptosoles (2.9%), Regosoles (7.5%), Feozems (82.51%), Fluvisoles (0.65%) y Vertisoles (0.42%).

#### c) Fauna

En la zona de estudio ocurren cacomixtle (*Bassariscus astutus*), zorrillo (*Spilogale angustifrom*), tuza (*Cratogeomys merriami*), ardilla (*Rattus vanidosus*), tlacuache (*Didelphis virginianus*), etc.; entre las aves: zopilote (*Coragyps atratus*), saltapared (*Troglodytes aedon*), colibrí (*Florisuga mellivora*), codorniz (*Coturnix coturnix*), tortola, calandria, ruiseñor (*Mimus polyglottos*), guajolote (*Meleagris gallopavo*), gallina (*Gallus gallus*) y palomas. Otras especies son: víbora de cascabel (*Crotalus durissus*), escorpión, lagartija (*Sceloporus grammicus*), sapo (*Bufo bufo*), chapulín (*Sphenarium purpurascens*), cigarra (*Cicada orni*), luciérnaga (*Lampyrus noctiluca*), hormiga roja (*Solenopsis saevissima*) y hormiga negra (*Camponotus mus*) de acuerdo con McClung (1976).

#### d) *Vegetación*

La vegetación actual es secundaria (Rzedowski *et al.*, 1964; Castilla y Tejero, 1987), también cambia de acuerdo con la altitud. Predomina el matorral xerófilo (hasta 2750 msnm), el matorral de encino (2800-3000 msnm) y pastizales (2400-3050 msnm). En las partes más altas de los cerros, en las vertientes opuestas al valle, se encuentra el bosque de encinos, que en el resto de las laderas ha sido reemplazado por cultivos de nopal.

Por medio de la arqueobotánica se han encontrado: *Phaseolus vulgaris* (fríjol; familia Leguminosae), *Phaseolus coccineus* (ayocote; familia Leguminosae) *Physalis sp.* tomatl, (tomate verde; familia Solanaceae) *Chenopodium sp.* (quelite, Huauhtzontli; familia Chenopodiaceae). *Amaranthus sp.* (Amaranto; familia, Amaranthaceae) *Opuntia spp.* (Nopal, tuna; familia Cactaceae), *Cucurbita sp.* (especie de calabaza), *Capsicum s.* (especies de chile), *Portulacca sp.* (verdolaga), *Prunus serotina* (capulín), *Cratageu* (tejocote) *Lagenaria síceraria* (tecomate: familia Cucurbitaceae). *Ficus sp.* (amatl, amate; familia Moraceae) *Gossypium sp.* (algodón, familia Malyaceae), según e-local, (2012).

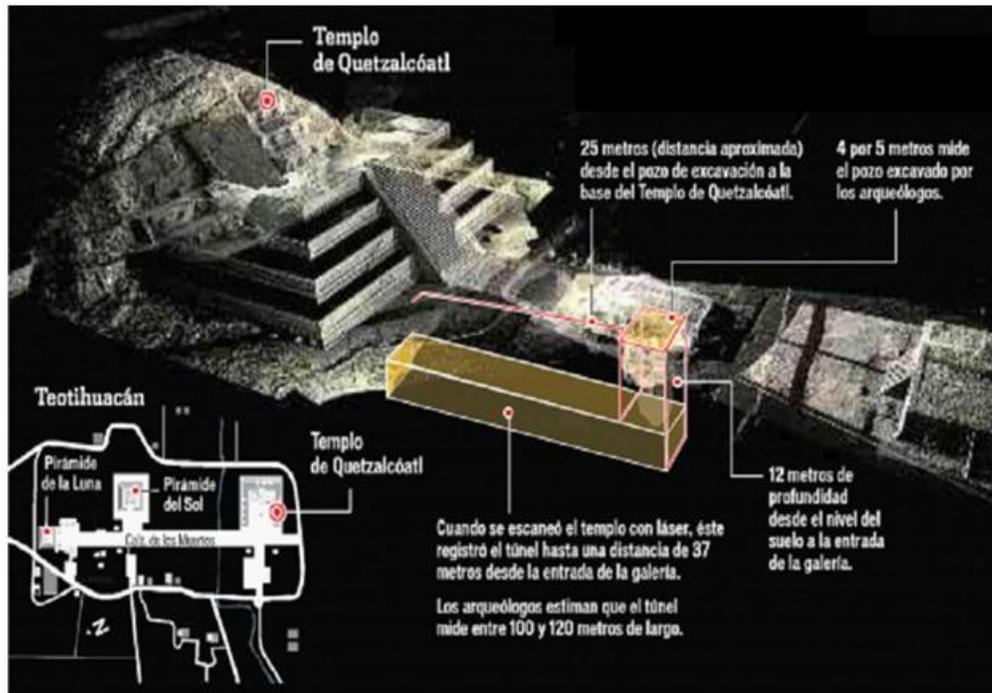
## MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en tres etapas.

- a) Reconocimiento de suelos. Se llevó a cabo un reconocimiento de los suelos relictos del área del Cerro Gordo, debido a que prácticamente todo el cerro presenta una degradación muy fuerte y los materiales parentales ya están aflorando a la superficie. Posteriormente, se hizo un pozo pedológico en lo más alto del cerro donde todavía se encontró vegetación de pino-encino. El suelo se describió con base en Cuanalo (1976).
- b) Descripción de suelos en la ciudadela. Tres perfiles de suelos se analizaron y se describieron en la ciudadela. Se colectaron muestras alteradas e inalteradas para su clasificación por cada capa u horizonte entre 1.50 y 2 m de profundidad

c) Calas en el interior del túnel. Se tomaron muestras alteradas e inalteradas del interior del túnel conforme avanzó la excavación y cuando se identificó que el relleno era diferente en textura, color, estructura, etc. por lo que la colecta de muestras varió. El primero se realizó en el metro 3, 13 y 25. En la Figura 3, se muestra los diferentes rellenos y sedimentos que se presentaron en un corte.



**Figura 4. Túnel de excavación del proyecto Tlalocan.(Foto cortesía del INAH para El periódico El Universal).**

Se colectaron muestras de suelo o rellenos de dos tipos:

a) *Muestras alteradas*

Se tomaron aproximadamente 2 Kg de muestra de suelo de cada capa u horizonte, además de muestras compuestas para determinar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de cada uno de los perfiles de la excavación, de los perfiles de suelos y de los rellenos. Cada muestra se guardó en bolsas de polietileno, bien identificada.

b) *Muestras inalteradas*

Las muestras inalteradas se colectaron con cajas de latón de 10x4x4 cm, donde se introdujeron lentamente en el suelo/sedimento/relleno. Posteriormente, se guardaron en una bolsa de polietileno y se cubrieron con cinta canela para evitar su alteración.

En el Cuadro 1, se reporta la zona de muestreo, el número de muestras colectadas y el tipo de análisis que se llevó a cabo.

**Cuadro 1. Número de muestras colectadas y puntos de muestreo.**

| ZONA               | Puntos de muestreo  |
|--------------------|---|
| Ciudadela          | 17, 18, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32               |
| Tipo de muestreo   | Muestras inalteradas  |
| Análisis           | Micromorfológico  |
| Interior del túnel | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20 |
| Tipo de muestreo   | Alteradas e inalteradas                                       |
| Análisis           | Micromorfológico, químico, físico y polínico                  |
| Cerro Gordo        | 33, 34, 35, 36, 37 y 38.                                      |
| Tipo de muestreo   | Alteradas e inalteradas,                                      |
| Análisis           | Micromorfológico, físico, químico y polínico.                 |

### 6.3. Análisis de laboratorio

#### a) *Análisis químicos y físicos*

Se determinaron las propiedades y características físicas y químicas de cada perfil para su clasificación, de acuerdo con el Manual de Procedimientos propuesto por Van Reeuwijk (1973). Los análisis efectuados fueron: pH en agua relación 1:1, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), los aniones y cationes solubles y en pasta de saturación los intercambiables, carbonatos equivalentes, fósforo soluble en ácido cítrico, porcentaje de saturación de bases (PSB) y los materiales amorfos fueron determinadas con oxalato ácido (ox) y ditionito citrato bicarbonato (dbc). Para el cálculo de las propiedades ándicas ( $Al + \frac{1}{2} \%Fe$ ) se utilizó la propuesta del Soil Survey Staff 1994. También se

determinó el color en seco y en húmedo empleando para ello la carta de colores Munsell y la densidad aparente con el método de la probeta.

*b) Análisis micromorfológico*

Las muestras inalteradas de suelos/sedimentos/rellenos fueron secadas al aire, bajo la sombra. El proceso de preparación de las láminas delgadas consistió en cuatro etapas y se basó en Murphy (1986):

1. Proceso de impregnación: Las muestras se secaron al aire durante 24 horas; luego se colocaron en un recipiente previamente cubierto con aluminio. Se le agregó una mezcla de resina HU543 y acetona, en una relación 1:1, después se añadieron unas gotas de catalizador y acelerador. Las muestras se colocaron en un aparato de impregnación con una presión de 25 a 27 pulgadas de mercurio por un tiempo 30 minutos. Finalmente, se colocaron las muestras en una estufa bajo un régimen de temperaturas que va de 30 °C por 12 h, 50 °C por 3 ó 4 h, 70 °C por 3 h, 90 °C por 2 h y 100 °C por 1 h.
2. Preparación de bloques. Una vez impregnadas las muestras con resina se cortaron en bloques de 50 x 80 mm; después los bloques se pulieron en una de sus superficies con una pulidora giratoria, utilizando lijas de óxido de aluminio y diamante cada vez más finos hasta obtener una superficie bien pulida.
3. Preparación de secciones delgadas. Para fijar las muestras de suelo en el portaobjetos, se usó la misma mezcla de resina con catalizador y acelerador que se utiliza en la impregnación. Se pulió la muestra hasta alcanzar un espesor de 30 micras aproximadamente; después, los pulimentos fueron cubiertos con un portaobjetos (Gutiérrez, 1988).
4. Descripción. Para la descripción de las secciones delgadas se utilizó el Manual para la descripción micromorfológica de suelos de Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003). Los rasgos que se describieron fueron el patrón de distribución relacionada, el tipo de agregados y poros; la masa basal (fabrica-b birrefringente), distribución relacionada (Enáulica existe un esqueleto de partículas gruesas con agregados de material fino en los espacios intersticiales. Los agregados no llenan completamente los espacios intersticiales, Gefúrica la matriz se representa como puentes entre miembros del

esqueleto pero no lo reviste completamente y Porfírica las grandes unidades de la fábrica se representan en una densa masa basal de unidades más pequeñas), los residuos orgánicos, y rasgos pedológicos en cada tipo suelo, sedimento y tepetates; además, de las especies minerales, su grado y patrones de alteración.

*c) Análisis mineralógico*

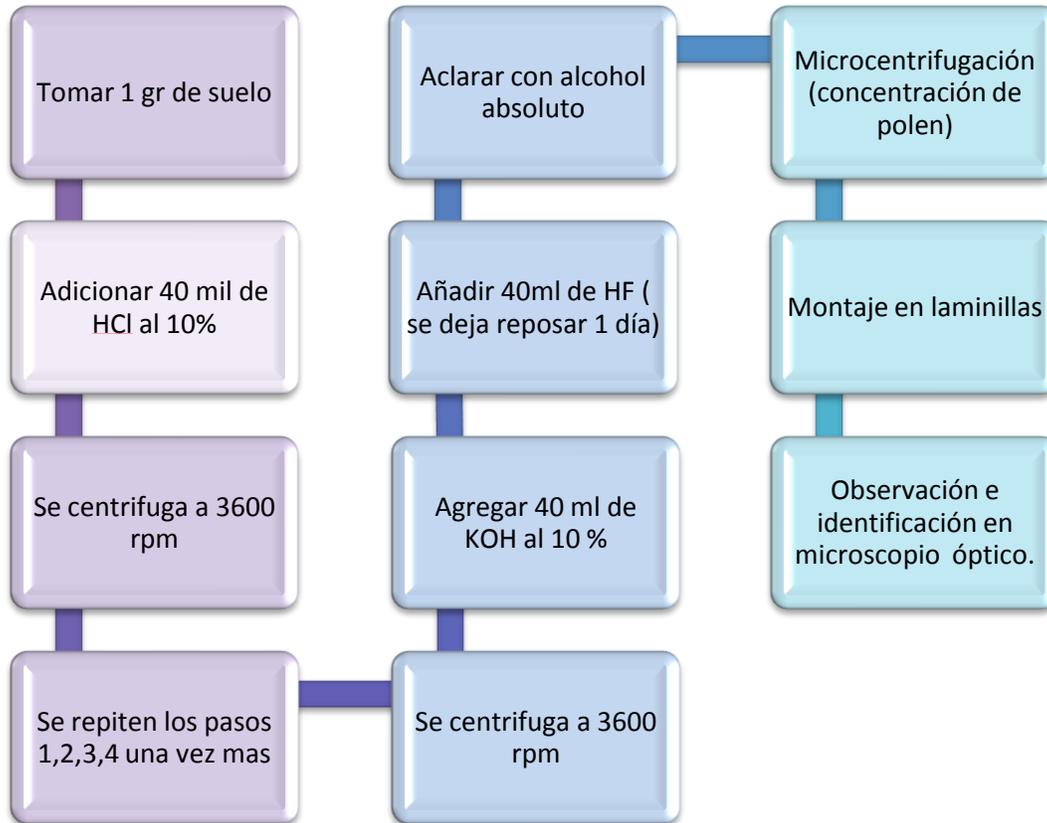
Se analizó la fracción gruesa en muestras alteradas e inalteradas para determinar la naturaleza del material de origen.

La fracción arena se determinó utilizando la metodología propuesta por Moreno (1985). Se pasó la fracción arena fina por tamiz de 150 (0.150mm) y la fracción gruesa resultante se separará con bromoformo (densidad de  $2.8 \text{ g cm}^{-3}$ ). La fracción ligera corresponde a los minerales que flotan y la fracción pesada es aquella que queda en el fondo del embudo de separación. Una vez separadas las fracciones anteriores, los minerales se identificaron y se determinaron los porcentajes de estos; para ello se empleó el método de conteo de puntos (contar 100 granos para cada fracción) propuesto por Stoops (1993).

Los minerales presentes en las secciones delgadas se describieron para determinar su grado de alteración y distribución.

#### **6.4. Extracción polínica**

La extracción del material polínico, en laboratorio (Figura 4), se realizó en muestras de sedimentos provenientes de contextos arqueológicos y para efectuarla se empleó una técnica física y química de limpieza con ácido clorhídrico y fluorhídrico, diseñada por Meringher y modificada por Ibarra (2011).



**Figura 5. Diagrama de flujo de la Técnica de extracción polínica (Ibarra, 2011).**

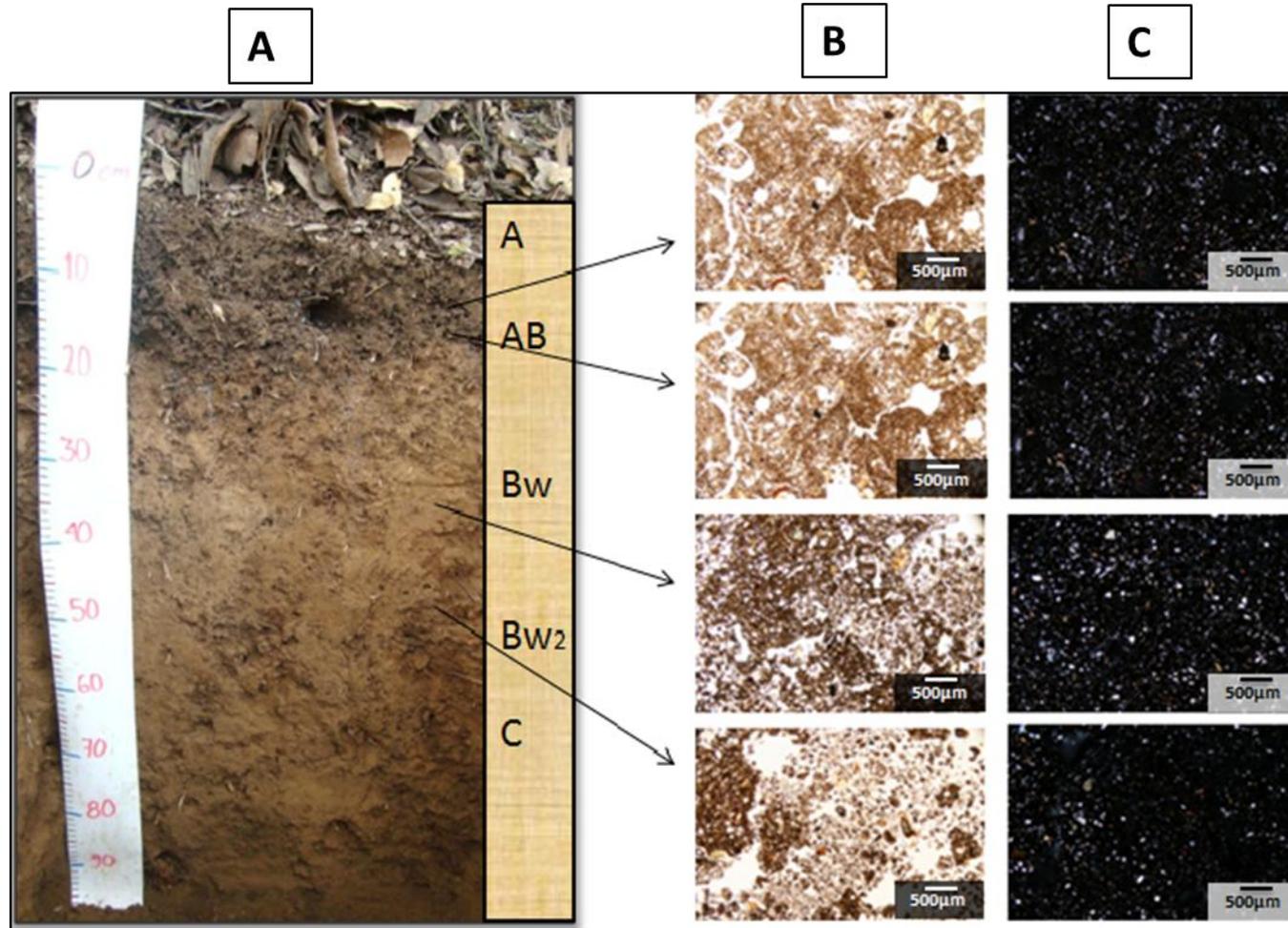
### 6.5. Clasificación de suelos

Los suelos se clasificaron con base en la Referencia Mundial de Recurso Suelo (WRB, 2007).

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Suelos en el Cerro Gordo

El perfil del suelo con imágenes de micromorfología de cerro Gordo se reportan en la Figura 6 y la descripción morfológica se reporta en el Cuadro 2. Es un suelo que presenta un horizonte A, cuyas raíces se extienden hasta el horizonte C (60 cm de profundidad), un horizonte mayor B con un desarrollo estructural incipiente de ahí que se designe como subfijo una w, de tipo de bloques subangulares. Los colores van desde pardos oscuros hasta grises. Los horizontes no reaccionan al HCl y de baja reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el horizonte B. Los horizontes presentan una consistencia que va de ligeramente firme a firme, son pegajosos y plásticos y una buena a moderada permeabilidad. Es un suelo *in-situ* al no mostrar discontinuidades litológicas. La posición del terreno del paisaje integra los efectos de los factores formadores en la pedogénesis y desarrollo morfológico de los suelos (Brady y Weil, 2009; Jenny, 1994). En las partes altas, el material parental proviene de basamento consolidado, el cual, debido a la acción del intemperismo, cuenta con un drenaje interno apropiado. El clima y la vegetación permiten la incorporación de material orgánico y el desarrollo *in situ* (Chaplot *et al.*, 2000)



**Figura 6. A) Perfil de Cerro Gordo; B) imágenes en luz plana se observa una estructura de bloques subangulares y migajosa; C) luz cruzada donde se observa una fábrica indiferenciada, con más del 5% de vidrio volcánico.**

**Cuadro 2. Descripción del perfil de Cerro Gordo**

| Horizonte       | Descripción  |
|-----------------|--|
| A               | 0-12/20 cm; seco; 10YR 3/2 cuando seco; estructura de bloques subangulares de moderado a fuerte, desarrollo de 2 a 3 cm de Ø; ligeramente firme; franco, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; permeabilidad moderada; raíces comunes, delgadas y medias; poros intersticiales, numerosos, finos, caóticos y pocos, medianos y tubulares; sin reacción al HCl y fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición ondulada y marcada al siguiente. |
| AB              | 12 /20-32 cm; seco; 10YR 4/4 cuando seco; estructura de bloques subangulares de moderado desarrollo de 0.5 a 3 cm de Ø; con consistencia firme; Franco arcilloso, Ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; permeabilidad moderada; raíces pocas gruesas y medias; poros intersticiales, numerosos, finos y caóticos; Sin reacción al HCl y al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición media al siguiente horizonte.                                       |
| BW              | 32-50 cm; seco; 10YR 3/4 cuando seco; estructura de bloques subangulares de 2 a 4 cm de Ø moderadamente desarrollada; friable; franco arcilloso; pegajoso y plástico; permeabilidad rápida; raíces pocas finas y medias y raras gruesas; poros intersticiales, numerosos, finos y caóticos; sin reacción al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición media al siguiente horizonte.   |
| BW <sub>2</sub> | 50-69 cm; ligeramente húmedo; 10YR 3/4 cuando seco; estructura de bloques subangulares de pobre desarrollo de 3 a 4 cm de Ø; con consistencia firme; arcilla, pegajoso y plástico; con permeabilidad rápida; raíces pocas medias y finas; poros intersticiales, numerosos, finos y caóticos; sin reacción al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; transición media al siguiente horizonte.  |
| C               | 69-97cm; ligeramente húmedo; 10YR 3/6 cuando seco; estructura de bloques subangulares de pobre desarrollo, de 1 a 5 cm de Ø; consistencia ligeramente firme; arcilla, pegajoso y plástico; permeabilidad moderada; raíces pocas, medianas y finas; poros intersticiales, numerosos, finos y caóticos; sin reacción al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .  |

En el Cuadro 3 se reportan las propiedades químicas. El suelo de Cerro Gordo presenta una reacción ácido (6.1) a fuertemente ácido (4.1). El contenido de materia orgánica por lo general, es alto en el horizonte A (5.6 %) y se reduce con la profundidad, hasta llegar a 1.48% en el horizonte C. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alto en el horizonte Bw<sub>2</sub> con un porcentaje de 32.26 cmol+kg<sup>-1</sup> y medio en el horizonte AB 19.20 cmol+kg<sup>-1</sup>. Este suelo presenta un bajo contenido de bases intercambiables (menor de 50%), dominadas principalmente por Ca<sup>++</sup>.

De acuerdo con Brady y Weil (1999), la acumulación de la materia orgánica rápidamente desarrolla el horizonte A, y genera que los colores sean más oscuros; mientras que el horizonte Bw se forma como resultado de la oxidación de los materiales o bien de arreglo de las partículas primarios para formar agregados de origen pedogenético. Cuando las condiciones son de alta lixiviación o bien hay abundantes precipitaciones generalmente las bases se empiezan a mover hacia los horizontes inferiores, lo que ocasiona que la saturación de bases se reduzca a menos de 50 % (Boul *et al.*, 1982).

En el análisis de oxalatos ácido, para determinar materiales amorfos y propiedades ándicas (Soil Survey Staff, 1999), Cuadro 4, se muestra que la relación de  $Al + \frac{1}{2} \% Fe$  es entre 1.41% a 3.63%, distribuidos de manera irregular entre los horizontes; no obstante, la mayoría son superiores de 2. Esto indica que presentan propiedades ándicas entre moderadas y bien desarrolladas (Soil Survey Staff, 2011). Los valores de Al, Si y Fe obtenidos con oxalato ácidos son mayores que los valores encontrados en ditió nito citrato bicarbonato, lo que muestra que estos suelos son pobremente desarrollados con dominancia de materiales amorfos. En cuanto a las relaciones molares Si/Al se encontró que son de 2, lo que significa que los minerales tienen propiedades alófanicas.

El alofano es un aluminosilicato altamente desordenados o amorfos (Wada, 1977), que se forma como resultado de intemperismo del vidrio volcánico y otros materiales. Asimismo, este es muy importantes en los suelos jóvenes formados a partir de materiales volcánicos (Wada, 1985), ya que le imparten propiedades únicas a los suelos, como alta retención de fosfatos y humedad.

En el Cuadro 5, se reportan las propiedades físicas. El suelo tiene en general texturas que van desde franco limoso, franco arcillo limoso y arcillosa, donde predomina la fracción limoso con porcentajes de 65.11 a 38.31 % en los diferentes horizontes. Los contenidos de las arcillas presentan un incremento en relación con la profundidad: en el horizonte A presenta un 24.66% y en el horizonte C aumenta con un porcentaje de 45.58%. Las arenas disminuyen con la profundidad ya que en el horizonte A tiene un contenido de 16.11% y en el horizonte C disminuye a 10.23 %. El incremento regular de arcillas y disminución del contenido de arenas con la profundidad indican que es un suelo de formación *in situ* (Pape y Lager, 1994); aunque no se encontraron evidencias de revestimientos arcillosos.

**Cuadro 3. Propiedades química del suelo de Cerro Gordo.**

| Horizonte       | Profundidad<br>(cm) | pH<br>H2O 2:1 | CE<br>dSm <sup>-1</sup> | MO<br>% | N     | Na   | K    | Ca   | Mg   | CIC<br>Cmolkg <sup>-1</sup> | PSB<br>% |
|-----------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------|-------|------|------|------|------|-----------------------------|----------|
| A               | 0-12/20             | 6.1           | 0.29                    | 5.60    | 0.085 | 0.33 | 1.72 | 7.32 | 1.33 | 21.31                       | 50.2     |
| AB              | 12/20-32            | 4.2           | 0.51                    | 3.28    | 0.088 | 0.31 | 0.93 | 4.02 | 4.22 | 19.20                       | 49.4     |
| Bw              | 32-50               | 4.8           | 0.44                    | 2.38    | 0.040 | 0.37 | 0.90 | 5.04 | 7.82 | 29.47                       | 48.0     |
| Bw <sub>2</sub> | 50-69               | 5.4           | 0.19                    | 1.22    | 0.073 | 0.61 | 0.77 | 7.13 | 5.84 | 32.26                       | 44.5     |
| C               | 69-97               | 5.0           | 0.45                    | 1.48    | 0.065 | 1.16 | 0.72 | 6.53 | 5.60 | 23.23                       | 60.3     |

**Cuadro 4. Análisis químico de Ditionito y Oxalato**

| Horizonte       | Al+1/2 %Fe | Al+1/2 % Fe | Relación molar |
|-----------------|------------|-------------|----------------|
|                 | %          |             |                |
| A               | 0.038      | 3.638       | 0.0104453      |
| AB              | 0.059      | 1.802       | 0.0327414      |
| Bw              | 0.038      | 3.017       | 0.01259529     |
| Bw <sub>2</sub> | 0.036      | 3.584       | 0.01004464     |
| A               | 0.035      | 2.461       | 0.01422186     |
| AB              | 0.046      | 1.174       | 0.03918228     |

**Cuadro 5. Propiedades físicas del suelo de Cerro Gordo.**

| Horizonte       | Dap               | A     | L     | R     | Clase Textural        | Color H  | Color S  |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-----------------------|----------|----------|
|                 | gcm <sup>-3</sup> | %     |       |       |                       |          |          |
| A               | 0.96              | 10.23 | 65.11 | 24.66 | Franco Limoso         | 10YR 3/2 | 10YR 4/3 |
| AB              | 0.92              | 13.03 | 55.82 | 31.15 | Franco Arcillo Limoso | 10YR 3/3 | 10YR 5/4 |
| Bw              | 0.94              | 14.54 | 48.68 | 36.78 | Franco Arcillo Limoso | 10YR 4/3 | 10YR 4/4 |
| Bw <sub>2</sub> | 0.97              | 15.55 | 39.68 | 44.77 | Arcilla               | 10YR 4/3 | 10YR 5/4 |
| C               | 1.06              | 16.11 | 38.31 | 45.58 | Arcilla               | 10YR 3/3 | 10YR 5/3 |

A: Arena, L: Limo y R: Arcilla.

**Cuadro 6. Elementos fabrica del perfil de Cerro Gordo.**

| Horizonte       | Estructura                                    | Tipo de poro                               | Fabrica        | Distribución Relacionada        | Otros  |
|-----------------|---|--|----------------|---------------------------------|--|
| A               | Fragmentos de bloques subangulares y migajosa | Empaquetamiento complejo, cavidad, canales | indiferenciada | Enáulica espacio doble y simple | Presencia de raíces y excretas.  |
| AB              | Fragmentos de bloques subangulares y migajosa | Empaquetamiento complejo, cavidad, canal   | indiferenciada | Enáulica                        | Presencia de hifas, hojas carbonizadas y excretas.                             |
| Bw              | Fragmentos de bloques subangulares y migajosa | Empaquetamiento complejo, cavidad, canal   | indiferenciada | Enáulica espacio simple y doble | Excretas, fragmento de hojas y raíces.   |
| Bw <sub>2</sub> | Fragmentos de bloques subangulares y migajosa | Empaquetamiento complejo, cavidad, canal   | indiferenciada | Enáulica de espacio simple      | Excretas, fragmentos de raíces y hojas en diferentes grados de descomposición. |

La densidad aparente del horizonte A es de  $1.1 \text{ Mg/m}^3$  y disminuye con la profundidad, que en el horizonte C es de  $1.0 \text{ Mg/m}^3$ . El color es oscuro tanto en húmedo y en seco, en húmedo va desde el 10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro hasta 10 YR 4/3 pardo y en seco presenta 10 YR 4/3 pardo hasta 10 YR/5/4 pardo amarillento.

Al realizar la descripción de las secciones delgadas del suelo de Cerro Gordo (Cuadro 6), se encontró que la microestructura del suelo es de tipo migajoso-granular y de bloques subangulares. Los poros dominantes son de tipo canal, cavidad y en menor proporción de empaquetamiento complejo de acuerdo con la clasificación morfológica de los poros (Brewer, 1964). La masa basal tiene una fábrica-b indiferenciada y un patrón de distribución Enáulica de espacio doble y Enáulica de espacio simple. En cuanto a su fracción gruesa, dominan los feldespatos y vidrios volcánicos (más de 25%) y algunos ferromagnesianos como olivino, hiperstenas y hornablendas.

Con base en estos resultados, este suelo presenta alta actividad biológica, al ocurrir agregados migajosos y canales, los cuales son formados a partir de excrementos y los canales son de fauna de suelo (Pape y Lager, 1995). La estructura subangular se forma como resultado del redondeo de las raíces y de los procesos físicos de expansión y contracción de las arcillas (Brady y Weil, 1999). Debido a la que las raíces están penetrando al suelo hasta una profundidad de 60 cm, la estructura de bloques subangulares se extiende hasta los horizontes inferiores. La fábrica-b indiferenciada es característica de los materiales amorfos que tienen propiedades isotrópicas (Stoops, 1975); es decir, que no transmiten la luz cuando se usa polarizadores cruzados. Esta morfología concuerda con la mayoría de las propiedades físico y químico de este suelo.

A pesar de los incrementos en el contenido de arcilla con la profundidad, no se encontró evidencias de iluviación. Las partículas se están intemperizando y formando materiales secundarios principalmente amorfos, los cuales están dando origen al horizonte Bw, característicos de los Andosoles (Boul *et al.*, 1982)

De acuerdo con sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas este suelo se clasificó como *Andosol Umbrico* (WRB, 2007). Este suelo tiene propiedades ándicas al cumplir con la relación  $\text{Al} + \frac{1}{2} \% \text{Fe}$  mayor de 2, pero también tiene propiedades vítricas al presentar

alto contenido de vidrio volcánico y densidad aparente mayor de  $0.9 \text{ gcm}^{-3}$ . Los procesos que están ocurriendo en este suelo son andosolitización y melanización por la formación de materiales amorfos y alto contenido de materia orgánica en la superficie; además de pérdida de bases intercambiables por la baja saturación de bases, el cual además está relacionado con los pH fuertemente ácidos (Bockheim y Gennadiyev, 2000).

Los Andosoles o Andisoles (Soil Taxonomy o WRB), son suelos formados a partir de cenizas volcánicas en donde su composición química de vidrios y eyecciones volcánicas que se meteorizan rápidamente para formar complejos órgano minerales estables o minerales de bajo grado de ordenamiento como alofano, imogolita y ferrihidrita.

De acuerdo con el INEGI (2012), los suelos dominantes reportados en el área de estudio corresponden a Faeozems, que son suelos de pastizales. Dentro del Grupo de Referencia Mundial de Suelos (2007), los Faeozems no deben de presentar propiedades ándicas, sin embargo al presentar materiales amorfos, vidrios volcánicos los suelos corresponden a Andosoles. Por lo anterior este estudio reporta por primera vez la presencia de Andosoles confinados geomorfológicamente a la cima del Cerro Gordo. Al respecto Pavel *et al.* (2013), indican que estos suelos son fácilmente degradables y que pierden sus horizontes hasta exhibir los materiales parentales. Además, mencionan que estos suelos se localizan en la parte superior de los cerros o de las montañas en los estados de México y Tlaxcala, debido al alto grado de erosión ocasionada por el hombre.

## 7.2. Interior del túnel

### 7.2.1. A 3 m del interior del túnel

A los 3 metros de distancia, se encontró que está relleno con diferentes materiales con base en su color, estructura, consistencia y arreglo de las partículas (Figura 7). Las muestras 1, 2, 6, 7 y 8 corresponden a suelo, la 9 está compuesta de fragmentos de tepetates, la 10 11 12 y 13 son sedimentos aluviales y la 3, 4 y 5 son sedimentos eólicos. Sin embargo, las muestras 6, 9, 10, 11 y 13 presentan fragmentos de tepetate con carbonatos. Las propiedades físicas y químicas de todos los rellenos se reportan en el Cuadro 7.

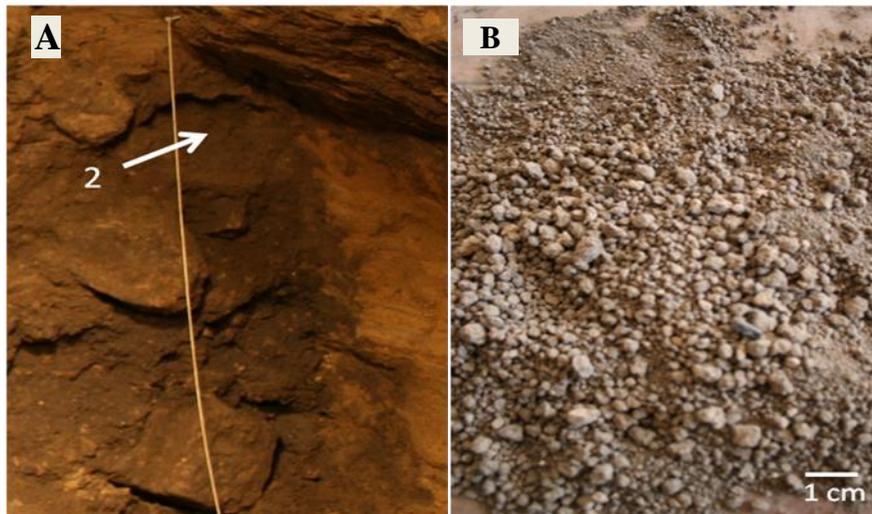


**Figura 7. Relleno con diferente tipo de materiales en el interior del túnel a 3 m de distancia.**

#### a) Suelos

Los suelos que utilizaron para el relleno son de cuatro tipos ya que presentan propiedades edáficas (Cuadro 8 y 9) contrastantes en cuanto a textura, color, CIC, PSB. El suelo 1 es de textura franco arenoso, de color gris muy oscuro en húmedo, con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) 34 cmoles  $\text{kg}^{-1}$ , porcentaje de saturación de bases (PSB)

36.5%; el suelo 2 (Figura 8) presenta una textura franco limoso, con colores pardos grisáceo en húmedo, con un CIC de 29.0 cmoles  $\text{kg}^{-1}$  y PSB de 50.0%. El 6 es de textura franco, negro en húmedo, CIC 35 cmoles  $\text{kg}^{-1}$  y con una baja saturación de bases de 26.2%. El suelo 7 y 8 presenta una clase textura franco, gris muy oscuro en húmedo y un CIC baja de 14 y 7.5 cmoles  $\text{kg}^{-1}$ , con una saturación de bases alta (100%). Todos son suelos de ligero a moderadamente alcalinos, con un contenido de MO bajo, no son salinos, el calcio y magnesio son los cationes que dominan en los sitios de intercambio.



**Figura 8. A) Acercamiento del suelo 2; B) Estructura del suelo donde predominan los agregados granulares y bloques subangulares de 0.5 a 1 cm de diámetro; (40%); material suelto (60%).**

**Cuadro 7. Propiedades químicas y físicas de los suelos, sedimentos y tepetates del interior del túnel.**

| Muestra | Distancia en m | Dap  | %A   | %L   | %R   | Clase textural | Color Húmedo                       | Color Seco                       |
|---------|----------------|------|------|------|------|----------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1       | 3              | 1.0  | 61.6 | 31.6 | 6.8  | Franco arenoso | 10YR 3/1 Gris muy oscuro           | 10YR 7/2 Gris claro              |
| 2       | 3              | 0.93 | 29.2 | 61.6 | 9.1  | Franco limoso  | 10YR 3/2 pardo grisáceo            | 10YR 6/2 Gris pardoso claro      |
| 3       | 3              | 1.33 | 69.8 | 28.1 | 2.0  | Franco arenoso | 10YR 4/1 Gris oscuro               | 10YR 6/3 Pardo pálido            |
| 4       | 3              | 1.21 | 43.2 | 42.1 | 14.7 | Franco         | 10YR 2/2 Pardo muy oscuro          | 10YR 5/2 Pardo grisáceo          |
| 5       | 3              | 1.28 | 42.0 | 42.0 | 16.0 | Franco         | 10YR 2/2 Pardo muy oscuro          | 10YR 5/1 Gris                    |
| 6       | 3              | 0.91 | 39.2 | 44.6 | 16.2 | Franco         | 10YR 2/1 negro                     | 10YR 6/1 Gris                    |
| 7       | 3              | 0.94 | 46.3 | 41.3 | 12.4 | Franco         | 10YR 3/1 Gris muy oscuro           | 10YR 6/2 Gris pardoso claro      |
| 8       | 3              | 0.97 | 43.6 | 43.9 | 12.5 | Franco         | 10YR 3/1 Gris muy oscuro           | 10YR 6/2 Gris pardoso claro      |
| 9       |                | 1.15 | 57.6 | 31.8 | 10.6 | Franco arenoso | 10YR 2/1 Negro                     | 10YR 5/2 Pardo grisáceo          |
| 10      | 3              | 1.18 | 39.7 | 39.5 | 20.8 | Franco         | 10YR 2/2 Pardo muy oscuro          | 10YR 5/1 Gris                    |
| 11      | 3              | 1.14 | 35.8 | 48.2 | 16.1 | Franco         | 10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro | 10YR 5/2 Pardo grisáceo          |
| 12      | 3              | 1.15 | 90.3 | 8.7  | 1.0  | Arena          | 10YR 4/3 Pardo                     | 10YR 6/4 Pardo amarillento claro |
| 13      | 3              | 1.15 | 93.9 | 4.1  | 2.0  | Arena          | 10YR 4/2 Pardo grisáceo oscuro     | 10YR 7/4 Pardo muy pálido        |

Dap en  $\text{gcm}^{-3}$ ; A: Arena, L: Limo y R: Arcilla.

**Cuadro 8. Propiedades químicas de los suelos, sedimentos y tepetates a 3 m del interior del túnel.**

| Muestra | pH  | CE   | %CO  | %MO  | %N    | CIC  | Na   | K    | Ca   | Mg   | PSB   | P2O5 |
|---------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 1       | 7.7 | 0.36 | 0.16 | 0.27 | 0.006 | 34.0 | 0.50 | 0.62 | 5.91 | 5.40 | 36.5  | 58.1 |
| 2       | 8.2 | 0.33 | 0.24 | 0.41 | 0.006 | 28.9 | 0.54 | 0-72 | 7.53 | 5.59 | 49.8  | 89.6 |
| 3       | 8.2 | 0.44 | 0.08 | 0.14 | 0.006 | 31.5 | 0.33 | 0.42 | 3.11 | 2.90 | 21.5  | 50.8 |
| 4       | 7.9 | 0.45 | 0.24 | 0.41 | 0.006 | 22.7 | 0.35 | 0.54 | 5.44 | 4.29 | 46.8  | 75.1 |
| 5       | 7.8 | 0.38 | 0.39 | 0.68 | 0.012 | 32.1 | 0.48 | 0.93 | 9.86 | 6.62 | 55.7  | 75.1 |
| 6       | 8.0 | 0.37 | 0.08 | 0.14 | 0.026 | 35.3 | 0.24 | 0.53 | 4.70 | 3.76 | 26.2  | 58.1 |
| 7       | 7.9 | 0.28 | 0.16 | 0.27 | 0.012 | 13.9 | 0.39 | 0.82 | 8.14 | 5.93 | 109.8 | 62.9 |
| 8       | 7.7 | 0.46 | 0.47 | 0.81 | 0.019 | 7.5  | 0.35 | 0.63 | 7.64 | 5.03 | 182.3 | 75.1 |
| 9       | 7.9 | 0.29 | 0.39 | 0.68 | 0.019 | 16.1 | 0.33 | 0.68 | 6.90 | 5.12 | 81.2  | 65.3 |
| 10      | 7.7 | 0.36 | 0.39 | 0.68 | 0.026 | 16.7 | 0.31 | 0.70 | 9.31 | 5.77 | 96.3  | 65.3 |
| 11      | 7.6 | 0.40 | 0.08 | 0.14 | 0.026 | 26.1 | 0.37 | 0.67 | 8.60 | 5.10 | 56.5  | 92.0 |
| 12      | 7.4 | 0.20 | 0.16 | 0.27 | 0.006 | 1.3  | 0.22 | 0.33 | 2.58 | 2.09 | 71.8  | 31.4 |
| 13      | 7.1 | 0.17 | 0.39 | 0.68 | 0.006 | 6.2  | 0.24 | 0.31 | 2.13 | 1.94 | 74.6  | 36.2 |

CE en  $\text{dSm}^{-1}$ ; N total; Na, K, Ca, Mg y CIC en  $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$

**Cuadro 9. Elementos fabrica de los suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada (3 m).**

| Zona | Distancia en metros | Estructura  | Tipo de poro                                 | Fábrica                   | Distribución relacionada |
|------|---------------------|---|--|---------------------------|--------------------------|
| 1    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento complejo                     | indiferenciada            | Enáulica                 |
| 2    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento complejo y simple            | Indiferenciada y moteada  | Enáulica y Gefúrica      |
| 3    | 3                   | Sedimento   | Empaquetamiento complejo                     | indiferenciada            | Enáulica y Gefúrica      |
| 4    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento simple                       | indiferenciada            | Gefúrica y Mónica        |
| 5    | 3                   | sedimentos  | Empaquetamiento simple                       | indiferenciada            | Enáulica y Gefúrica      |
| 6    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular y sedimentos        | Empaquetamiento compuesto                    | Estriada y indiferenciada | Enáulica y Gefúrica      |
| 7    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento compuesto y vesícula         | Estriada y indiferenciada | Enáulica                 |
| 8    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento compuesto                    | indiferenciada            | Enáulica                 |
| 9    | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento complejo                     | indiferenciada            | Enáulica                 |
| 10   | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular, sedimento fisurado | Cavidad y fisura                             | Estriada y indiferenciada | Enáulica                 |
| 11   | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento compuesto y simple           | indiferenciada            | Enáulica y porfirica     |
| 12   | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento compuesto, fisura y vesícula | indiferenciada            | Enáulica                 |
| 13   | 3                   | Fragmentos de bloques subangulares y granular y sedimentos        | Empaquetamiento complejo                     | Estriada y indiferenciada | Enáulica y porfirica     |
| 14   | 25                  | Fragmento de bloques subangulares y granular                      | Empaquetamiento complejo y compuesto         | Indiferenciada            | Enáulica                 |
| 15   | 25                  | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento complejo y compuesto         | indiferenciada            | Enáulica                 |
| 16   | 25                  | Fragmentos de bloques subangulares y granular                     | Empaquetamiento complejo y compuesto         | indiferenciada            | Enáulica                 |

El hecho de que este relleno presenta diferentes tipos de suelos indica que los Teotihuacanos tomaron muestras de diferentes áreas. Los suelos con alta saturación de bases (100%), generalmente se reportan en áreas de recepción, u originados de materiales parentales con alto contenido de bases (Boul *et al.*, 1981); mientras que los suelos con baja saturación se reportan en ambientes fuertemente lixiviados en pendientes donde el drenaje es muy eficiente para lavar todas las bases (Soil Survey Staff, 2006) o bien en materiales volcánicos con diferente grado de alteración.

Sedov *et al.* (2012) realizaron estudio de los pedosedimentos para determinar el tipo de suelos presentes durante el periodo Teotihuacano, y reportaron que en el año 600 dC, la zona presentaba Fluvisoles y Vertisoles cálcicos, pero no Andosoles. Sin embargo de acuerdo con Gómez Chávez y Gazzola (2005), la construcción del túnel se realizó aproximadamente 1800 años, lo que significa más de 1200 años antes de los suelos analizados por Sedov *et al.* (2012). Es probable que durante las primeras etapas de los Teotihuacanos, los Andosoles ocurrieran cerca de la ciudad.

Por otra parte, Teotihuacán es un área de recepción de sedimentos al presentarse en la parte más baja de la cuenca, por lo que se esperaría sólo materiales con alta saturación de bases, cercanos a las pirámides. El valle es igualmente una zona de recepción de material fluvial, con un clima también menos húmedo, y con una cantidad de escurrimiento menor, lo que permite en ocasiones el desarrollo de suelos en el lugar (Levine, 2001). Sedov *et al.* (2012), reportaron procesos de erosión y depositación durante la ocupación sedentaria de los Teotihuacanos, de ahí que haya encontrado fluvisoles que datan de 600 años d.C. (Sedov *et al.*, 2009). Los Fluvisoles que tienen una saturación de bases (por NH<sub>4</sub>OAc) de menos de 50%, se denominan Fluvisoles dístrico y se encuentran en alguna parte del suelo entre los 20 y los 50 cm de profundidad. Se caracterizan por contener pocos nutrientes, o por tenerlos escasos en algunas partes. Muchas veces son ricos en arenas de cuarzo (SEMARNAT, 2005), información que no concuerda con la naturaleza mineralógica registrada en el presente trabajo, en donde domina el vidrio volcánico y ferromagnesianos. Con base en lo anterior el tipo de suelos que más concuerda son los Andosoles Dystricos, porque son de origen volcánico y de baja saturación de bases.

La micromorfología (Cuadro 9) de los fluvisoles presentan estructura de bloques subangulares (aristas agudas y caras curvas). Esta estructura es típica de suelos de zonas

semiáridas y áridas con bajo contenido de materia orgánica, solo de actividad de las raíces. Los poros son de tipo empaquetamiento complejo, fabricas-b indiferenciadas dominantes y una distribución relacionada grueso/fino enáulica, por el tipo de agregados que presenta.

Las estructuras de bloques subangulares y granulares se forman por actividad biológica, como resultado del redondeo de los agregados por las raíces o bien por actividad de fauna (Bullock *et al.*, 1985). En cambio, las estructuras granulares son típicas de medios biológicamente activos ricos en bases y materia orgánica (Porta *et al.*, 1994). De acuerdo con Fitzpatrick (1984), los bloques subangulares ocurren en los horizontes medios de texturas finas y se forman por la mojadura y secadura de las partículas primarias; mientras que las estructuras granulares ocurren en los horizontes superiores y medios y se forman como resultado de excrementos de algunos organismos, en especial de algunos artrópodos. Este tipo de agregados ocurren en la superficies del suelo y su frecuencia va disminuyendo con la profundidad debido a la disminución del contenido de materia orgánica y actividad biológica (Bready y Weill, 1999).

**Cuadro 10. Análisis mineralógico de los suelos y sedimentos a 3 m del interior del túnel.**

| Muestra             | olivino | hornablenda | hiperstena | augita | vidrio volcánico |        | cuarzo | magnetita | feldespato |
|---------------------|---------|-------------|------------|--------|------------------|--------|--------|-----------|------------|
|                     |         |             |            |        | acido            | básico |        |           |            |
| Número de cristales |         |             |            |        |                  |        |        |           |            |
| 1                   | 3       | 0           | 5          | 0      | 19               | 48     | 1      | 3         | 21         |
| 2                   | 4       | 0           | 1          | 0      | 31               | 11     | 1      | 6         | 46         |
| 3                   | 6       | 1           | 4          | 2      | 14               | 5      | 1      | 34        | 33         |
| 4                   | 12      | 8           | 3          | 0      | 16               | 5      | 0      | 10        | 51         |
| 5                   | 5       | 8           | 2          | 0      | 18               | 15     | 3      | 8         | 49         |
| 6                   | 17      | 1           | 3          | 0      | 13               | 0      | 1      | 5         | 60         |
| 7                   | 12      | 2           | 0          | 0      | 13               | 10     | 1      | 7         | 55         |
| 8                   | 15      | 1           | 0          | 0      | 8                | 16     | 0      | 4         | 56         |
| 9                   | 8       | 2           | 3          | 0      | 8                | 13     | 3      | 8         | 54         |
| 10                  | 10      | 7           | 0          | 1      | 13               | 8      | 0      | 3         | 57         |
| 11                  | 18      | 1           | 3          | 0      | 16               | 14     | 0      | 6         | 42         |
| 12                  | 16      | 4           | 0          | 0      | 29               | 4      | 0      | 2         | 51         |
| 13                  | 22      | 9           | 3          | 0      | 3                | 1      | 0      | 24        | 32         |

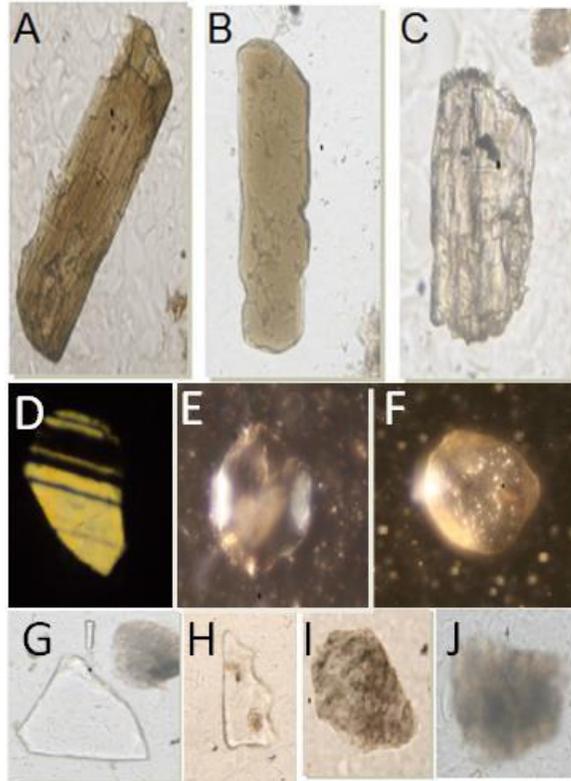
En cuanto a los poros de empaquetamiento complejo se forman por el arreglo de agregados y partículas primarias (Stoops 2003); estas últimas están compuestas predominantemente por vidrio volcánico, ferromagnesianos y feldespatos. Las fábricas-b indiferenciadas son comunes en andosoles o en materiales de origen volcánico por la presencia de materiales organo minerales amorfos (Stoops, 2003).

La mineralogía de los suelos también es muy contrastante ya que puede ser de naturaleza vítrica (suelo 1 y 2) o cristalina. Los suelos 6,7 y 8 están formados por materiales volcánicos compuestos por feldespatos, olivino y vidrios ácidos y básicos (Figura 9). Con base en esta mineralogía se puede indicar que el material parental de estos suelos corresponde a un basalto olivínico que se enfrió rápidamente por la presencia de vidrio. Al respecto y de acuerdo con la formación geológica de la zona, los materiales volcánicos que tienen esa mineralogía provienen del Cerro Gordo (Mooser, 1968). El basalto es una roca ígnea extrusiva, sólida y negra y está formado por abundantes minerales oscuros como el piroxeno y el olivino, que hacen que el basalto sea de color gris o negro; además, también tiene cantidades menores de minerales de color claro como feldespatos y cuarzo. El peso del basalto contiene menos de 52% en cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). La mayoría de los cristales de estos minerales son muy pequeños para poder ser vistos a través de un microscopio, ya que el alto grado de frío previene que los cristales grandes se formen.

De acuerdo con la NASTA (2010), el basalto se forma cuando la lava llega a la superficie de la Tierra proveniente de un volcán, o de una cordillera en medio del océano. Cuando llega a la superficie, la lava se encuentra a temperaturas que oscilan entre los 100 a 250°C pero se enfría rápidamente, en unos días o un par de semanas, convirtiéndose en roca sólida.

Howel *et al.* (1968) mencionan que los basaltos o materiales que presentan vidrios se encuentran principalmente en los bordes rápidamente enfriados de intrusiones someras, en las cortezas de las corrientes y en las lavas enfriadas rápidamente al ser descargadas bajo el agua o bajo el hielo.

Con base en la clasificación propuesta por Pape (1992), los suelos 1 y 2 son halollalinos porque están compuestos prácticamente de vidrio volcánico y el resto son clasificados como hipocristalinos o hypollalinos porque tienen tanto minerales cristalizados como vidrio volcánico. Los vidrios presentan un relieve negativo y positivo.



**Figura 9. Minerales; A=olivino; B=hornablenda; C=hiperstena D=feldspato; E y F=magnetita = Gy H=vidrios volcánicos ácidos; I e J= vidrios volcánicos básicos.**

*b) Sedimentos eólicos*

Los sedimentos 3, 4 y 5 se consideran de tipo eólico porque son materiales piroclásticos cristalinos, tienen más de 75 % de fragmentos de cristales (Pape, 1992); sin embargo, presentan propiedades diferentes. El sedimento 3 tiene una textura franco arenosa, gris oscuro en húmedo, con una CIC de  $31.5 \text{ cmol kg}^{-1}$ , y un PSB de 21%. El sedimento 4 y 5 presentan una textura franco, pardo muy oscuro, CIC  $22 \text{ cmol kg}^{-1}$  y un bajo PSB de 46. Todos son sedimentos con pH moderadamente alcalinos, con un bajo contenido de materia orgánica. Los cationes dominantes en los sitios de intercambio son  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ .

Micromorfológicamente estos suelos presentan diferencias, el sedimento 3 tiene una estructura láminar, patrón de distribución básica en bandas, poros de empaquetamiento simple y un patrón de distribución relacionada Enáulica y Gefúrica. El sedimento 4 tiene una estructura de fragmentos de bloques subangulares y granular, una distribución relacionada Gefúrica y Mónica. El sedimento 5 tiene una estructura laminar, con poros de empaquetamiento simple y una distribución relacionada Enáulica y Gefúrica al igual que el

sedimento 3. Estos sedimentos tienen una similitud en cuanto a la fabrica-b indiferenciada que presentan.

De acuerdo con Pape y Lager (1995), la estructura laminar se forma en depósitos aluviales y eólicos. En este último proceso, las cenizas volcánicas se van depositando debido a las erupciones intermitentes. Generalmente presentan formas angulosas.

Llama la atención que estén intercalados materiales que desarrollaron estructuras edáficas, además de procesos de iluviación que dan origen a patrones de distribución gefúrica, al puentear las partículas de arcilla con granos de arena. Con base en estos resultados se puede indicar que estos materiales estuvieron, en alguna parte de su historia, en la superficie por procesos de iluviación de arcillas.

La mineralogía de estos sedimentos eólicos difiere en el sedimento 3 ya que presenta un alto contenido de magnetita. Este mineral accesorio se produce en materiales jóvenes influenciados por rocas básicas, por ejemplo el Basalto (Rhoten *et al.*, 1981; Walker, 1983). Los sedimentos 4 y 5 están formados por materiales volcánicos compuestos por feldespatos, olivino y vidrios ácidos característicos también de las rocas básicas.

### *c) Fragmentos de tepetate*

La muestra 6 presenta fragmentos de tepetates con carbonatos de calcio. Los tepetates corresponden a depósitos consolidados de cenizas volcánicas llamadas tobas (Bertaux *et al.*, 1994). Cuando presentan acumulaciones de carbonatos generalmente se ubican en la parte superior de la toba (Gutiérrez-Castorena y Ortiz Solorio, 1992), después de que el suelo se ha erosionado. Al parecer se formaron por un cambio de clima más drástico, de clima húmedo a árido o semiárido, lo que provocó su acumulación y precipitación hace 19 000 años (Gutiérrez *et al.*, 2007). Sedov *et al.* (2012), reportaron este tipo de rasgos dentro del horizonte 5BCK e indican que se trata Vertisoles Calcicos.

El estudio micromorfológico, no se apreciaron fabricas-b vérticas características de este tipo de suelos que se forman como resultado de los procesos de expansión y contracción. Más bien se trata de acumulaciones de arcillas, por su límite abrupto con la superficie de los agregados, y no como una poroestria, de acuerdo con Stoops (2003).

Los horizontes cementados por carbonato de calcio por procesos pedológicos son los horizontes petrocálcicos de acuerdo con la Soil Survey Staff (1994). El proceso de

endurecimiento en éstos se da por la acumulación de cristales de carbonato de calcio sobre los agregados del suelo, los cuales invaden progresivamente todos los poros y forman una masa homogénea en toda la matriz, éstos se forman como resultado de la escasa precipitación y elevada evaporación en regiones áridas y semiáridas (Chadwick *et al.*, 1987 y Quantín, 1992)

La mayoría de los investigadores, han reportado que los tepetates están constituidos principalmente por proyecciones piroclásticas y que su endurecimiento puede ser de origen geológico, en el momento del depósito, o pedológico, por aporte de cementos tales como el carbonato de calcio (Peña y Zebrowski, 1992). La dureza de los Tepetates es el resultado de un endurecimiento pedogenético por la sílice, el cual sobrepone a la litificación de la toba, reduciendo su dureza en un clima húmedo o reforzándola en un clima subárido (Quantín *et al.*, 1992; 1997). Para Hidalgo (1995), la dureza y silificación discreta, sólo refuerzan el endurecimiento inicial.

El clima y origen del material geológico, se consideran como principales factores que determinan las características físicas, químicas y mineralógicas de los tepetates (Peña y Zebrowski, 1992)

Valdez (1970) señala que el carbonato de calcio puede provocar la disminución del chroma en los tepetates amarillos o rojos. Los tepetates amarillos varían de pardo amarillento (10YR 5/6) a amarillo (10YR 7/5) en seco y de pardo oscuro (7.5 YR 4/4) a pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4) en húmedo. El del tepetate rojo presenta un color de pardo fuerte (7.5 YR 5/6) amarillo (10 YR 7/6) en seco y de pardo rojizo oscuro (5 YR 3.5/4) a pardo rojizo (5 YR 4/4 en húmedo (Pacheco y Estrada, 1987)

Los tepetates presentan una textura predominante gruesa: arenosa (Valdéz, 1970), areno-migajosa (Cajuste y Cruz, 1987), de areno-limosa a areno arcillosa (Peña y Zebrowski, 1992). Además, tienen una densidad real que oscila entre 2.4 y 2.8 gcm<sup>3</sup> y una densidad aparente (Da) entre 1.2 y 1.55 gmc<sup>-3</sup>. Cuando presenta carbonato de calcio tienen densidades aparentes más altas (2.3 gmc<sup>-3</sup>) (Gutiérrez, 1988; Etchevers *et al.*, 1992).

El hecho de que los rellenos del túnel tengan fragmentos de tepetate con carbonato de calcio muestra que los Teotihuacanos utilizaban material de áreas erosionadas o bien que eran materiales residuales de las excavaciones. Gómez y Gazzola (2005) reportaron que durante el sistema hidráulico primario (fase Patlachique), los Teotihuacanos construyeron

un canal de 5.50 , de ancho por 3.70 metros de profundidad y una anchura de 1.40 m, totalmente excavado en el tepetate. Gutiérrez *et al.* (2009) realizaron un análisis micromorfológico en esos canales y encontraron que los sedimentos presentaban fragmentos de tepetate con acumulaciones de carbonatos, pero que la clausura fue totalmente realizada con este material. Este canal tenía orientación paralela al río San Juan y fue rellenado durante la fase Miccaotli (150-200 d. C.), cuando construyeron precisamente este último pues los materiales tenía orientación del río.

Los fragmentos de tepetates mostraron pH de 7.6, 7.7, 7.9 y 8 (para las muestras 11, 10, 9 y 6 respectivamente) y son ligera y moderadamente alcalinos. Según la clasificación de Cajuste y Cruz (1987) se consideran ligeramente alcalino (pH = 7.6-7.8) en los tepetates pardo y pardo amarillentos; moderadamente alcalino (pH= 8.0-8.2) en los tepetates blanco amarillento, pardo fuerte y grisáceo y fuertemente alcalino (pH= 9.5-11.0) en las costras calcáreas (Cajuste y Cruz 1987).

Los contenidos de carbono y nitrógeno total en estos fragmentos contienen menores de de 0.026, los cuales son muy bajos. Al respecto Etchevers *et al.*, (1992) considera que los contenidos de P en los tepetates son bajos, de 0.05 a 0.9%, respectivamente.

La CIC es variable, de 19.6 a 32.0  $\text{cmol}_{(+)}\text{Kg}$  para distintos tipos de tepetates, lo mismo que el porcentaje de saturación de bases (44 al 100%) (Valdéz, Cajuste y Cruz, 1987) y Etchevers *et al.*, 1992)

La mineralogía de los fragmentos de tepetate está compuesta por feldespatos, vidrio volcánico ácido e hiperstena por lo que fortalece el supuesto de que estas muestras son de tobas víricas. Esta composición mineralógica corresponde a la misma que reporto Werner *et al.* (1978), quienes indican que son materiales muy susceptibles a la erosión.

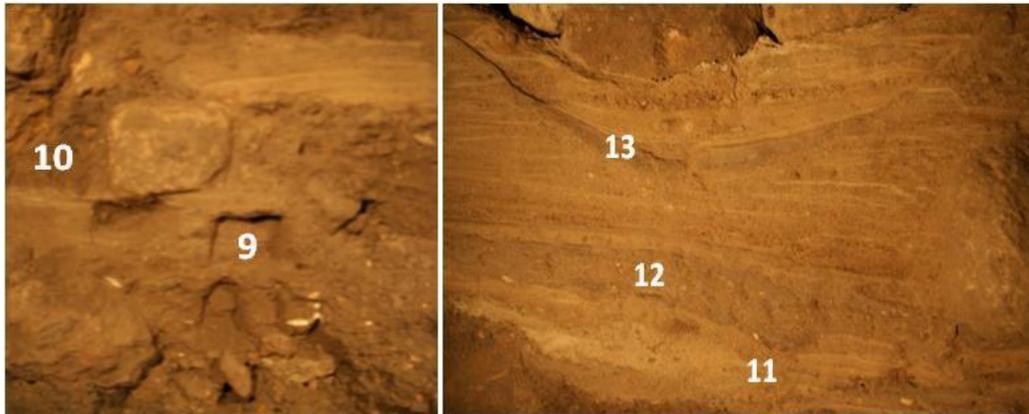
La fracción fina (<2 nm) de tepetate se caracteriza por la presencia de distintos tipos de arcilla: montmorillonita, kaolinita, illita, hidrómicas y carbonatos (Valdéz, 1970) haloysita y esmectita con diversos grados de cristalización (Oleschko *et al.*, 1992)

d) *Sedimentos aluviales*

Los sedimentos aluviales son todas las partículas, cualquiera que sea su tamaño, proveniente de las rocas y suelos de una cuenca, que son arrastrados y transportados por una corriente (Sánchez 1987). Los sedimentos aluviales 9, 10, (Figura 10) 11, 12 y 13 (Figura 11) que se encontraron, presentan diferentes características edáficas. El sedimento 9, presenta una textura franco arenosa, negro, y un PSB alto de 81%. El sedimento 10 (Figura 11), tiene una textura de tipo franco, pardo muy oscuro, PSB alto de 97%. El 11 presentó una textura franco, pardo grisáceo muy oscuro, PSB alto de 56.%. El 12 es de textura arenosa, pardo, PSB alto de 72% y el sedimento 13 tiene una textura arenosa, pardo grisáceo muy oscura y un PSB% alto de 74. Todos los sedimentos presentaron un PSB alto que fluctua de 56 a 81%. El pH es ligeramente alcalino, un bajo contenido de materia orgánica y los cationes dominantes en los sitios de intercambio son  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ .



**Figura 10 Material suelto de los sedimentos 9 y 10.**

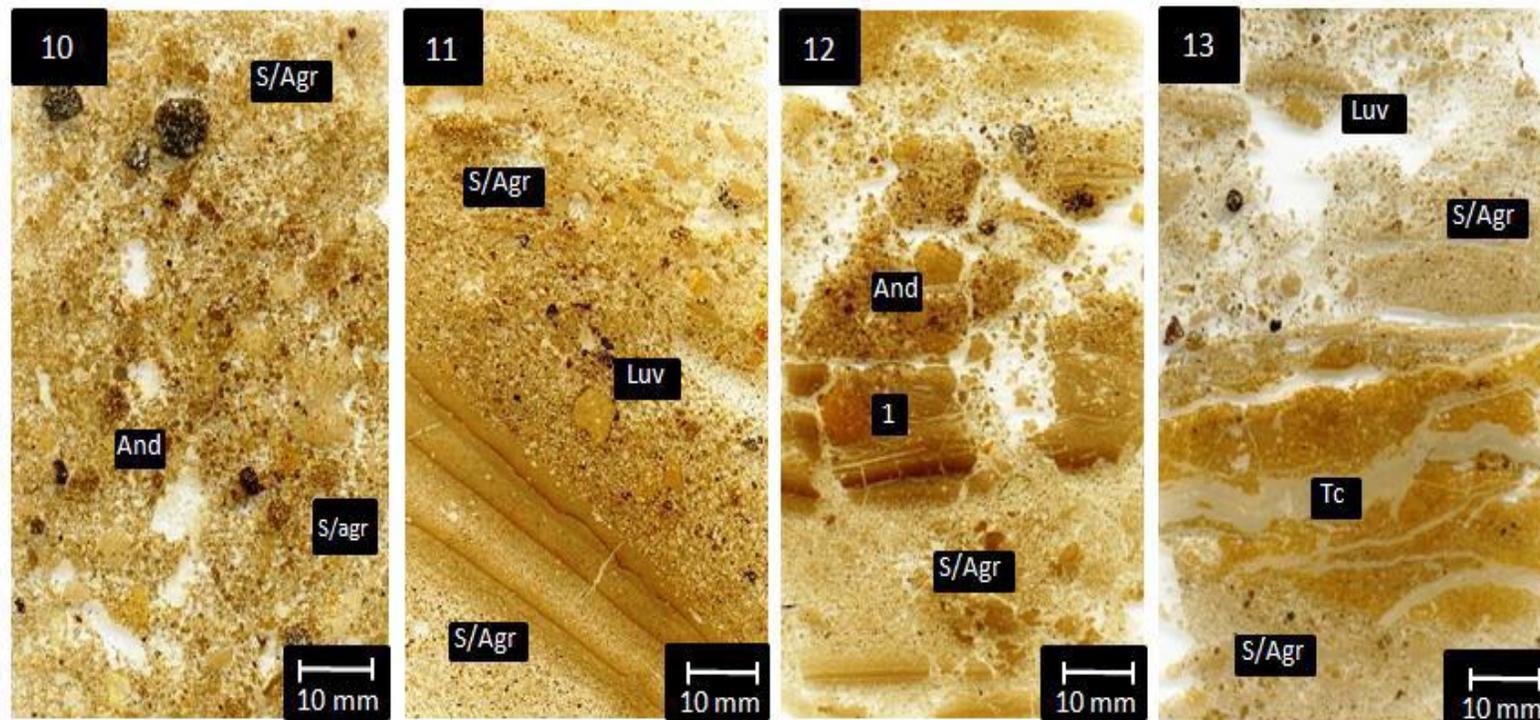


**Figura 11. Acercamiento de los sedimentos 9, 10, 11, 12 y 13**

Micromorfológicamente los sedimentos 9, 11 y 12, presentan agregados de bloques subangulares y granular, con poros de empaquetamiento complejo y un patrón de distribución básica en bandas. En sedimentos 11 y 13 también ocurren agregados más compactos con una distribución relacionada porfirica. El sedimento 10 (Figura 11) presenta agregados de suelos con fábrica-b indiferenciada.

Estos sedimento son materiales que se formaron de dos tipos de rocas, básaltico porque tiene feldespatos cálcicos y olivino y Andesita por la presencia de hornablenda (Figura 12), minerales característicos del material parental de Cerro Gordo (Moose, 1968).

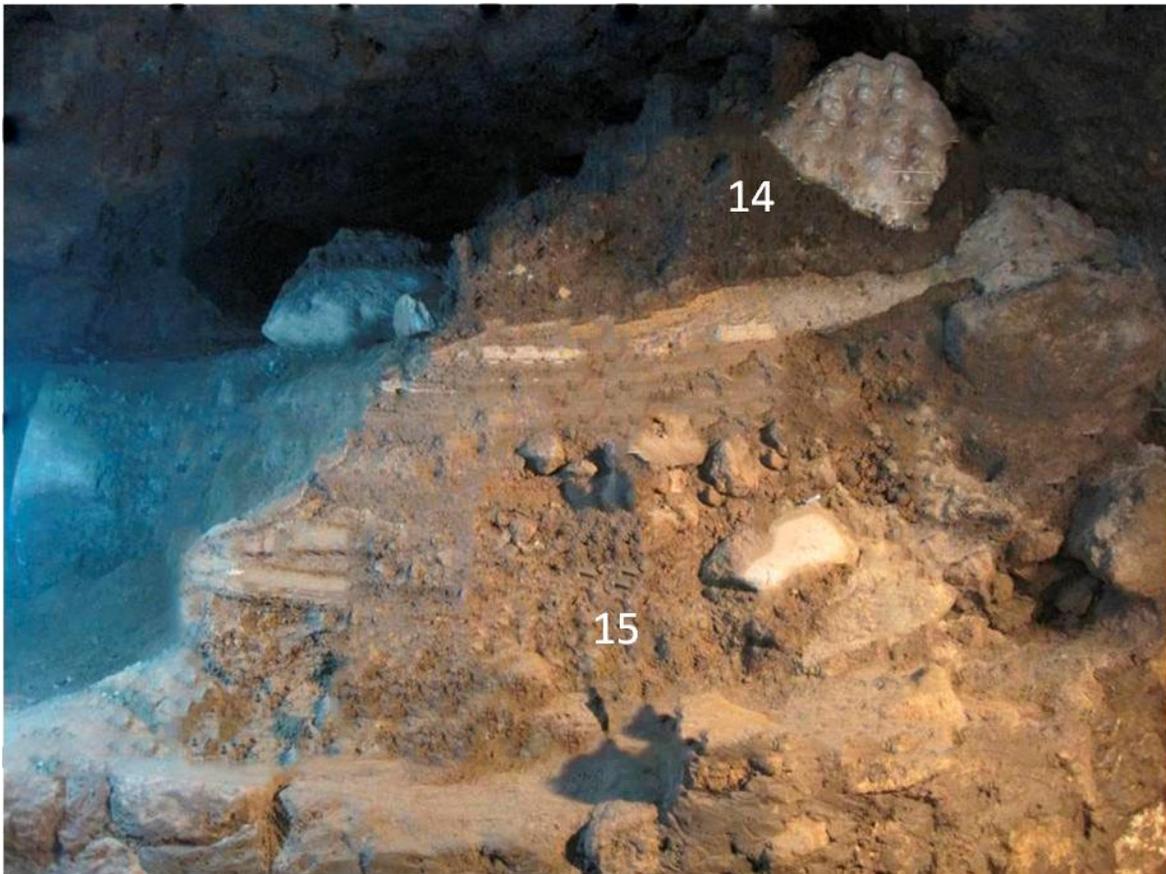
La presencia de agregados indica que la erosión hídrica que rellenó la parte superior del canal ocurrió directamente en suelos, que rodean u ocurren en la Ciudadela, que se erosionaban y las aguas se depositaban en el canal. Las fábricas-b indiferenciadas indican que se trata de Andosoles, que en la actualidad ya no se presentan en las zonas aledañas a las pirámides.



**Figura 12. Secciones delgadas de los suelos, rellenos y sedimentos del interior del Tunel. (10) muestra con sedimentos, agregados y Andosol; (11) muestra con sedimentos, agregados y Luvisol; (12) muestra con sedimentos y agregados, Andosol, 1= cerámica; (13) muestra con sedimento y agregados, Luvisol, tepetate con carbonatos.**

### 7.2.2. 13 metros al interior del túnel

El corte 13 (Figura 13) está formado por material muy heterogéneo. Se observan rocas, sedimentos aluviales y fragmentos de suelo. Se realizó solamente el análisis químico de Al+ ½ % Fe donde presentó un porcentaje de 0.430% a 0.522%, lo que al ser mayor de 0.4, indica que presentan propiedades ándicas pero poco desarrolladas (Soil Survey Staff, 2011). Tiene una relación molar de 2:1, la cual indica que tiene propiedades alófanicas; esta condición es parte de la formación de minerales en horizontes subsuperficiales de Andosoles (Wada, 1985).



**Figura 13. Corte 13 donde se encuentra el tiro vertical de 0.83m de diámetro descubierto en el 2003, frente al Templo de la Serpiente Emplumada.**

### 7.2.3. 20 m al interior del túnel

En el metro 20 (Figura 14) se observó 3 capas de material con diferencia en el color, textura y estructura. El relleno está prácticamente formado por suelo. Con los análisis químicos se encontró que la relación  $Al + \frac{1}{2} \% Fe$  (Cuadro 11) y se obtuvo un porcentaje de 0.063, por lo cual no tiene propiedades ándicas.



**Figura 14. Corte 25 m indicando el punto de toma de muestras y su numeración.**

### 7.2.4. 25 m al interior del Túnel

El corte 25, se encuentra a 25m del interior (Figura 15) es muy pedregoso y tiene una sola capa gruesa de suelo.

La descripción micromorfológica y macro indica que estos suelos presentan similitudes de estructura de bloques subangulares y granular, tipo de poro de empaquetamiento complejo, fabricas indiferenciadas y una distribución relacionada de partículas gruesas/finas enáulica por el tipo de agregados que presenta.

En el análisis de oxalatos para determinar propiedades ándicas se encontró que presentan una relación de  $Al + \frac{1}{2} \% Fe$  de 0.3 a 0.6 por lo que al ser mayores de 0.2 presentó propiedades ándicas de acuerdo con Soil Survey Staff (2011). Estos complejos de Al y Fe son inmóviles, se acumulan en la superficie para formar un horizonte oscuro o marrón oscuro de acuerdo con Dixon (1989).

Al presentar estos suelos una relación molar Si/Al de 2:1, indicó una composición de alófano (Wada, 1989). Este mineral amorfo de acuerdo con Buol (1996) se forma en condiciones de concentraciones medianas a altas de hidronio en sistemas húmedos o muy mojados, mediante la intemperización rápida de cenizas volcánicas no cristalinas o, hasta un punto limitado, por la intemperización rápida de los feldespatos, por lo que confiere propiedades ándicas (Dixon, 1989)



**Figura 15. Corte en el metro 25, indicando el punto de toma de muestras y su numeración.**

**Cuadro 11. Análisis de Oxalato ácido de los suelos y sedimentos del interior del túnel (corte 13, 20 y 25m)**

| Muestra | Distancia (m) | Al+0.5%Fe | Al+0.5%FE | Relación molar |
|---------|---------------|-----------|-----------|----------------|
| 14      | 25            | 0.054     | 0.372     | 0.145          |
| 15      | 25            | 0.042     | 0.297     | 0.141          |
| 16      | 25            | 0.237     | 0.664     | 0.356          |
| 19      | 13            | 0.045     | 0.522     | 0.086          |
| 20      | 13            | 0.033     | 0.43      | 0.076          |
| 21      | 20            | 0.095     | 0.063     | 1.507          |
| 22      | 20            | 0.095     | 0.063     | 1.507          |

### 7.2.5. Resumen de los rasgos micromorfológicos

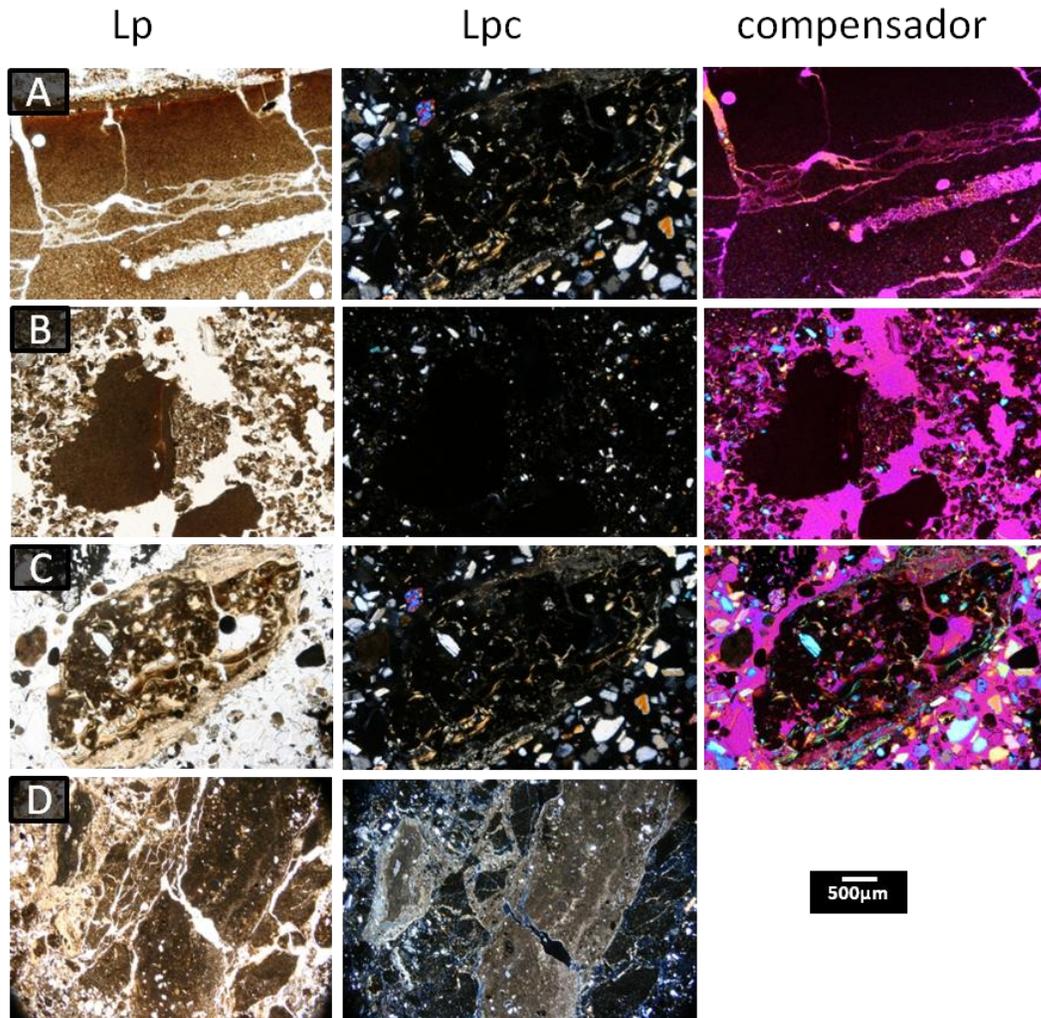
En el cuadro 12 se observa el porcentaje de los materiales que se encontraban en las secciones delgadas.

Los sedimentos aluviales (A) con fisuras que en la luz plana cruzada se pueden observar la presencia de feldespatos y vidrio volcánico. En el sedimento con agregados (B) presenta amorfos los cuales se oscurecen totalmente con la luz polarizada cruzada (LPC). Luvisol (C) con la Lpc se puede ver como brillan los revestimientos de arcilla. El Tepetate con carbonatos (D) con la Lpc se observa un color gris.

Con base en los resultados obtenido se puede indicar que a 25 metros del túnel, los Teotihuacanos rellenaron predominantemente con suelo de tipo Andosol, por sus fábricas indiferenciadas y estructura granular, y de bloques suabngulares, además de sus propiedades ándicas, Conforme fueron avanzando en el relleno, la cantidad de suelo fue disminuyendo pero su naturaleza se fue modificando. Los Teotihuacanos comenzaron a utilizar diversos tipos de suelos, desde ácidos hasta alcalinos. Continuaron utilizando Andosoles aunque comienzan a aparecer fragmentos de fluvisoles por sus distribuciones básicas paralelas.

**Cuadro 12. Porcentaje del tipo de suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada del relleno del interior del túnel.**

| Zona | Distancia (m) | Andosol | Luvisol | Sedimento<br>Agregados | Sedimento<br>Arenas | Tepetate con<br>Carbonatos |
|------|---------------|---------|---------|------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1    | 3             | 35      | 15      | 50                     | 0                   | 0                          |
| 2    | 3             | 0       | 0       | 30                     | 70                  | 0                          |
| 3    | 3             | 0       | 10      | 20                     | 70                  | 0                          |
| 4    | 3             | 0       | 0       | 10                     | 90                  | 0                          |
| 5    | 3             | 0       | 0       | 20                     | 80                  | 0                          |
| 6    | 3             | 30      | 10      | 10                     | 40                  | 10                         |
| 7    | 3             | 20      | 60      | 0                      | 20                  | 0                          |
| 8    | 3             | 30      | 10      | 60                     | 0                   | 0                          |
| 9    | 3             | 20      | 20      | 0                      | 50                  | 10                         |
| 10   | 3             | 20      | 20      | 40                     | 0                   | 20                         |
| 11   | 3             | 0       | 10      | 70                     | 0                   | 20                         |
| 12   | 3             | 20      | 0       | 40                     | 40                  | 0                          |
| 13   | 3             | 5       | 5       | 10                     | 40                  | 40                         |
| 14   | 25            | 80      | 0       | 10                     | 0                   | 10                         |
| 15   | 25            | 40      | 10      | 30                     | 0                   | 0                          |
| 16   | 25            | 70      | 10      | 20                     | 0                   | 0                          |



**Figura 16. Rasgos micromorfológico; A= Sedimento; B= Sedimento con agregados; C=Luvisol; D=Tepetate con carbonatos. Lp= luz polarizada; Lpc= Luz polarizada cruzada.**

### 7.3. Ciudadela

Al analizar micromorfológicamente las secciones delgadas de las 10 calas ubicadas en la Ciudadela, con 2 m de profundidad aproximadamente presentaron similitudes de estructura de bloques subangulares y granular, tipo de poro cavidad, vesícula y fisura. Los poros fisura contribuyen a la consolidación de tepetates, aún cuando no se trate de una cementación ni sea el factor determinante de su carácter compacto (Rodríguez, 1999).

Además, se presentan fabricas-b indiferenciadas y moteadas, una distribución relacionada de partículas gruesas/finas enúlica y gefúrica. El sedimento 28 no presenta estructura ni distribución relacionada.

Las muestras 23, 27, 31 y 32 presentaron 10% de rasgos de tepetate con carbonatos y la muestra 29 un 35% de este tipo de materiales. La presencia de estos materiales se debe al clima semiárido en el que se encuentra la Ciudadela ya de acuerdo con Besoain (1985) En los climas áridos y semiáridos hay tendencia a que se acumulen carbonatos de calcio, hasta construir un horizonte Calcico. Cuando forman un horizonte endurecido por carbonato de calcio impenetrable por las raíces o barreno, constituyen el llamado horizonte petrocálcico.

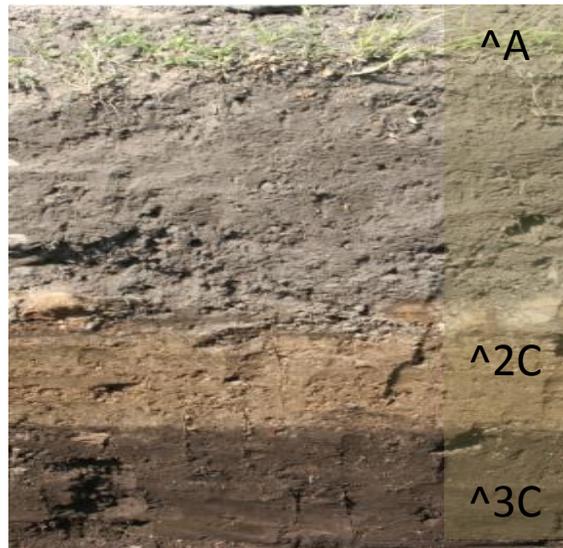
La mayoría de los autores que han estudiado a los tepetates del Eje Neovolcánico Transversal, los han reportado como diversos materiales piroclásticos con diferentes grados de alteración y coinciden en su ubicación sobre las laderas montañosas y en la erosión como una de las responsables de su existencia. Se les ha atribuido un endurecimiento tanto geológico como pedológico, por lo que no tienen un origen único (Rodríguez, 1999).

Esto demuestra que los suelos que se ubican en la Ciudadela están formados por diversos materiales (suelo/ sedimentos y tepetates con carbonatos) como se muestra en el cuadro 13, por lo que no se trata de suelos *in situ*, sino Tecnosoles, lo cuales se caracterizan de acuerdo a lo descrito con la WRB (2007), 20 por ciento o más (en volumen, promedio ponderado) contienen una cantidad significativa de artefactos (algo en el suelo reconociblemente hecho o extraído de la tierra por el hombre) en los primeros 100 cm desde la superficie del suelo o hasta roca continua o una capa cementada o endurecida, lo que esté a menor profundidad. Así mismo poseen pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, suelos con una geomembrana construida, continua, muy lentamente permeable a impermeable, de cualquier espesor comenzando dentro de los 100 cm de la superficie del suelo. Otra característica de estos suelos es el tener una roca dura que comienza dentro de los 5 cm de la superficie del suelo y cubriendo 95 por ciento o más de la extensión horizontal del suelo.

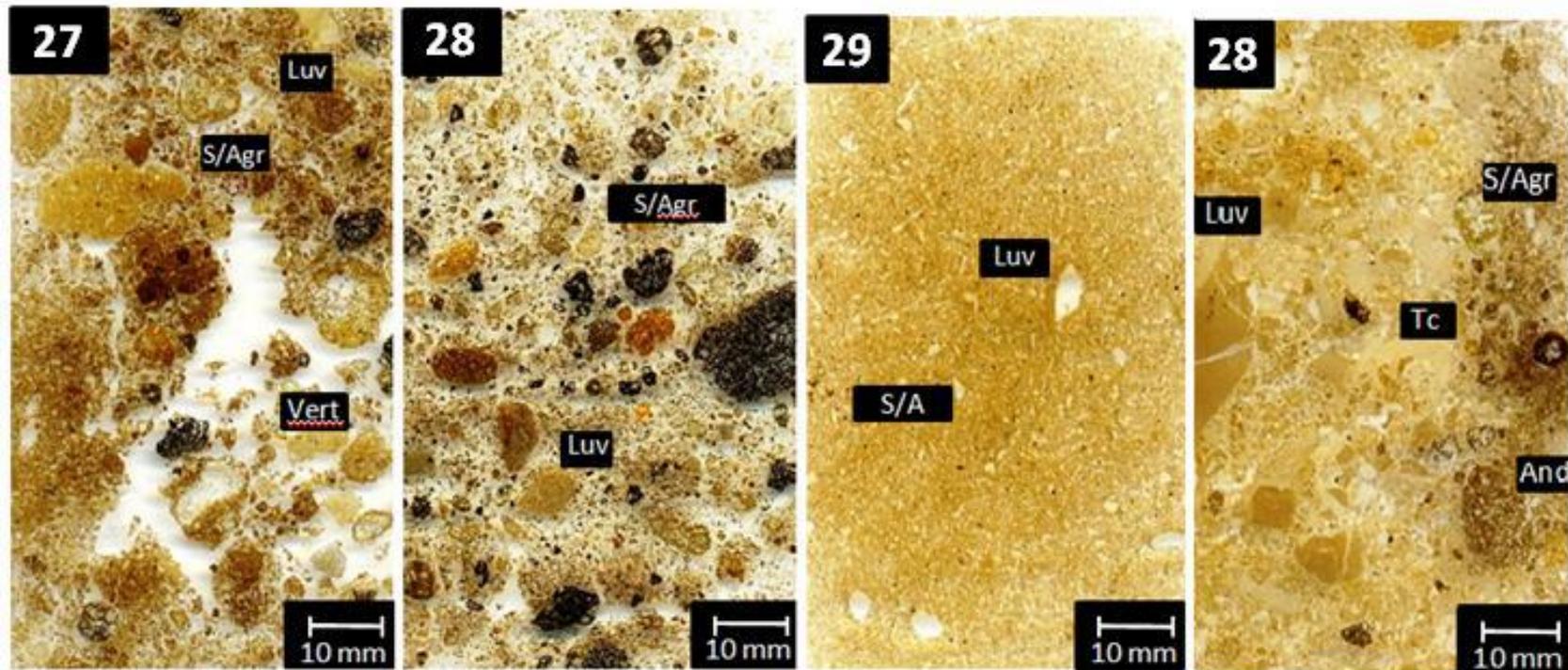
a) *Micromorfología de tepetates*

Los rasgos que más han descrito en los tepetates son los revestimientos y rellenos arcillosos (Mienlich, 1984; Oleschko *et al.*, 1992) y los diferentes cementantes, principalmente carbonato de calcio (Gutiérrez-Castorena y Ortiz Solorio, 1992).

Gutiérrez-Castorena (1998) identificó revestimientos y rellenos arcillosos gruesos en poros y grietas, además de rasgos calcínicos en formas de agujas o nódulos y rasgos amorfos de óxidos de hierro y manganeso distribuidos en la masa basal de tepetate. Los revestimientos y rellenos arcillosos son comunes en la fábrica de tepetates y llegan a ocupar hasta el 20% de la superficie total de la lámina delgada (Mienlich, 1984: y Oleschko *et al.*, 1992).

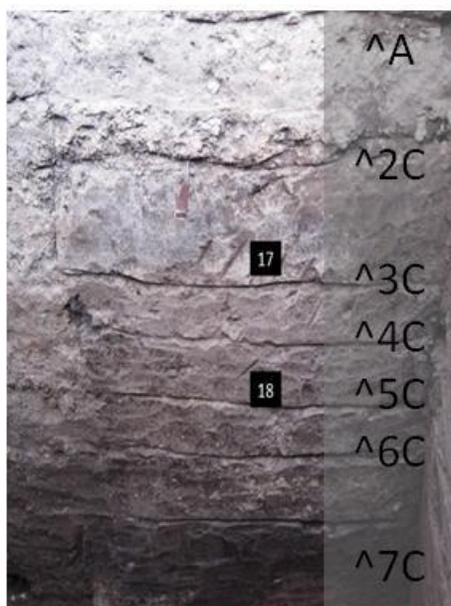


**Figura 17. Cala del exterior de la Ciudadela.**



**Figura 18. . Secciones delgadas de los suelos, rellenos y sedimentos de las muestras 27,28,29 y 30 ubicadas en la Ciudadela. (27) muestra con sedimentos, agregados y vertisol; (28) muestra con sedimentos, agregados y Luvisol; (29) muestra con sedimentos, agregados y luvisol; (30) muestra con sedimento y agregados, Luvisol, tepetate con carbonatos y Andosol.**

La cala ubicada en el exterior del túnel micromorfológicamente presenta similitudes de rasgos, tiene una estructura de bloques subangulares la cual se forma como resultados del redondeo de las raíces y de los procesos físicos de expansión y contracción de las arcillas (Brady y Weil, 1999) y granular, típico de medios biológicamente activos ricos en bases y materia orgánica (Porta *et al.*, 1994), tipo de poro empaquetamiento complejo complejo se forman como resultado del arreglo de agregados y partículas primarias (Stoops, 2003), las cuales son predominantemente compuestas por vidrio volcánico, ferromagnesianos y feldespatos. Las fábricas indiferenciadas son comunes en andosoles o en materiales de origen volcánico por la presencia de materiales organo minerales amorfos (Stoops, 2007)., fábricas indiferenciadas, una distribución relacionada de partículas gruesas/finas enáulica por el tipo de agregados que presenta.



**Figura 19. Cala en el exterior del Túnel con -2 metros de profundidad.**

**Cuadro 13. Porcentaje del tipo de suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada de la Ciudadela.**

| Muestra | Andosol | Luvisol | Sedimento Agregados | Sedimento Arenas | Tepetate con Carbonatos |
|---------|---------|---------|---------------------|------------------|-------------------------|
| 23      | 30      | 0       | 60                  | 0                | 10                      |
| 24      | 30      | 10      | 60                  | 0                | 0                       |
| 25      | 30      | 10      | 30                  | 30               | 0                       |
| 26      | 30      | 20      | 0                   | 40               | 0                       |
| 27      | 0       | 10      | 20                  | 60               | 10                      |
| 28      | 0       | 25      | 0                   | 75               | 0                       |
| 29      | 0       | 50      | 0                   | 15               | 35                      |
| 30      | 0       | 0       | 20                  | 80               | 0                       |
| 31      | 30      | 40      | 0                   | 0                | 10                      |
| 32      | 0       | 0       | 80                  | 10               | 10                      |

**Cuadro 14. Elementos fábrica de los suelos, sedimentos y tepetates en cada sección delgada de la Ciudadela.**

| Muestra | Estructura                                    | Tipo de poro               | Fábrica                  | Distribución relacionada |
|---------|---|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 23      | Fragmentos de bloques granulares              | Cavidad y fisura           | Indiferenciada           | Enáulica                 |
| 24      | Fragmentos de bloques subangulares            | cavidad                    | Indiferenciada           | Enáulica y Gefúrica      |
| 25      | Fragmentos de bloques subangulares y granular | Cavidad y fisura           | Indiferenciada y moteada | Espacio simple           |
| 26      | Fragmento de bloques subangulares             | Cavidad                    | Indiferenciada           | Enáulica y Gefúrica      |
| 27      | Fragmentos de bloques subangulares            | Empaquetamiento simple     | Indiferenciada           | Enáulica y Gefúrica      |
| 28      | Apedal  | Cavidad                    | moteada                  | Sin distribución         |
| 29      | Fragmentos de bloques subangulares y granular | cavidad                    | Indiferenciada y moteada | Enáulica y Gefúrica      |
| 30      | Fragmentos de bloques angulares               | Cavidad y fisura           | moteada                  | Gefúrica                 |
| 31      | Fragmentos de bloques subangulares y granular | Cavidad y fisura           | Indiferenciada y moteada | Diferenciada y moteada   |
| 32      | Fragmentos de bloques subangulares            | Cavidad, fisura y vesícula | Indiferenciada y moteada | Enáulica y Gefúrica      |

## 8. Análisis polínico

### 8.1. Bosque de encino ubicados en Cerro Gordo.

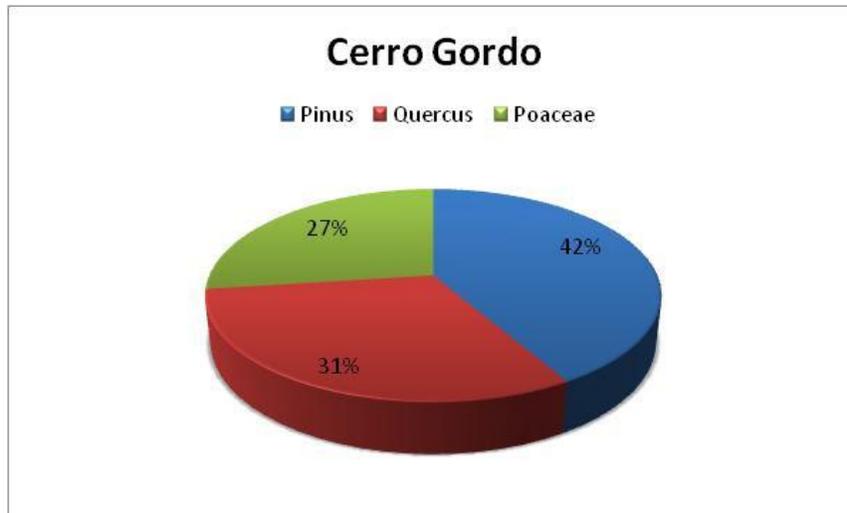
Las 13-15 láminas de muestras inalteradas del horizonte A del Bosque de encino en la cima del Cerro Gordo (Cuadro 15) presentaron polen de *Pinus* (30 granos polínicos), *Quercus* (15 granos polínicos) y Poaceae (13 granos polínicos). Los zacatonales (Poaceae) y los pinares se consideran plantas pioneras, requieren de luz y no toleran la sombra. Los encinares requieren para su germinación una capa de hojarasca y toleran la sombra, por lo que se le considera una planta de sucesión avanzada. En virtud de que la vegetación que aún está presente en el cerro Gordo es de encinar, se considera que esta es vegetación clímax.

La dominancia de los granos de polen de pino se atribuye a que estos son cuerpos higroscópicos que se liberan en marzo-abril y ayudan a formación de nubes y por lo tanto caen con las lluvias. En Cerro Gordo las lluvias son torrenciales y ocurren en mayo y junio, después de la floración de *Pinus*.

En cuanto a la menor presencia de granos polínicos de *Quercus* se debe a que los encinares emiten sus inflorescencias y por ello tienen menor capacidad de dispersión.

**Cuadro 15. Numero de granos polínicos encontrados en el horizonte A de Cerro Gordo.**

| Géneros        | Granos de polen en el horizonte A de Cerro Gordo |
|----------------|--|
| <i>Pinus</i>   | 30   |
| <i>Quercus</i> | 15   |
| <i>Poaceae</i> | 13   |



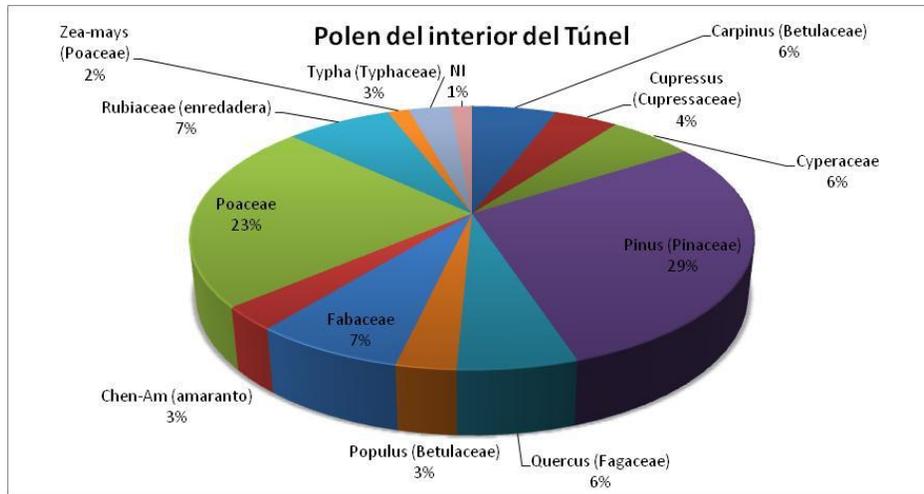
**Figura 20. Porcentaje polínico del perfil de Cerro Gordo.**

### 8.2 Interior del Túnel Tlalocan

En el túnel se muestreo en los cortes 11, 12,13, 20, y 25m, para hacer la extracción polínica. En cada muestra se montaron entre 13 y 15 láminas para observar las especies presentes en esos sedimentos e interpretar una parte de las características del paisaje de hace aproximadamente 1800 años.

**Cuadro 16. Ubicación de los granos del polen a lo largo del túnel Tlalocan.**

| Especie                         | Metro 11  | Metro 12  | Metro 13 | Metro 20 | Metro 25  |
|---------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| <i>Carpinus</i> (Betulaceae)    | 2         | 1         |          |          | 1         |
| <i>Cupressus</i> (Cupressaceae) |           | 3         |          |          |           |
| Cyperaceae                      | 2         | 12        |          |          |           |
| <i>Pinus</i> (Pinaceae)         | 6         |           | 3        |          | 10        |
| <i>Quercus</i> (Fagaceae)       |           |           |          |          |           |
| <i>Populus</i> (Betulaceae)     |           | 2         |          |          |           |
| Fabaceae                        |           |           |          |          | 5         |
| Cheno-Am (amaranto)             |           |           |          |          | 2         |
| Poaceae                         | 5         |           |          | 1        | 10        |
| Rubiaceae (enredadera)          |           | 3         |          | 1        | 1         |
| <i>Zea-mays</i> (Poaceaea)      |           | 1         |          |          |           |
| <i>Typha</i> (Typhaceae)        | 2         |           |          |          |           |
| NI                              |           |           |          |          | 1         |
| <b>TOTAL</b>                    | <b>17</b> | <b>22</b> | <b>3</b> | <b>2</b> | <b>30</b> |



**Figura 21. Porcentaje de los granos de polen encontrados en el interior del túnel**

La especie arbórea más abundante fue *Pinus* (pino) con 28%, y en porcentajes menores: Betulaceae (*Carpinus*) que son pequeños árboles con 6%, *Cupressus* (cípres) 4%, *Quercus* (encino) 4%, *Populus* (álamo) 3%.

En cuanto a la vegetación herbácea, se encontró Poaceae (gramínea) con 23% *Rubiaceae* (enredaderas o hierbas) con 7%, Fabaceae (leguminosa) con 7%. También se encontraron algunos granos de polen asociados a cultivos que pueden pertenecer a *Chenopodium* (quelite) y *Amaranthus* (alegría) con 3%, y *Zea-mays* (maíz) con 1%.

En menor proporción se encontró ejemplares de vegetación acuática como *Typha* (espadaña) 2% y Cyperaceae (tule) (figura 22).

En general, la presencia del material polínico fue muy escasa. Esto se debe probablemente a la presencia de grandes cantidades de cristales de silicio presentes en todas las laminillas de polen. El silicio ocurre con mayor presencia en cenizas de origen volcánico y rompe la estructura del polen ya que no permite su preservación.

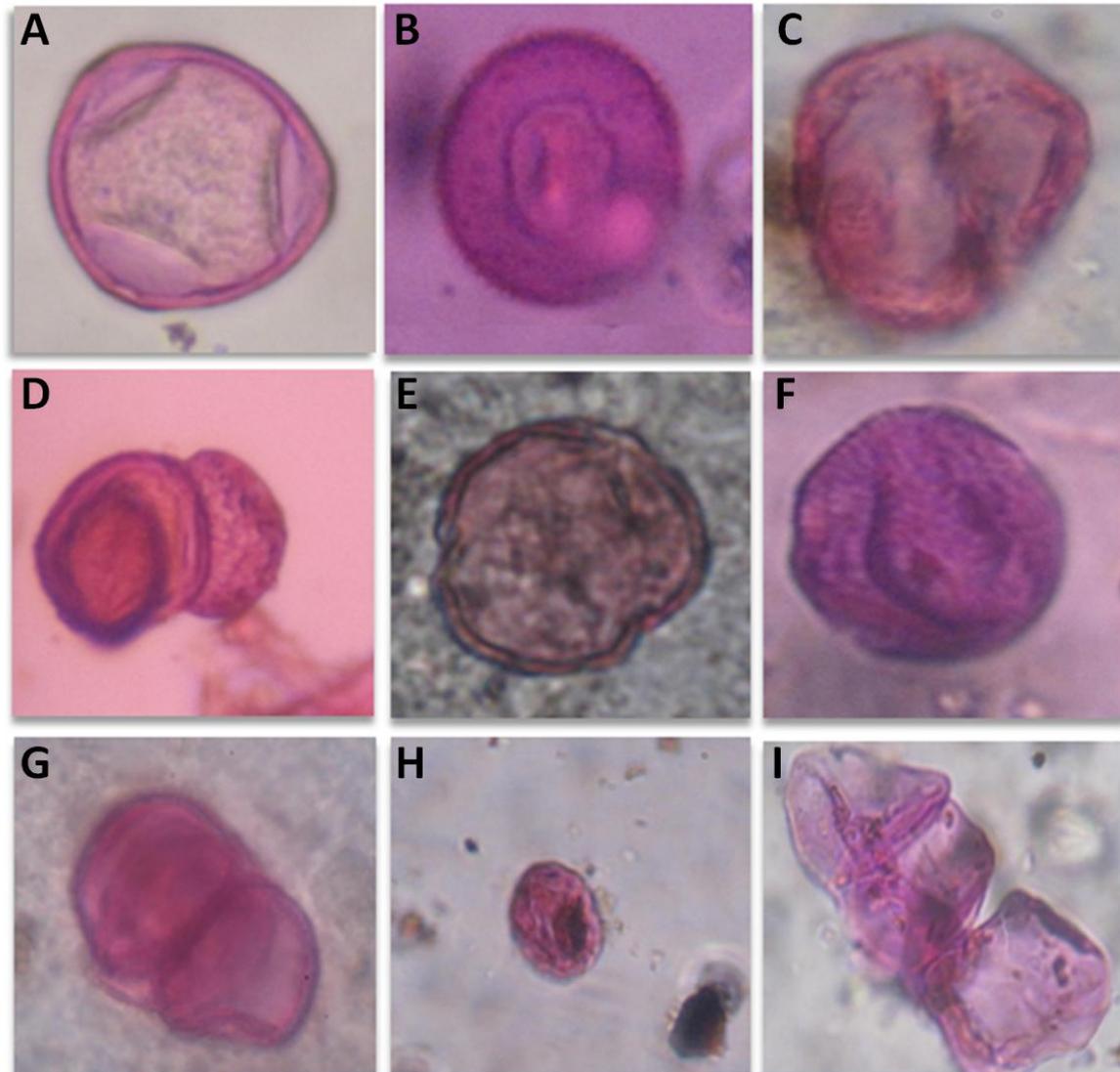
Tampoco se favoreció la presencia del polen en sedimentos de grano grueso ya que conjuntamente con el silicio actúan como agentes erosivos y de fragmentación de los granos de polen.

A pesar de lo anterior, fue posible observar la presencia de palinomorfos que aportan cierta información sobre la vegetación circundante del sitio arqueológico en estudio. Por ejemplo, la presencia del polen de árboles como *Pinus*, y *Cupressus*, denotan un tipo de vegetación de bosque templado. Este tipo de vegetación solo se localiza actualmente en la

parte más alta del Cerro Gordo, como vegetación nativa, aunque también se ha reportado en la Sierra de Patlachique, Sierra de Pachuca y en la Sierra Nevada. Es altamente probable, que la vegetación de bosque sobre Andosoles se haya localizado cerca de Teotihuacán en las primeras fases, y después con el incremento de la población, gran cantidad de recursos fueron utilizados, desde suelo, madera lo que generó procesos de degradación del ambiente.

La presencia de especies vegetales como *Thypha*, *Cyperaceae* y *Populus* muestra que había cuerpos de agua (posiblemente en margen norte del Lago de Texcoco, manantiales y ríos cercanos), cuando este ocurría en su máxima extensión. En general la presencia de *Pinus*, *Cupressus*, *Populus* y *Carpinus*, denotan un bosque húmedo y semifrío.

La presencia de polen de gramíneas denota zonas de pastizales y/o vegetación acompañante de bosques Pino-Pastizal.



**Figura 22. Polen; A= Betulaceae 100X; B= *Cupressus* 100X; C=Cyperaceae 100X; D=*Pinus* 40X; E=*Quercus* 100X ; F=Populus 100X; G=Fabaceae(poliada) 100X;I=Cheno-am 40X; J=Poaceae (3 granos) 100X.**

## 9. DISCUSIÓN GENERAL

La descripción del perfil junto con los análisis químicos, físicos y micromorfológicos indican que los suelos de los bosques relictos de encino de la montaña sagrada de los Teotihuacáanos (Cerro Gordo), presenta propiedades ándicas de acuerdo con la Soil Survey Staff, (1999) ya que presentan una relación  $Al + \frac{1}{2} \% Fe$  mayor de 2, propiedades vítricas con alto contenido de vidrio volcánico (>5%) y densidad aparente de  $0.9 \text{ gcm}^{-3}$ . Tiene una relación molar Si/Al de 2:1, lo que indica una composición de alófano (Wada, 1989). Este mineral amorfo se forma en concentraciones medianas a altas de hidronio en sistemas húmedos o muy mojados, mediante la intemperización rápida de cenizas volcánicas no cristalinas, hasta un punto limitado, por la intemperización rápida de los feldespatos (Buol, 1996).

Los procesos pedogenéticos que ocurren en este suelo de acuerdo con Bockheim y Gennadiyev, (2000), andosolitización y melanización se deben a la formación de materiales amorfos y alto contenido de materia orgánica (5.6), baja saturación de bases (44-60), lo cual además está relacionado con los pH fuertemente ácidos (4.2 a 6.1); por lo cual este suelo se clasificó como Andosol umbrico (WRB, 2007)

El INEGI (2012) reporta que los suelos dominantes reportados en el área de estudio son Faeozems (C), que son suelos de pastizales. De acuerdo con la WRB (2007) no deben presentar propiedades ándicas (vidrios volcánicos y materiales amorfos) sin embargo el tipo de suelo de la cima de Cerro Gordo es de un Andosol que se encuentra confinado geomorfológicamente. Krasilnikov *et al.* (2013), indican que estos suelos son fácilmente degradables y que pierden sus horizontes hasta exhibir los materiales parentales. Además, mencionan que estos suelos se localizan en la parte superior de los cerros o de las montañas del estado de México y Tlaxcala, en las regiones más bajas se ha degradado debido al alto grado de erosión ocasionada por actividades humanas.

En cuanto a los análisis polínicos se obtuvo que la especie predominante es *Pinus* y en menor proporción *Quercus* y *Poaceae*.

Con los resultados obtenidos de la caracterización física y química de los suelos, se concluye que el túnel fue rellenado tanto por los teotihuacanos, como por procesos naturales, ya que destacan los sedimentos eólicos, fragmentos de tepetate, sedimentos aluviales, suelos de tipo luvisol y suelos con las mismas propiedades ándicas que posee el suelo de la cima de Cerro Gordo, esto es una relación  $Al + \frac{1}{2} \% Fe$  mayor de 0.3 a 0.6. La relación molar de Si/Al de 2:1, indica una composición de alófono (Wada, 1989).

Al analizar el tipo de polen colectado en el túnel, se encontró que la especie arbórea más abundante era de *Pinus* y en menor proporción *Quercus*, *Carpinus*, *Cupressus* y *Populus* lo que fortalece la hipótesis de que la vegetación que circundaba la ciudad de Teotihuacán pertenecía a un bosque de clima templado húmedo frío.

Por lo anterior se encuentra una similitud del tipo de suelo y vegetación entre Cerro Gordo y el suelo introducido en el interior del túnel.

En cuanto al suelo proveniente de la Ciudadela está formado por sedimentos, tepetates y fragmentos de diferentes tipos de suelo, por lo que no se trata de suelos *in situ*, sino Tecnosoles, los cuales se caracterizan de acuerdo a lo descrito con la WRB (2007) donde el 20 por ciento o más contienen una cantidad significativa de artefactos. Así mismo poseen pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, roca dura que comienza dentro de los 5 cm de la superficie del suelo y cubriendo 95 por ciento o más de la extensión horizontal del suelo.

## 10. CONCLUSIONES

- ✚ El origen de los materiales utilizados en el interior del túnel son de diversas fuentes; sedimentos aluviales, sedimentos eólicos, suelos; Andosol, Luvisol, por lo que el interior del túnel fue rellenado por los teotihuacanos y sellado por procesos naturales como deslaves.
- ✚ El suelo de Cerro Gordo es un Andosol el cual tiene similitud de rasgos micromorfológicos y propiedades químicas con el suelo que se encontró en el interior del túnel, lo que fortalece un sellado por deslave.
- ✚ La vegetación de coníferas y encinos (por polen), así como la presencia de suelos con características de Andosoles, indican que en las primeras fases de la civilización Teotihuacanos, el ambiente era de bosques de clima templado-frío.
- ✚ Los suelos que se encuentran en la Ciudadela fueron hechos por los Teotihuacanos debido a que fueron formados por rellenos de materiales finos de diferente naturaleza, además de la presencia de artefactos como fragmentos de cerámica y pisos técnicos.

## 11. LITERATURA CITADA

- Adderley, P., Simpson, I., Davidson, D. 2005. Historic landscape management: a validation of quantitative soil thin-section analyses. *Journal of Archaeological Science* 33 (2005) 320-334 pp.
- Altemüller, HJ, 1964. Die anwendung des Phasenkontrastverfahrens bei der Untersuchung von Bodendünnschliffen, in *Soil Micromorphology*, A. Jongerius (editor), Elsevier, Amsterdam.
- Amillas, P. 1964. *Prehistoric Man in the New World*, Chicago, The University of Chicago Press Northern Mesoamerica”, en Jennings, J.D. y E. Norbeck (eds.). 291-232 pp.
- Barba, L. 1995. El impacto en la paleogeografía de Teotihuacán. Tesis Doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. División de Estudios de Posgrado. UNAM.
- Barba, L. 2012. *Materiales y energía en la arquitectura de Teotihuacán*, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México
- Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). 2007. [www.fao.org/docrep/011/a0510s00.htm](http://www.fao.org/docrep/011/a0510s00.htm)
- Beach, T, Dunning N, Luzzadder-Beach S., et al . 2006. Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands. *Catena* 65. 166 – 178 pp.
- Bertaux, J. & Quantin, P. 1994. Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d’une séquence d’altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (Mexique). *Transactions of the 15<sup>th</sup> International Congress of Soil Science*, Vol 5, Acapulco, México. 232-234 pp.
- Besoain, E. 1985: *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura, San José, Costa Rica. 597 p
- Borejsza, A., Rodríguez-López, I., Frederick, C.D., Bateman, M.D., 2008, Agricultural slope management and soil erosion at La Laguna, Tlaxcala, Mexico. *Journal of Archaeological Science* 35, 1854-1866 pp.
- Brady, N., & R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 12<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 881 p
- Bockheim, J.G., Gennadiyev A.N. 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma* 95: 53–72 pp.
- Bullock P., Federoff N., Jongerius A., Stoops G., & Tursina, T. 1985. Handbook for soil thin section description. Wayne Research Publications, England
- Buol, S.W., Hole F.D., McCracken R.J. 1973 Génesis y clasificación de suelos. Editorial Trillas, S. A. México.
- Cabrera, R., Cowgill G., Sugiyama S., 1991. El Proyecto Templo de Quetzalcoatl y la práctica a gran escala del sacrificio humano. In Amalia Cardós de Méndez (coord.), *Época clásica: nuevos hallazgos, nuevas ideas*, México, Museo Nacional de Antropología e Historia, 123-146 pp.
- Cabrera, R. & Cabrera O., 1993. El significado calendárico de los entierros del Templo de Quetzalcoatl, en Ma. Teresa Cabrero (coord.), *II Coloquio Pedro Bosch-Gimpera*, México, IIA-UNAM: 271-297 pp.
- Cajuste, L.J., & J. Cruz, D. 1987. Presencia de materiales amorfos en algunos tepetates de la Zona de Influencia Chapingo. *Uso y manejo de los tepetates para el Desarrollo Rural*. Chapingo, México. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Calderon de Rzedowski, G. & J. Rzedowski, J. 2001. Flora fanerogámica del Valle de México. CONABIO, Instituto de Ecología A.C., Patzcuaro. México
- Chadwick O. A., Hendricks D. M., and Nettleton W. D. 1987. Silica in Duric Soils: II. Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal* (51): 982-985 pp.
- Chaplot, V., C. Walter, P. Curmi and A. Hollier-Larousse. 2000. The use of auxiliary geophysical data to improve a soil-landscape model. *Soil Science*. 165:961–970 pp.
- Cuanalo de la C., H.E. 1975. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Dixon, J.B. 1989 Kaolinite and Serpentine group minerals. In J.B Dixon and S.D Weed (editors), *Mineral in Soil Environments* 2<sup>nd</sup> ed. Soil science society of América, Madison, Wi.
- Etchevers B., J. D., C. Zebrowski, C. Hidalgo M., & P. Quantin. 1992. Fertilidad de los tepetates II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala (México). *Terra* 10:385–391pp.
- E-Local (2012). URL: <http://www.e-local.gob.mx>

- Fisher, C. T., Polland H. P. Israde-Alcantara I, Garduño V. H. and Benerjee S. 2003. A reexamination of human-induced environmental change within the Lake Pátzcuaro Basin, Michoacán, Mexico, *Proc. of the National Academy of Sciences*, 100:8. 64 p.
- Fitzpatrick E. 1984 *Suelos, su formación, clasificación y distribución*, compañía editorial continental, México.
- Fitzpatrick E. 1996. *Introducción a la Ciencia de los suelos*. Editorial trillas, Mexico
- Foth, H.D. & Turk L.M. 1980. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. 4ª ed. México. 356 p.
- Galindo, J. 1994. *Un análisis arqueoastronómico del edificio circular Q152 de Mayapán*. Instituto de Astronomía, UNAM.
- Gibson, Ch. 1996. *Los aztecas bajo el dominio español, 1519-1810*: Editorial Siglo XXI, 13ª edición, México, D.F.
- Gómez, S. & Gazzola, J. 2005. *Proyecto de Investigación y Conservación del Templo de La Serpiente Emplumada, Teotihuacán, México*. Informe final de los trabajos de campo de junio a Octubre 2002. Archivos Técnicos de la Coordinación Nacional de Arqueología, México.
- Gómez, S. 2010. *Proyecto de Investigación y Conservación Del Templo de La Serpiente Emplumada, sub proyecto Tlalocan camino bajo la tierra, la exploración del túnel bajo el templo de la serpiente emplumada, teotihuacán, México (planteamiento de investigación)Teotihuacán, México*.
- Goldberg, P. & Berna, F. (2010). *Micromorphology and context*. *Quaternary International*,
- Gutiérrez C., M.C. 1988. *Estudio micromorfológico de los Cementantes de algunos Tepetates del valle de México y Tlaxcala*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados.
- Gutiérrez Castorena, Ma del C, S. Gómez Chávez, *et al.* 2009. *Micromorphology of the sediments of primary hydraulic system in Teotihuacán: phase Patlachique 200 B.P.* *Micromorfología para la investigación paleopedológica y geoarqueológica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gutiérrez Castorena., Ma. del C., C. A. Ortiz Solorio. 1992. "Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México". *Terra* Número Especial 10: 202-209 pp. .
- Heine, K. 2003. Paleopedological evidence of human-induced environmental change in the Puebla-Tlaxcala are (México) during the last 3,500 years. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20:235-244 pp.
- Heyden, D. 1973. "Un Chicomostoc en Teotihuacán. La cueva bajo la Pirámide del Sol". *Boletín INAH*, época II, 6:3-16 pp.
- Herbman, R 1992. *Untersuchungen verhärteter vulkanascheböden (tepetate) in den Becken von, Mexico in Tlaxcala (México)*, Bericht für die kommission der Europäischen Gemeinschaft, Paris, Gieben.
- Ibarra, E. & Fernández, B. 2012 *El estudio del polen antiguo: problemas y estrategias en el laboratorio*. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 15(1). 62-66 pp.
- INEGI (2012). URL: <http://www.inegi.org.mx/>
- Krasilnikov, P. Ma del C. Gutierrez-Castorena, B. Ahrens, C. Cruz Gaistardo, S. Sedov & E. Solleiro R. 2003. *The soils in Mexico*. Springer Verlag.
- Levine, E. 2001. *Soil forming factors*. NASA. Goddard Space Flight Center.
- Lorenzo, J. 1968 *Clima & Agricultura en Teotihuacán*. En Lorenzo, ed., *Materiales para la Arqueología de Teotihuacán, Serie Investigaciones, INAH*, No. 17: 51-72. México, D.F. 90 p.
- Macphail, R. & Goldber, P. 2006. *Practical and theoretical geoarchaeology*, Blackwell Science Ltd.
- Manzanilla, L., 1993 (ed.) *Anatomía de un conjunto residencial Teotihuacáno en Ozttoyahualco*, 2 volúmenes, México, UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Matos, E. 1990. *Teotihuacán la metrópoli de los dioses*. Barcelona Lunweg Editores.
- Millon, R. 1981. *Teotihuacán, city, state and civilization*. In: Bricker, VR & Sabloff, JA (eds) *Supplement of Handbook of Middle American Indians*. Volumen I. Archaeology. University of Texas Press, Austin. 198-243 pp.
- Millon, R. 1992. *Teotihuacán Studies: From 1950 to 1990 and Beyond*. In. Berlo J.C (ed.): *Art, Ideology, and the City of Teotihuacán*. Washington, DC: Dumbarton Oaks, Trustees for Harvard University. 339-419 pp.

- McClung de Tapia, E. 1977. Recientes estudios paleoetnobotánicos en Teotihuacán México. *Anales de Antropología, México*. Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 132 p.
- McClung de Tapia, E. 1980. Interpretación de restos botánicos procedentes de sitios arqueológicos. *Anales de Antropología, México*. Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- McClung de Tapia, E. 1988. Agricultura y la formación del estado Teotihuacan. *Anales de Antropología, México*. Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- McClung de Tapia E., Solleiro E., Gama-Castro J., Vilalpando J., Sedov S. 2003. Paleosoils in the Teotihuacán valley, Mexico: evidence for paleoenvironment and human impact. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20:3:270-282 pp.
- Millon R., Drewitt B, Cowgill G., 1973. Urbanization at Teotihuacán. V.I The Teotihuacán map. Part 2. University of Texas Press, Austin.
- Mooser, F. 1968 Geología. Naturaleza y desarrollo del Valle de Teotihuacán. En Lorenzo (ed), *Materiales para la Arqueología de Teotihuacán*, INAH. Serie Investigaciones No 29-37.
- Moreno, C. 1985. Mineralogía de las Arenas. UAAN, Saltillo, Coah. México.
- Murphy, C.P. 1986. Thin section preparation of soils and sediments. AB Academic Publishers. Great Britain. NASTA (2012) URL: [Http://soil.gsfc.nasa.gov/pyg/factors.htm](http://soil.gsfc.nasa.gov/pyg/factors.htm).
- Ortiz S. C.A. 1999. Los levantamientos etnoedafológicos. Tesis, Doctor en Ciencias, Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Pacheco, L., M.C Estrada B. 1987. Cartografía y caracterización mineralógica de los Tepetates del Oriente del Valle de México. *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Chapingo, México. Universidad Autónoma de Chapingo. 31-37 pp.
- Pape, P. 1992. Principles of petrology. International training Center. Ghent Belgium.
- Pape, Th., & D. Lager. 1995. Manual for soil description and classification. Departament of soil Science and Geology. Wageningen, Neherlans
- Peña H., & Zebrowsky C. 1992. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada. México. *Terra* 10: 155-164 pp.
- Poetsch T, Kyriakos A, 1996 The micromorphological Appearance of free silica in some soils of volcanic origin in central Mexico. *III Simposio Internacional* (Quinto, diciembre de 1996) Ecuador.
- Rivera-Uria Y., Segov S., Solleiro-Rebolledo E., McClung E., Pérez-Pérez J., Gonzalez A., Gama-Castro J., 2007. Degradación ambiental en el valle de Teotihuacán: evidencias geológicas y paleopedológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 59:2:203-207pp.
- Rodríguez, S., 1999. Procesos de intemperismo en tepetates y su influencia en la formación de suelos. Tesis de maestría. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo de México.
- Sáenz C. 1978. Polen y esporas H. Blume, Madrid.
- Vera, M., Sierra, Diez, M, Sierra, Diez, Martinez A. Martinez F,J & Aguilar J 2007. Deforestation and land use effects on micromorphological and fertility changes in acid rainforest soil in Venezuela Andes. *Soil and Tillages Research* 84:183-194 pp.
- Sanders, W.T. 1965. The Cultural Ecology of the Teotihuacán Valley. Pennsylvania State University. 189 pp.
- Sedov, S., Sánchez S., Solleiro E., & Golyeva, A. 2012. Polygenetic soils and Pedosediments of Teotihuacán (México). micromorphological effect of landscape and human impact during prehispanic occupation. *14 th International Working Meeting on soil Micromorphology*. Leida España.
- Sedov S., Rivera & Solleiro R, E. 2009. Holocene paleoecology of Teotihuacán . Mexico: micromorphological evidences from alluvial paleosols and pedosediments. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten Serie D. Physische Geographie* 30: 123-131 pp.
- Soil Survey Staff. 1994. Claves para la taxonomía de suelos. Trad. Carlos A. Ortíz S., C.A y Ma del C. Gutiérrez C. Publicación especial no 3
- Stoops, G & J. Devigne. 1990. Morphology of Mineral Weathering and Neofomation. II. Neofomations. In: Douglas L.A. (ed). *Soil Micromorphology: a Basic and Applied Science. Developments in Soil Science*, Elsevier, New York.
- Stoops, G. 1993. Lectures Note. International Training Center, University of Ghent, Belgium.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, WI.
- Stoops & Mees, 2010. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier Science.

- Sugiyama, S. 2004, Governance and Policy at Classic Teotihuacán. In Hendon J. & Rosemary A. J. (Eds). *Mesoamerican Archaeology: Theory and Practice*, Blackwell Publishing, Oxford. 97-123 pp.
- Sugiyama, S., & Cabrera R. 2003, Viaje al centro de la pirámide de la Luna: descubrimientos recientes en Teotihuacán. En: *Viaje al centro de la Pirámide de la Luna. Recientes descubrimientos en Teotihuacán*, Coedición CONACULTA-INAH, Universidad Estatal de Arizona, 8-10 pp.
- Vera, M., Sierra, M., Díez, M., Sierra, C., Martínez A., Martínez F. J. y Aguilar, J. 2007. Deforestation and land use effects on micromorphological and fertility changes in acidic rainforest soil in Venezuelan Andes. *Soil & Tillage Research* 84: 184-194 pp.
- Van Reeuwijk, L.P. 1973. Procedures for soil analysis. Tech. Pap. No 9 4<sup>th</sup> Ed. ISRIC, Wageningen, Netherlands.
- Wada, K., 1977. Allophane and imogolite. In *Mineral of soils Environments*. Soil Sci, Society of America. Inc, Madison
- Wada, K., 1985. Distintive properties of Andosols. En: *Advances in Soil Sci*. Springer Verlag. New York Inc.
- Zebeowski C, Quantin P, Trujillo G. 1996. Suelos volcanicos endurecidos, III simposio Internacional
- Zevenbergen, C., Bradley, J.P., Van Reeuwijk, L.P., Shyam, A.K., Hjelmar, O. & Comans, R.N.J. 1999. Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash. *Env. Sci. & Tech.*, 33(19): 3405-3409.