



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA**

**PROCESOS EDÁFICOS EN  
ANDOSOLS EN UNA CATENA EN  
EL MONTE TLÁLOC: ESTUDIO  
MULTIESCALAR.**

**EUNICE LUCERO GALVÁN DÍAZ**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2021**

La presente tesis titulada: **Procesos edáficos en Andosols en una catena en el monte Tláloc: estudio multiescalar** realizada por la alumna: **Eunice Lucero Galván Díaz**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)

\_\_\_\_\_  
DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR (A)

\_\_\_\_\_  
DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESOR (A)

\_\_\_\_\_  
M. EN C. PATRICIO SÁNCHEZ GUZMÁN

ASESOR (A)

\_\_\_\_\_

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2021

# PROCESOS EDÁFICOS EN ANDOSOLS EN UNA CATENA EN EL MONTE TLÁLOC: ESTUDIO MULTIESCALAR

Eunice Lucero Galván Díaz, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021.

## RESUMEN

El concepto de catena en las Ciencias del Suelo, se define como una secuencia de suelos a lo largo de una ladera, que se asocian por un mismo material parental, pero difieren por efectos de geomorfología y drenaje. La catena es útil como una unidad de estudio, para comprender cómo determinados factores ambientales y condiciones del paisaje, tienen efectos diferentes entre los suelos, en una escala de variabilidad espacial relativamente pequeña. Aunque son frecuentes los estudios sobre secuencias climáticas, topográficas e incluso cronológicas de Andosols, no existen estudios al respecto en los suelos del volcán Tláloc; lo que incentiva a generar información que aumente el conocimiento de los suelos de la Sierra de Río Frío y sea útil para una mejor conservación. El objetivo principal de este trabajo fue estudiar las propiedades de los suelos de una catena en el monte Tláloc, a través de diferentes escalas de observación: de paisaje, por medio de la caracterización ambiental de la zona; de perfil, mediante el análisis de las propiedades e identificación de procesos de cada uno de los suelos y microscópica, con la descripción micromorfológica de los suelos. Se seleccionaron siete perfiles en posiciones altitudinales y tipos de vegetación diferentes: pastizal alpino, bosque de oyamel, bosque mixto y bosque de encino, así como condiciones de relieve distintas; en una zona cuya geología se compone de tefras andesíticas y dacíticas y un clima semifrío subhúmedo, con precipitación anual de 972 mm y temperatura media de 9.8°C. Cada sitio se caracterizó ambientalmente, se describió un perfil de suelo, se determinaron en el laboratorio sus propiedades físicas y químicas, y micromorfológicas de las secciones delgadas. Las diferencias entre sitios están relacionadas con sus propiedades químicas (CO, N, pH y CIC), sobre todo entre suelos con pastizal y bosque de oyamel de mayor elevación. En las descripciones micromorfológicas, se reconocieron similitudes en el patrón de distribuciones relacionadas en las fábricas de los suelos de bosque: relaciones porfídicas y quitónicas a enáulicas con estructuras de bloques subangulares a granulares, así como diferencias en el tamaño y desarrollo de la estructura y formas y abundancia de la materia orgánica en los horizontes superficiales. Por otro lado, se observaron pedorrasgos asociados con procesos de gleyzación y congelamiento en los suelos de los perfiles 1 y 2 respectivamente; lo cual muestra que la baja temperatura y poco drenaje, son condicionantes en los suelos de pastizal de este sitio. El análisis de regresión lineal múltiple de las covariables ambientales seleccionadas, indicó que el grado y forma de la pendiente, son los factores más influyentes en las propiedades ándicas de los Andosols; principalmente en la retención de fosfatos y los cationes activos del suelo. Finalmente, el desarrollo de los Andosols en general, es moderado, justificado por la abundancia de las distribuciones quitónicas sobre minerales primarios y los valores más bajos que los parámetros de las propiedades ándicas.

**Palabras clave:** Andosols, propiedades ándicas, gradiente topoclimático, drenaje, micromorfología.

# EDAPHIC PROCESSES IN ANDOSOLS IN ONE CATENA IN THE MOUNT TLÁLOC: MULTISCALE STUDY

Eunice Lucero Galván Díaz, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021.

## ABSTRACT

The catena concept for Soil Science, is defined as a soil sequence along a slope, which are associated by a same parent material, but differ by effects of geomorphology and drainage. The catena is useful as a study unit, for understand how particular environmental factors and landscape conditions, have different effects between the soils on a scale of spatial variability relatively small. Although are frequent the studies of climatic, topographic and even chronological sequences of Andosols, do not exist studies about the soils of volcano Tláloc; which motivates to produce information that increases knowledge of soils of the Sierra de Río Frío and be useful for better conservation. The main aim of this work was study the soils properties of a catena on Mount Tláloc, through different scales of observation: landscape, through of environmental characterization of the zone; profile, through of analysis of the properties and identification of processes of each of the soils and microscopic, with the micromorphological description of soils. Seven profiles were selected in both altitudinal positions and types of vegetation different: alpine grassland, coniferous forest, mixed forest and oak forest, as well as different reliefs; in a zone whose geology consists of andesitic and dacitic tephra and a subhumid semicold weather, with annual rainfall of 972 mm and average temperature of 9.8°C. Each site was environmentally characterized, one soil profile was described, its physical and chemical properties were determined in the laboratory, and micromorphologicals of thin sections. The differences between sites are related to their chemical properties (OC, N, pH and CEC), mostly between soils of grassland and coniferous forest of highest elevation. In the micromorphological descriptions, similarities were recognized in the pattern of related distributions on fabrics of forest soils: porphydic and chitonic to enaulic relations with subangular blocks to granular structures; as well as differences in the both size and development of the structure and shapes and amount of superficial horizons organic matter. On the other hand, pedofeatures were observed associated with gleization and freezing processes on the soils of profiles 1 and 2 respectively; which shows that the low temperature and little drainage, are determinants on the grassland soils in this site. The multiple linear regression analysis of the selected environmental covariates, showed that the slope degree and shape, are the factors more outstanding on the andic properties of the Andosols; mainly in the phosphates retention and active cations of the soil. Finally, the Andosols development in general, is moderate, justified for the affluence in the chitonic distributions on primary minerals and the lower values that parameters of andic properties.

**Keywords:** Andosols, andic properties, topoclimatic gradient, drainage, micromorphology.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a mis asesores en la construcción y orientación de este trabajo de tesis, así como el constante apoyo del personal de laboratorio de las Áreas de Génesis y Clasificación de Suelos y Física de Suelos de Edafología, y los compañeros que brindaron su presencia y apoyo en el trabajo de campo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca concedida para posibilitar mis estudios de Maestría y el desarrollo de esta investigación.

Al Colegio de Postgraduados, particularmente al área de Edafología del campus Montecillo por permitirme la oportunidad de realizar mis estudios y progresar profesionalmente dentro de su programa.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE CUADROS .....	x
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO: ESCALA DE PAISAJE .....	4
1.1 RESUMEN .....	4
1.2 ABSTRACT .....	4
1.3 INTRODUCCIÓN .....	5
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
1.4.1 Selección del sitio de estudio.....	7
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	9
1.5.1 Geología y eventos volcánicos del monte Tláloc .....	9
1.5.2 Distribución de la vegetación .....	11
1.5.3 Condición climática .....	15
1.5.4 Relieve.....	16
1.5.5 Hidrología .....	17
1.6 CONCLUSIONES .....	18
CAPÍTULO 2. SUELOS EN LA CATENA: ESCALA DE PERFIL .....	19
2.1 RESUMEN .....	19
2.2 ABSTRACT .....	19
2.3 INTRODUCCIÓN .....	20
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
2.4.1 Metodología de campo .....	22
2.4.2 Análisis de laboratorio.....	23
2.4.3 Clasificación de los suelos.....	23
2.5 RESULTADOS.....	24
2.5.1 Descripción de los perfiles de los suelos .....	24
2.5.2 Propiedades ándicas .....	36

2.5.3 Clasificación de suelos .....	45
2.5.4 Efecto topoclimático y propiedades ándicas de los suelos .....	47
2.6 DISCUSIÓN .....	49
2.6.1 Propiedades de los suelos .....	49
2.6.2 Propiedades ándicas .....	50
2.6.3 Propiedades ándicas en la catena .....	52
2.7 CONCLUSIONES .....	53
CAPÍTULO 3. MORFOLOGÍA DE LOS SUELOS: ESCALA MICROSCÓPICA .....	54
3.1 RESUMEN .....	54
3.2 ABSTRACT .....	55
3.3 INTRODUCCIÓN .....	55
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	56
3.4.1 Secciones delgadas .....	56
3.5 RESULTADOS .....	57
3.5.1 Descripción micromorfológica de los suelos .....	57
3.5.2 Materia orgánica .....	69
3.5.3 Pedorrasgos .....	75
3.6 DISCUSIÓN .....	77
3.6.1 Morfología del suelo y materia orgánica .....	77
3.6.2 Desarrollo de los suelos .....	79
3.6.3 Micromorfología de procesos del suelo .....	80
3.7 CONCLUSIONES .....	81
CONCLUSIONES GENERALES .....	82
LITERATURA CITADA .....	84
ANEXOS .....	96
ANEXO A. Descripción de perfiles .....	96
ANEXO B. Análisis estadísticos .....	103
ANEXO C. Descripción de las secciones delgadas .....	104

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de los perfiles en el sitio de estudio. ....	9
<b>Figura 2.</b> Mapa de eventos geocronológicos del volcán Tláloc. ....	11
<b>Figura 3.</b> Distribución de la vegetación en el monte Tláloc. ....	12
<b>Figura 4.</b> Vegetación de los perfiles 1 y 2.....	13
<b>Figura 5.</b> Bosque de oyamel en los sitios 3, 4 y 5. ....	14
<b>Figura 6.</b> Bosque mixto del sitio 6 .....	14
<b>Figura 7.</b> Bosque de encino en el sitio 7.....	15
<b>Figura 8.</b> Climograma de la EC-Río Frío.. ....	15
<b>Figura 9.</b> Perfil topográfico de los sitios de muestreo. ....	16
<b>Figura 10.</b> Mapa de pendientes del sitio de estudio. ....	17
<b>Figura 11.</b> Mapa de elevaciones con patrones de drenaje del sitio de estudio. ....	18
<b>Figura 12.</b> Perfil 1. ....	24
<b>Figura 13.</b> Perfil 2 .....	25
<b>Figura 14.</b> Perfil 3. ....	26
<b>Figura 15.</b> Perfil 4 .....	27
<b>Figura 16.</b> Perfil 5 .....	28
<b>Figura 17.</b> Perfil 6 .....	29
<b>Figura 18.</b> Perfil 7 .....	30
<b>Figura 19.</b> Propiedades de los perfiles de suelos.....	34
<b>Figura 20.</b> Textura de los suelos .....	35
<b>Figura 21.</b> Propiedades ándicas de cada perfil y criterios de clasificación.....	37
<b>Figura 22.</b> Correlaciones de las propiedades ándicas en los horizontes A y B .....	44
<b>Figura 23.</b> Correlaciones entre la retención de fosfatos y los minerales amorfos .....	45
<b>Figura 24.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 1. ....	58
<b>Figura 25.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 2 .....	59
<b>Figura 26.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 3 .....	60
<b>Figura 27.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 4 .....	61
<b>Figura 28.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 5 .....	62
<b>Figura 29.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 6 .....	63
<b>Figura 30.</b> Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 7 .....	64

<b>Figura 31.</b> Componentes orgánicos del Perfil 1.....	69
<b>Figura 32.</b> Componentes orgánicos del Perfil 2.....	70
<b>Figura 33.</b> Componentes orgánicos del Perfil 3 .....	71
<b>Figura 34.</b> Componentes orgánicos del Perfil 4.....	72
<b>Figura 35.</b> Componentes orgánicos del Perfil 5.....	73
<b>Figura 36.</b> Componentes orgánicos del Perfil 6.....	74
<b>Figura 37.</b> Componentes orgánicos del Perfil 7.....	75
<b>Figura 38.</b> Pedorrasgos identificados en los perfiles. ....	76

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Secuencias de suelos relacionados topográficamente. ....	5
<b>Cuadro 2.</b> Propiedades físicas y químicas de los suelos.....	32
<b>Cuadro 3.</b> Propiedades ándicas de los suelos y criterios de clasificación.....	40
<b>Cuadro 4.</b> Clasificación de los perfiles de suelos con los sistemas de clasificación WRB y ST.....	45
<b>Cuadro 5.</b> Resultados de las ecuaciones de regresión por profundidad. ....	48
<b>Cuadro 6.</b> Resumen de los componentes de las secciones delgadas en los perfiles de suelos. ....	65
<b>Cuadro 7.</b> Ecuaciones de regresión de las variables por profundidad.....	103
<b>Cuadro 8.</b> Resultados de las pruebas ANOVA del modelo de regresión lineal múltiple. ....	103

## INTRODUCCIÓN GENERAL

El término *catena* [*sensu stricto*], en las Ciencias del Suelo, es una secuencia de suelos en diferentes posiciones de una ladera, los cuales han sido originados a partir de un mismo material parental (Dixon, 2015; Schaetzl, 2013). El concepto ha sido tan ampliado, que diferentes agrupaciones y secuencias de suelos han sido asignados como catenas, por lo que se hace necesaria la construcción y precisión de sus diferentes variantes (Borden *et al.*, 2020), como parte de la transformación constante de los paradigmas de esta ciencia.

Los suelos en cada posición de la catena, difieren entre sus características morfológicas como la forma y clase de pendiente, aspecto y orientación, y con ello en los patrones de drenaje, que determinan a su vez efectos de los movimientos de agua como la erosión, transporte y deposición de solutos y partículas del suelo (Carter y Ciolkosz, 1991; Dixon, 1986; Schaetzl, 2013). El conjunto de estos factores y procesos definirá las propiedades de los suelos en cada gradiente. El modelo de catena puede ser empleado para predecir la distribución del suelo a lo largo de la ladera y permite entender la formación del suelo como cuerpo natural en el paisaje.

Se eligió la unidad de catena para el estudio de las propiedades de los Andosols, porque permite entender cómo sus propiedades son influenciadas por la variabilidad espacial y condiciones determinadas del paisaje, en una escala relativamente pequeña. Los Andosols han sido ampliamente estudiados en diferentes gradientes climáticos, topográficos o por secuencias cronológicas (Becker *et al.*, 2019; Bockheim *et al.*, 2000; Egli *et al.*, 2003; Fauzi y Stoops, 2004). Sin embargo, este acervo es escaso en los suelos de la región y particularmente para el monte Tláloc, en donde han enfocado los estudios a la composición de la vegetación (Sánchez-González, 2004; Sánchez-González y López-Mata, 2003) o la microbiota del suelo (Martínez-Rojas, 2015) y no en todas las propiedades de los suelos.

El objetivo principal de este trabajo fue relacionar el efecto de los gradientes de vegetación, topografía y clima sobre las propiedades de los Andosols en la catena, empleando diferentes escalas de observación: paisaje-perfil-micromorfología. En el capítulo 1 se describen las características ambientales de la zona de estudio y los suelos en la catena, a partir de la literatura y el uso y construcción de mapas de temáticas

ambientales. En el capítulo 2 se analizan las propiedades químicas, físicas y ándicas de los suelos, así como el grado de desarrollo de las propiedades ándicas y la clasificación de estos de acuerdo con los sistemas WRB de la FAO y Taxonomía de Suelos de la USDA. Asimismo, se empleó el análisis de regresión multivariado para demostrar el efecto de las condiciones ambientales sobre el desarrollo de las propiedades ándicas de los suelos en la catena. Por último, en el capítulo 3 se describe la micromorfología, la constitución y papel de los componentes orgánicos y los pedorrasgos de cada perfil de suelo.

Los estudios multi-escalares de los suelos proporcionan un análisis integral de la expresión de sus propiedades e incluso el reconocimiento de los factores de variabilidad y patrones espaciales suelo-paisaje (Dongli et al., 2013; Fraccica et al., 2019; Yemefack et al., 2005). Asimismo, el uso de métodos adecuados en cada escala, contribuye a una mejor interpretación de los resultados (Deumlich et al., 2010; Dongli et al., 2017).

Cabe agregar que este estudio puede ser útil para efectos de la calidad de estos suelos en los diferentes tipos de vegetación, para un manejo y conservación adecuados. La delimitación del proyecto parte del hecho de que la caracterización obtenida de los suelos en este estudio no implica la descripción de los suelos en toda la zona, puesto que los procesos edáficos difieren incluso entre transectos cortos, lo que incentiva a generar futuros estudios de los suelos aledaños en la región.



## **OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **Objetivo general**

Estudiar las propiedades de los Andosols de una catena en el monte Tláloc, a través de diferentes escalas de observación.

### **Objetivos particulares**

1. Seleccionar a los suelos de acuerdo con el tipo de vegetación y gradiente altitudinal.
2. Evaluar y comparar las propiedades físicas, químicas y ándicas de los suelos en la catena.
3. Describir la micromorfología de los suelos.
4. Determinar el efecto del gradiente topoclimático sobre las propiedades ándicas de los suelos.
5. Clasificar taxonómicamente a los suelos de cada perfil.

### **Hipótesis**

1. Los cambios en la vegetación en la catena influyen en las propiedades ándicas de los Andosols.
2. A una mayor elevación y pendiente, habrá un mayor desarrollo de las propiedades ándicas
3. Los suelos con mayor densidad vegetal y mayor humedad, tendrán microestructuras pedales más desarrolladas y mayor porosidad.
4. El relieve es el factor con mayor efecto sobre las propiedades ándicas en este gradiente.
5. Todos los suelos pueden clasificarse como Andosols, pero son más contrastantes los suelos de vegetación diferente.

## **CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO: ESCALA DE PAISAJE**

### **1.1 RESUMEN**

En este capítulo se determinan los criterios de selección de los sitios en la zona estudio y se describen las características ambientales de cada uno de ellos con apoyo de referencias de la literatura e información geográfica, generando mapas de temáticas ambientales más específicos de los suelos en los sitios de estudio. Se identificó que las condiciones ambientales más diferentes entre los suelos fueron el tipo de vegetación (pastizal, bosque de oyamel, bosque mixto, bosque de encino), el relieve (grado y forma de pendiente) y el drenaje. En función de esta información se estableció que los suelos poseen un régimen de humedad údico y de temperatura méxico; con excepción de los suelos de pastizal con régimen de humedad ácuico y de temperatura frígido.

**Palabras clave:** catena, gradiente altitudinal, factores de formación, descripción de sitio, información geográfica.

### **1.2 ABSTRACT**

In this chapter the selection criteria of the sites in the study area are determined and the environmental characteristics of each of them are described with aid of literature references and geographic information, generating maps of environmental themes more specific to the soils at the study sites. It was identified that the most different environmental conditions between soils were the vegetation type (grassland, coniferous forest, mixed forest, oak forest), the relief (degree and shape of slope) and the drainage. Based on this information it is established that soils have a udic humidity regime and mesic temperature regime; with exception of the grassland soils with acuic humidity regime and frigid temperature regime.

**Key words:** catena, height gradient, formation factors, site description, geographic information.

## 1.3 INTRODUCCIÓN

### El concepto de catena

Para la pedología, la catena *sensu stricto* es una secuencia de suelos en diferentes posiciones de una ladera. El término fue introducido por Geoffrey Milne, en 1935, para describir las asociaciones de los suelos con el paisaje, en Uganda; él notó que los suelos cambiaban a lo largo de la cresta al valle de las laderas, variando con la topografía y su influencia en las condiciones de drenaje y sus efectos en la erosión y sedimentación (Asio, 2012; Daniels et al., 1971; Schaetzl, 2013).

El concepto ha sido empleado principalmente, para describir una cadena continua de suelos sobre una pendiente, desarrollados de un mismo material parental, pero bajo diferentes topoclimas (Schaetzl, 2013; Zonneveld, 1989). No obstante, el término ha sido aplicado a un rango de paisajes y escenarios, ampliando el límite de su definición; de tal suerte que ha sido utilizado indistintamente con el de toposecuencia (Hall, 1983).

El Cuadro 1 fue extraído de Borden et al. (2020), con la intención de exponer los términos en los que se incluye la catena y aquellos que se han utilizado indistintamente:

**Cuadro 1.** Secuencias de suelos relacionados topográficamente.  
Tomado de: Borden et al. (2020).

Toposecuencia	Secuencia de suelos de facetas específicas en una pendiente. A menudo los suelos de la toposecuencia, están ligados por transferencias de material.
Catena compuesta	Existen diferentes materiales parentales en la secuencia topográfica.
Catena transformacional	Existen diferentes patrones de intemperismo y regímenes de lixiviación.
Catena translocacional	La diferenciación topográfica de los suelos está hecha por transferencias laterales de agua, solutos y sólidos; usualmente por flujos superficiales, escorrentía o subsuperficiales, arrastre de suelo o movimientos en masa.
Hidrosecuencia	La diferenciación existe por transferencias laterales de agua ladera abajo, dando patrones diferentes de intemperismo y de regímenes de lixiviación.
Sistema de tierras	Unidad de mapeo compuesta, basada en la catena, que delimita secuencias recurrentes topográficas de recursos naturales renovables; incluyendo suelos, vegetación e hidrología.
Climosecuencia	Toposecuencias a gran escala, en que la distinción de los suelos es debido a diferencias significativas en altitud y clima. Usualmente no se perciben como una catena.

Según Zonneveld (1989), la catena no puede ser considerada una sola unidad de paisaje, porque cada suelo pertenece a una posición climatológicamente determinada; siendo más bien, una serie de unidades de paisaje. No obstante, su estudio puede adaptarse tanto a niveles de paisajes como a formas de relieve de una ladera; dependiendo de la naturaleza y tipo de geoformas (Ndyeshumba, 1995).

Los suelos de la catena no solo difieren en su morfología, también están asociados con los componentes de la pendiente como la forma, las clases de drenaje y la permeabilidad (Dixon, 2013; Schaetzl, 2013). Estos a su vez determinan los procesos de erosión, transporte y deposición de partículas del suelo; así como lixiviación, translocación y deposición de compuestos químicos, según el caso (Hall, 1983). Estos factores tendrán un peso importante sobre las propiedades de los suelos en cada posición.

### **Secuencias topográficas en Andosols**

Posterior a los trabajos de Seki en 1934, quien es considerado como pionero en el estudio de la génesis y clasificación de los suelos de cenizas volcánicas en Japón, la National Resources Section (ahora NRCS-USDA) designó a estos suelos entre 1951 como “Ando soils”; término derivado de la palabra *an* (oscuro) y *do* (suelo o tierra) (Hirai y Hamazaki, 2004). La agrupación a su propia categoría, abrió pauta a los Andosols a un amplio campo de investigación con diferentes enfoques.

La comparación de los Andosols, ya sea a diferentes gradientes climáticos, topográficos o por secuencias cronológicas, si bien no es novedosa y se ha desarrollado mayoritariamente a nivel internacional. Investigadores como Chen *et al.* (1997, 1999), Miehlisch (1991) y Parfitt *et al.* (1985), han sido precursores de estas metodologías.

Los estudios de cronosecuencias se han centrado en la génesis y evolución de los Andosols como en Delvaux *et al.* (1989), Sedov *et al.* (2003) y Yakimenko *et al.* (2007); o bien en el desarrollo de una o varias propiedades a lo largo del tiempo como van Dooremolen *et al.* (1990), Turner (2018) y Zhang *et al.* (2007). Por ejemplo, Lilienfein *et al.* (2003), compararon la formación de alófono y ferrihidrita a través de una cronosecuencia de flujos andesíticos de diferentes edades en Monte Shasta, California. Las concentraciones de alófono resultaron 68 veces más altas en suelos más viejos, mayores concentraciones de materia orgánica y una superficie específica 2.6 veces mayor que en los suelos más jóvenes, atribuida por el alófono.

Otros autores se han dirigido al estudio y comparación de las propiedades de los suelos volcánicos sobre secuencias climáticas o topográficas, como: Brocken *et al.* (2005), Chadwick *et al.* (2003), Delvaux *et al.* (2004), Djukic *et al.* (2010), Guerra-García *et al.* (2013), Jobbágy & Jackson (2010), Kerfahi *et al.* (2017), Kramer & Chadwick (2016) y Malucelli *et al.* (1999).

No obstante, pocos son los estudios a nivel nacional que han analizado a los Andosols por gradientes; un ejemplo de ello es la publicación de Galván-Tejeda *et al.* (2014), quienes evaluaron el contenido de fósforo en suelos de bosques de pino, en una cronosecuencia de suelos del centro del Cinturón Volcánico Transmexicano, registrando mayores contenidos de P orgánico, en suelos más viejos, asociados con los minerales de rango corto.

Respecto a la zona de Sierra Nevada, López-López (2014) caracterizó los suelos de diferentes posiciones altitudinales y con exposiciones de ladera distintas, en una cuenca dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Este trabajo no solo aporta en la clasificación y el estudio de Andosols en gradientes ambientales de nuestro país; además, contribuye en comprender cómo el desarrollo de las propiedades ándicas depende de procesos más específicos de los factores de formación y su interacción.

## **1.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.4.1 Selección del sitio de estudio**

Como la motivación esencial del estudio es comprender los procesos y propiedades de los Andosols, a través de la *praxis*, se eligieron suelos bajo condiciones naturales, optando por una zona de bosque próxima: el monte Tláloc. El volcán Tláloc *per se*, abarca tres municipios: Texcoco e Ixtapaluca en el estado de México y Tlahuapan en Tlaxcala (extendiéndose hasta los poblados situados al piedemonte), por lo que el estudio se restringió a una sola ladera en el municipio de Texcoco.

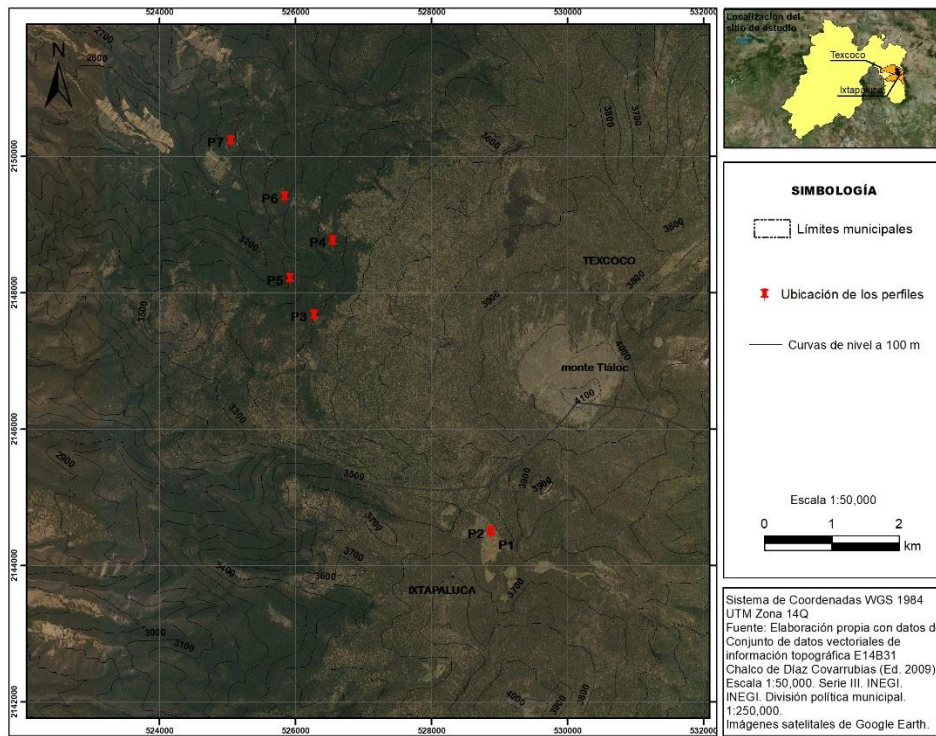
Para la acotación respecto a la elevación se apoyó de imágenes satelitales de Google Earth y el empalme de las curvas de nivel. Se identificaron diferencias en la distribución de la vegetación, de modo que la vegetación densa de bosque comienza desde los 3000 y antes de los 4000 msnm; de tal forma, el área de estudio se restringió a una elevación

de 3000 a 4000 msnm. Adicionalmente, se excluyeron las zonas del bosque que fueron afectadas por el incendio sufrido hace cuatro años (2017).

Una vez delimitada el área de estudio se ascendió al monte Tláloc, siguiendo los caminos de terracería y basándose en los afloramientos y en el reconocimiento de sus diferencias como profundidad, color y aspecto de los materiales parentales y del suelo, así como el tipo de vegetación dominante.

Partiendo de este reconocimiento, se eligieron de forma preferencial siete sitios de muestreo a altitudes diferentes, describiendo un perfil por cada uno de ellos.

<b>Perfil</b>	<b>Ubicación (UTM)</b>	<b>Elevación (msnm)</b>
1	528879,2144487	3637
2	528873,2144477	3634
3	526272,2147661	3529
4	526547, 2148749	3460
5	525918, 2148192	3334
6	525843,2149394	3299
7	525046,2150216	3096



**Figura 1.** Ubicación de los perfiles en el sitio de estudio.

La imagen satelital ilustra que los sitios se sitúan del 1 al 7, en orden descendente de elevación, siguen una orientación noroeste y se posicionan en rodales de vegetación diferentes.

## 1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.5.1 Geología y eventos volcánicos del monte Tláloc

El volcán Tláloc forma parte de los dos estratovolcanes de la Sierra de Río Frío (nombrada por Mooser *et al.*, 1974), parte a su vez de la Sierra Nevada, ubicada al centro-este del Cinturón Volcánico Transmexicano. Posee una altura de 4120 msnm con una cima relativamente plana y respecto a los depósitos volcánicos es el más antiguo de la Sierra Nevada. Está compuesto principalmente de flujos de lava dacíticos y menores cantidades de andesita, envueltos por flujos piroclásticos, bloques de ceniza y depósitos de lahar (Cadoux *et al.*, 2011; García-Tovar y Martínez-Serrano, 2011).

Cadoux *et al.* (2011), proporcionan una descripción de los eventos eruptivos ocurridos en el volcán Tláloc: los bloques de lava más antiguos que conforman a un “paleo-Tláloc” se ubican entre el Mioceno Medio y el Plioceno. Según los autores, la formación del volcán Tláloc como tal, comienza en el Pleistoceno inferior. La edad más antigua

obtenida es de 1.82 Ma, del registro de bloques de lava de  $1.82 \pm 0.04$  Ma y los depósitos de ceniza de  $1.58 \pm 0.03$  Ma, localizados hacia el NNE del volcán.

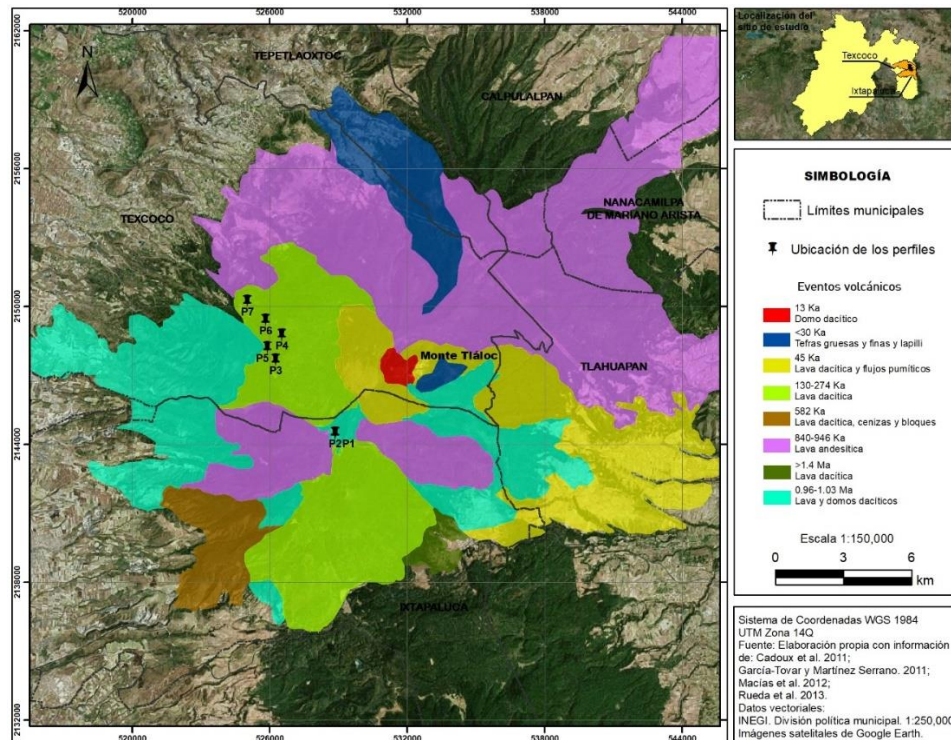
Rueda *et al.* (2013) registraron seis erupciones sub-plinianas en el volcán Tláloc, nombradas por los autores como pumita multicapa blanca (WMP), como parte de una secuencia datada en 31 ka. Estas columnas eruptivas, dispersaron ceniza hasta 12 km hacia el noreste del volcán, siendo que la última columna eruptiva colapsó generando densos flujos piroclásticos pumíticos y lahares. Estos depósitos tienen una composición riolítica y representan uno de los productos más ácidos del volcán Tláloc.

De acuerdo con Macías *et al.* (2012), los depósitos piroclásticos blancos, ubicados hacia el SE del volcán, representan la erupción explosiva riolítica más joven del volcán (25 000 años AP). Estos depósitos son nombrados como la secuencia Cuauhtémoc.

Finalmente, Cadoux *et al.* (2011) indican que los flujos de lava de la cima del Tláloc están enterrados por depósitos de caída de pumita del Popocatepetl. Entre ambos depósitos registraron un paleosuelo datado de 5000 años AP, lo cual indica que la edad de los flujos de lava de la cima, son más antiguas que 5000 años.

Con la información conjunta de estos autores, se recreó un mapa temático sobre los eventos geocronológicos del volcán Tláloc y su composición general (Figura 2).





**Figura 2.** Mapa de eventos geocronológicos del volcán Tláloc.

La Figura 2 indica que, a dicha escala, los sitios parecen encontrarse en una misma composición geológica dacítica; aunque más antigua para los sitios 1 y 2.

### 1.5.2 Distribución de la vegetación

Los trabajos más específicos sobre la vegetación del volcán Tláloc han sido publicados por Velázquez (1993, 1994), Sánchez-González y López-Mata (2003, 2004, 2006). Velázquez (1993), definió seis unidades de vegetación para los volcanes Tláloc y Pelado, denominadas *grupos de comunidades vegetales* o *alianzas*: bosque de abeto, vegetación de mega-roseta, bosque de pino, pastizal subalpino, bosque mixto aliso-pino y pradera (excepto la vegetación de mega-roseta, solo en el volcán Pelado). Cada grupo contenía comunidades de plantas con una abundancia y diversidad determinadas. Velázquez (1994), retomó estos grupos y asoció con matrices de correlación las variables ambientales que pueden influir en su distribución; encontró que la elevación y la humedad del suelo son las variables más relevantes en la disposición de estos grupos. Sánchez-González (2004), clasificó a la vegetación del monte Tláloc en un gradiente altitudinal entre 2750 y 4000 msnm y reportó seis tipos de vegetación: encinar arbustivo, bosque de encino, bosque mixto, bosque de oyamel, bosque de pino y zacatonal alpino,

en el orden de menor a mayor elevación y con un intervalo altitudinal específico en cada uno. A cada tipo de vegetación, se atribuyó una composición de especies por estrato, distribuidas continuamente y sin comunidades discretas.

Aunque los autores emplean técnicas de ordenación y análisis de la vegetación diferentes, ambos refieren que el gradiente altitudinal –que implica cambios en la temperatura y la precipitación–, es el factor principal en la distribución de la vegetación en el volcán Tláloc en particular, y la Sierra Nevada en general. Es importante incluir que el gradiente de la vegetación no es inalterable, ya que puede perturbarse con las actividades antrópicas como los incendios y el pastoreo hasta las alteraciones climáticas. Astudillo-Sánchez *et al.* (2017) señalaron un avance del bosque de *Pinus hartwegii* hacia mayores altitudes, entre el ecotono bosque-pastizal alpino del monte Tláloc y apuntan a que es inducido por el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación, asociados con el cambio climático.

La clasificación de Sánchez-González y López Mata (2003) se consideró en este estudio para ubicar sobre qué tipo de vegetación se encuentra cada sitio en el muestreo.

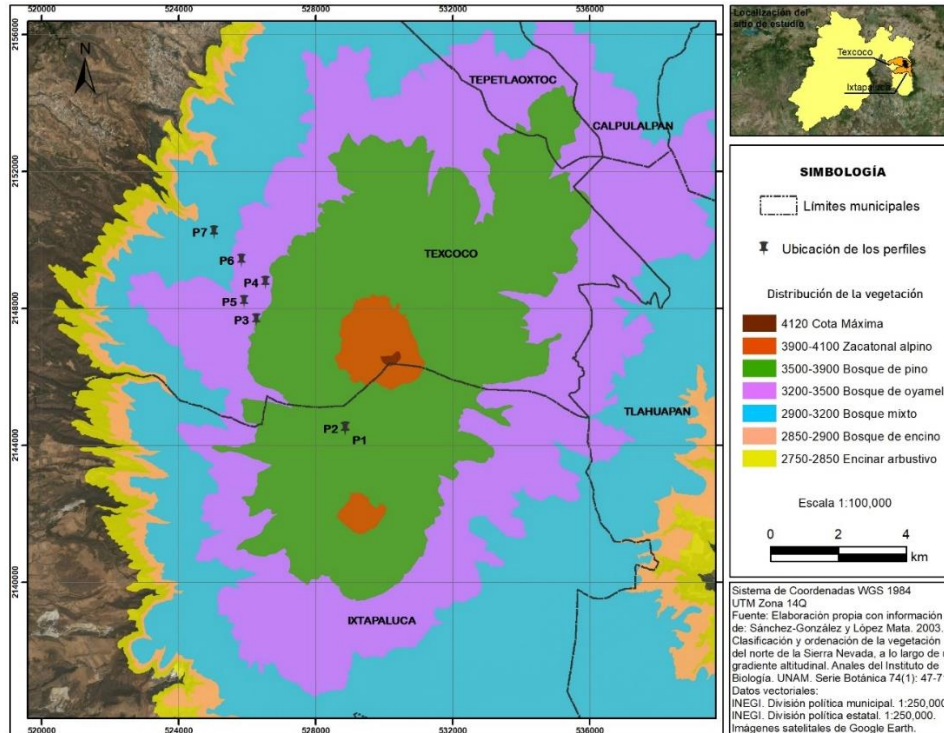


Figura 3. Distribución de la vegetación en el monte Tláloc.

## Reconocimiento de la vegetación en campo

Aunque la Figura 3 ilustra que los sitios 1 y 2 se encuentran dentro de la cota de bosque de pino, exactamente se sitúan en un parche de vegetación de pastizal alpino, rodeado de bosque de pino. En estos suelos existe únicamente el estrato arbustivo dominado por *Muhlenbergia quadridentata* y *Festuca tolucensis*.



**Figura 4.** Vegetación de los perfiles 1 y 2.

Los suelos de los perfiles 3, 4 y 5 se localizan en una vegetación de bosque de oyamel, dominado por *Abies religiosa*. Sin embargo, existen diferencias en la forma y densidad del dosel y la heterogeneidad de los estratos. En el perfil 3, el estrato arbóreo es cerrado y las condiciones de humedad y temperatura permiten la formación de un estrato líquénico-muscinal grueso (5 cm de espesor), donde se encuentran especies como *Polytrichum juniperinum* y *Thuidium delicatulum*. En menor abundancia se halla un estrato herbáceo conformado por especies del género *Alchemilla* spp. En el suelo del perfil 4, el dosel es más abierto y existe una mayor diversidad de especies en el estrato herbáceo, de entre las cuales pudieron identificarse especies como *Senecio callosus*, *Fuchsia microphylla*, *Eupatorium pazcuarensis* y *Castilleja Arvensis*. En el suelo del perfil 5, el estrato arbóreo de oyamel es más abierto y homogéneo y el estrato herbáceo es más escaso y apenas se conforman capas mínimas de musgo como *Polytrichum juniperinum*.





**Figura 5.** Bosque de oyamel en los diferentes sitios: a) sitio 3, b) sitio 4 y c) sitio 5.

El suelo del perfil 6 se ubica dentro de una vegetación de bosque mixto, conformada por organismos de *Abies religiosa*, *Pinus montezumae* y *Quercus* spp. La abundancia de litter del pino es tan importante que imposibilita la formación de un estrato liquénico-muscinal; aunque si se desarrolla un estrato herbáceo medianamente denso de especies como *Cheilanthes marginata* y *Alchemilla* spp.



**Figura 6.** Bosque mixto del sitio 6 y acumulación del litter (derecha).

El suelo del perfil 7, se desarrolla en una vegetación de bosque de encino semi-cerrado de especies arbóreas *Quercus rugosa* y *Q. laurina*.

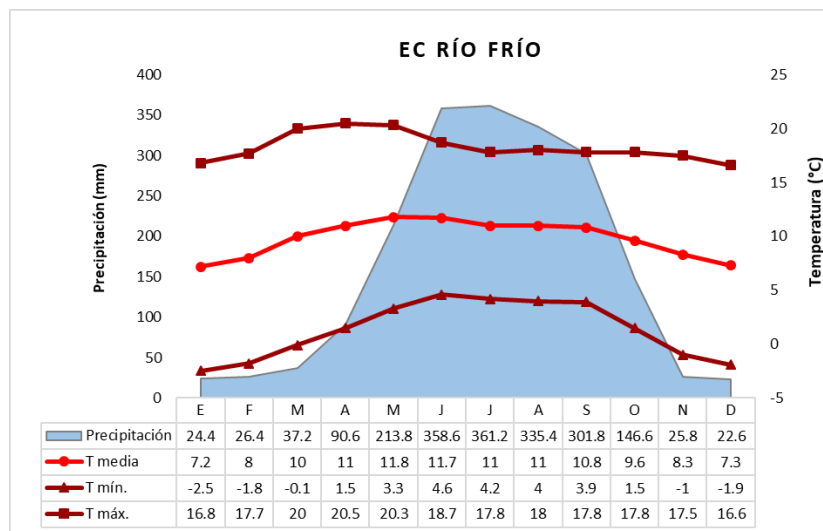


**Figura 7.** Bosque de encino en el sitio 7.

### 1.5.3 Condición climática

Considerando una escala de información climatológica 1:1,000,000, los volcanes de la Sierra Nevada contienen un clima Semifrío subhúmedo con lluvias en verano, C(E)(w2)(w) (INEGI, 2008); exceptuando las zonas de piedemonte y la cima de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

Con la información de la estación climatológica Río Frío (SMN-CONAGUA) (al ser la estación con mayor elevación más próxima a la zona de estudio), se extrapola que el sitio tiene una temperatura media anual de 9.8°C (7.2°C min. a 11.8°C máx.) y una precipitación anual de 972.2 mm. El climograma construido con la misma información ilustra que las mayores precipitaciones y temperaturas, tienen una marcada estacionalidad en el período húmedo.



**Figura 8.** Climograma de la EC-Río Frío.  
Elaborado con las normales climatológicas de 1951 a 2010.

Por otro lado, la temperatura del monte Tláloc se condiciona bajo un clima de montaña: disminución de la temperatura a mayor altura. Teóricamente, ocurre un proceso termodinámico llamado gradiente adiabático húmedo (Hemond y Fechner, 2015), donde la temperatura disminuye en un intervalo de 0.36 a 0.55°C cada 100 m de elevación.

Otro factor a considerar es la exposición solar de la ladera en la que se ubica cada sitio, salvo los suelos de los perfiles 1 y 2 que se localizan en la cresta, el resto de los suelos tiene una exposición oeste de la ladera, por lo que recibe una menor cantidad de insolación.

Bajo estas condiciones, los suelos del área de estudio tienen un régimen de humedad údico, exceptuando el perfil 2 con un régimen de humedad ácuico; mientras que el régimen de temperatura para la mayoría de los suelos es mésico y frígido para los perfiles 1 y 2, esto con base en el modelo de simulación Newhall de la USDA (2020).

#### 1.5.4 Relieve

La geoforma principal en estos suelos es montaña de gradiente medio o SM (Jahn et al., 2006); no obstante, la posición de la pendiente es diferente entre cada sitio. Los suelos de los perfiles 1 y 2 se hallan en la cresta o cumbre; los perfiles 3,4 y 5 en la ladera media y los perfiles 6 y 7 en la ladera baja (Figura 9).

En cuanto a la forma de la pendiente, la superficie de los sitios 1, 2 y 6 es plana simple (SS), de los sitios 3 y 7 es cóncava-convexa (CV) y de los sitios 4 y 5 convexo plana (VS).

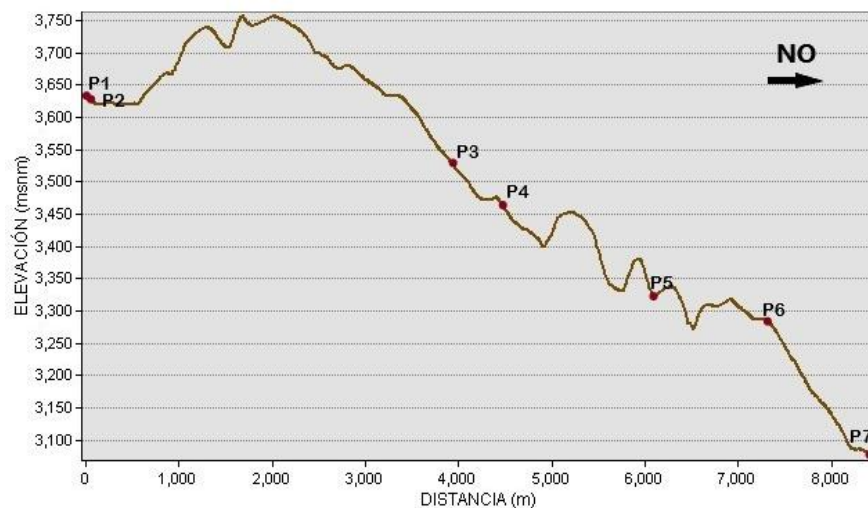
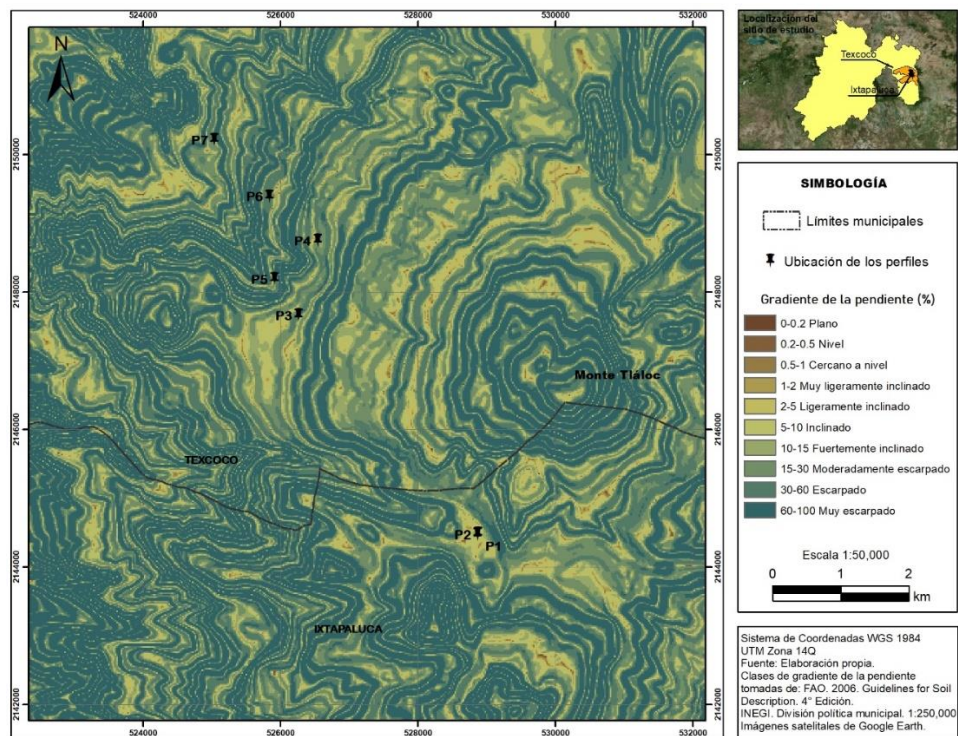


Figura 9. Perfil topográfico de los sitios de muestreo.



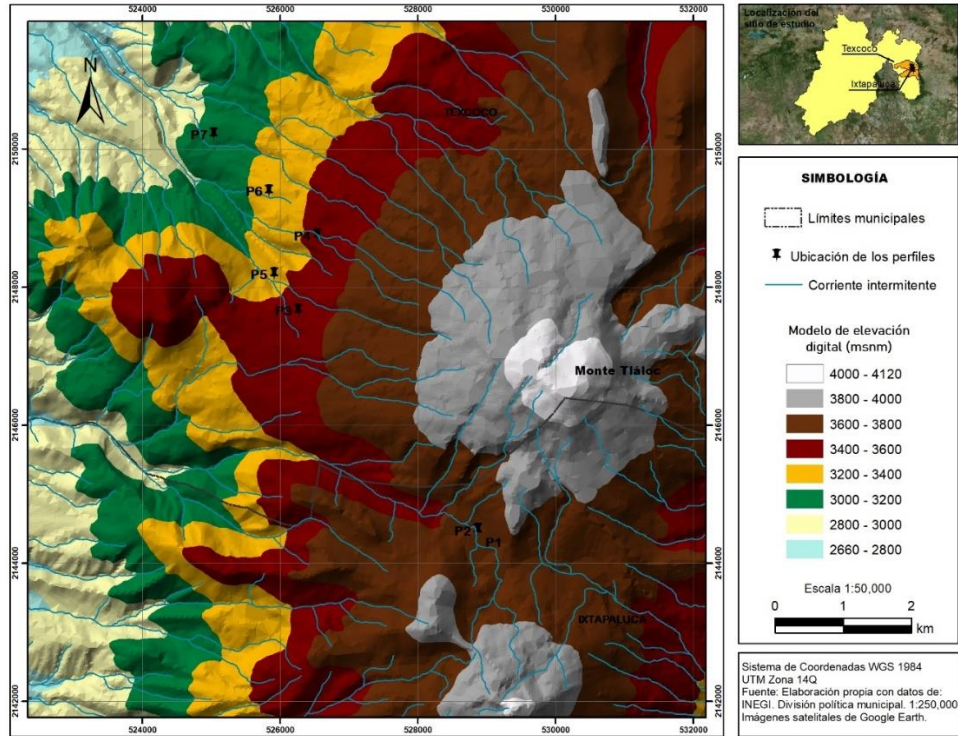
A partir de la información vectorial de las curvas de nivel se obtuvo el grado de pendiente en el sitio (Figura 10), agrupándolo en las clases de gradiente de la pendiente, mencionadas por la FAO (Jahn et al., 2006). Bajo esta escala, los suelos de los perfiles 1 y 2 comparten una pendiente ligeramente inclinada (de 2 a 5%), el suelo del perfil 3 se desarrolla en una pendiente de ligeramente inclinada a inclinada (5 a 10%) y los perfiles 4 a 7 tienen una pendiente de inclinada a fuertemente inclinada (10 a 15%). Finalmente, la mayoría de los suelos comparten una orientación de la pendiente suroeste, con excepción de los suelos en los puntos 6 y 7, cuya orientación es oeste.



**Figura 10.** Mapa de pendientes del sitio de estudio.

### 1.5.5 Hidrología

En las inmediaciones de los sitios de muestreo no se encuentran cuerpos o corrientes de agua perennes. Las corrientes de agua nacen de un parteaguas que es la propia cima del monte Tláloc. El patrón de drenaje general es de tipo dendrítico (Jahn et al., 2006) y ninguno de los suelos de todos los puntos se halla sobre una corriente fluvial. La mayoría de los suelos en cada punto tiene una condición buena de drenaje; excluyendo a los suelos de los perfiles 1 y 2 en el pastizal cuya condición es algo pobremente drenada.



**Figura 11.** Mapa de elevaciones con patrones de drenaje del sitio de estudio.

## 1.6 CONCLUSIONES

La caracterización ambiental de los sitios estudiados permitió reconocer que, a nivel de paisaje, los factores de formación más diferentes entre los suelos son el tipo y cobertura de vegetación, la topografía (grado, forma de pendiente y elevación) y las condiciones de drenaje; estas condiciones conceden un régimen de humedad y temperatura característico en los suelos de bosque, distinto en los suelos de pastizal.



## CAPÍTULO 2. SUELOS EN LA CATENA: ESCALA DE PERFIL

### 2.1 RESUMEN

En este capítulo se reportan y analizan la morfología y las propiedades químicas y físicas de cada uno de los perfiles de suelos. Asimismo, se comparan las propiedades ándicas de los suelos y su grado de desarrollo respecto a los criterios de clasificación de la Base de Referencia Mundial de Suelos de la FAO (IUSS Grupo de Trabajo de la WRB, 2015) y la Taxonomía de Suelos de la USDA (2014). Los resultados indicaron que los suelos se clasifican como Andosols en un estado medio de desarrollo, con propiedades ándicas pobremente desarrolladas o proto-ándicas para la mayoría de ellos. Se reconocieron procesos de gleyzación y crioturbación en los suelos de pastizal, los cuales determinaron su morfología, pero no impidieron el proceso de andosolización. Por último, se empleó el modelo de análisis de regresión multivariado para demostrar el efecto de algunas condiciones ambientales seleccionadas sobre el desarrollo de las propiedades ándicas de cada suelo. Se mostró que estas condiciones tienen un efecto significativo más alto sobre la retención de fosfatos y los elementos activos en horizontes subsuperficiales.

**Palabras clave:** Andosols, propiedades proto-ándicas, minerales amorfos, modelos multivariados, procesos de formación.

### 2.2 ABSTRACT

In this chapter the morphology and chemical and physical properties of each soil profile are reported and analyzed. Furthermore, the andic properties of the soils and their degree of development are compared with the classification criteria of the World Reference Base of Soil Resources of FAO (IUSS Working Group WRB, 2015) and the Soil Taxonomy of USDA (2014). The results indicated that soils are classified as Andosols in a medium state of development, with poorly developed andic properties or proto-andic properties for most of them. Gleyization and cryoturbation processes were recognized on grassland soils, which determined its morphology, but they did not inhibit the andosolization process. Last, the multivariate regression analysis model was used to demonstrate the effect of some selected environmental conditions on the development of andic properties of each soil. These conditions were shown to have a higher significant effect on the phosphates retention and active elements in subsuperficial horizons.

**Key words:** Andosols, proto-andic properties, amorphous minerals, multivariate models, formation processes.

## 2.3 INTRODUCCIÓN

### Definición de Andosols

En la Séptima Aproximación (1960), los Andosols eran incluidos dentro de los Inceptisols, en el suborden de los Andepts (Dahlgren et al., 2004). Su clasificación se basaba casi exclusivamente a partir de los datos de los suelos de cenizas volcánicas de Hawaii, el oeste de Estados Unidos y Alaska. En 1978, G.D. Smith propuso que el suborden de Andepts debía reevaluarse y publicó su propuesta llamada "Limitaciones en la clasificación de Andepts y creación del orden Andisol". Él propuso el nombre de Andisol en lugar de Andosol, porque ya se refería en el sistema de clasificación de la WRB. En la propuesta se mencionaba que el concepto central de Andisol, era un suelo desarrollado a partir de cenizas volcánicas, pumita y otras eyecciones volcánicas o de materiales volcanoclásticos. Este concepto central consistía en dos importantes detalles: los materiales parentales son de origen volcánico y los suelos están dominados por materiales amorfos no cristalinos. Posteriormente, el Comité Internacional de los Andisols de la USDA, estableció que el concepto central de los Andisols es <<el suelo desarrollado de eyecciones volcánicas y/o materiales volcanoclásticos, cuya fracción coloidal esté dominada por materiales no cristalinos y/o complejos Al/humus>> (Shoji et al, 1993).

En cuanto a la integración del concepto en la FAO, los Andosols fueron creados para generar el mapa de suelos del mundo a escala 1:5,000,000. Estos suelos se clasificaron en cuatro unidades: mollic, humic, ocric y vitric (Ídem).

En la WRB, los Andosols son definidos por su horizonte ándico que se caracteriza por la presencia de altas concentraciones de Al y Fe activos. A su vez los horizontes se subdividen en silándicos, dominados por alófano y/o imogolita, y aluándicos donde predominan los complejos Al/Fe-humus. Para la Taxonomía de Suelos, los Andisols son definidos en términos de sus propiedades ándicas (Dahlgren et al., 2004).

## **Factores de formación**

El factor de formación más condicionante de los Andosols, es el material parental. Principalmente derivan del intemperismo de cenizas volcánicas, pero también pueden partir de otros materiales como tobas, pómez, lahares y escorias. Los Andosols pueden proceder de tefras de cualquier composición química (ácida, intermedia o básica), excepto ultrabásica (Mizota y Reeuwijk, 1989). La mineralogía de la fracción coloidal en estos suelos, depende de la mineralogía y las propiedades químicas del material parental y las condiciones de su meteorización química (pH, temperatura, precipitación y drenaje). Aunque los Andosols no son suelos zonales, se forman rápidamente en climas húmedos, porque favorecen el intemperismo del material parental. Además, son susceptibles a alterarse a otros órdenes de suelo, si la edad del suelo y el grado de intemperismo aumentan (Dahlgren et al., 2004).

## **Propiedades de los Andosols**

Las características químicas y mineralógicas de los Andosols se reflejan en sus propiedades físicas y biológicas. Las propiedades químicas únicas de los Andosols son: composición elemental rica en aluminio, la naturaleza altamente reactiva de sus fracciones coloidales y su alta superficie específica; estas dos últimas por los minerales amorfos como el alófono y la imogolita, y los complejos Al-humus. Así también, la alta capacidad de retención de fosfatos está relacionada con este tipo de minerales (Nanzyo, 2002).

En cuanto a sus propiedades físicas, el alófono por sí mismo no es la razón de la baja densidad; si no la acumulación de grandes cantidades de humus, generando agregados altamente porosos y bien desarrollados. Los Andosols desarrollados tienen una densidad aparente típicamente de  $0.9 \text{ gcm}^{-3}$  o más baja y es la más baja entre todos los suelos minerales (Ídem).

La acumulación de altas cantidades de humus se da por la estabilización de humus por complejación con el Al. El color del humus y la distribución vertical del contenido de C orgánico es altamente dependiente de la vegetación. La preservación de la materia orgánica resulta del entierro de los suelos por adiciones continuas de ceniza volcánica, interacciones químicas con cationes polivalentes y materiales inorgánicos no cristalinos, así como la protección física por la microagregación. Su estabilización puede ocurrir a

través de la formación de complejos Al/Fe-humus y la sorción por alófono, imogolita y ferrihidrita (Dahlgren et al., 2004).

La composición mineralógica de los Andosols depende de la petrografía de las cenizas originales. El intemperismo del vidrio volcánico, que es el principal componente de las cenizas, tiende a producir materiales amorfos; representados predominantemente por alófanos (Kawai, 1978). La ferrihidrita pobremente cristalina, es el mineral secundario de Fe más abundante en los Andosols y se distingue por un color parduzco en el horizonte Bw de estos suelos (Nanzyo, 2002).

### **Propiedades ándicas**

Aunque en 1989, la FAO introdujo el criterio de las propiedades ándicas del suelo, la definición fue documentada por el Comité Internacional de los Andisols en 1984 y establecida finalmente en las Claves para la Taxonomía de Suelos, en 1992 (Shoji et al., 1993).

La *Andosolización* es el proceso generado en condiciones ácidas, donde se producen constituyentes minerales de rango corto (alófono, imogolita y ferrihidrita) y complejos Al-humus pobres en sílice. Los componentes húmicos mantienen los geles minerales en estado amorfo, impidiendo la evolución de arcillas cristalinas y al mismo tiempo, el humus se estabiliza por complejación con los coloides minerales (Wada, 1989). Según Dahlgren et al. (2004): <<es un caso de melanización en que el Al<sup>3+</sup> es el catión dominante>>.

Los Andosols tienen su fracción coloidal típicamente dominada por complejos de Al-humus o alófono/imogolita en ambientes húmedos y fríos. Cuando predominan los complejos de Al-humus, se desarrollan los suelos no-alofánicos. Cuando predomina el alófono y la imogolita (con un pH de 5 a 7 y bajo contenido de compuestos orgánicos acomplejados), se desarrollan los suelos alofánicos (Ugolini y Dahlgren, 2003).

## **2.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1 Metodología de campo**

El trabajo de campo se llevó a cabo entre los meses septiembre y octubre del 2020. Las características del sitio y del perfil se describieron con base en el Manual para la descripción de perfiles de suelos (Gutiérrez-Castorena, 2020) y una interpretación complementaria con el Manual del estudio de los suelos de la USDA (Soil Science

Division Staff, 2017). Se tomaron muestras alteradas de cada horizonte y muestras inalteradas en cajas de aluminio para la elaboración de secciones delgadas.

#### **2.4.2 Análisis de laboratorio**

Las muestras de suelos fueron secadas al aire y tamizadas para obtener la fracción de tierra fina (<2 mm). Los análisis físicos y químicos se realizaron para cada horizonte (por duplicado) de todos los perfiles; excepto Al y Fe activos donde se excluyeron los horizontes C. Las determinaciones desarrolladas fueron: densidad aparente (a capacidad de campo), textura (método de pipeta), pH (1:2.5 en agua), P disponible (Bray I), retención de fosfatos (Blakemore), materia orgánica (Walkley-Black), nitrógeno (micro-Kjeldahl), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio), cationes intercambiables ( $\text{Na}^{+1}$  y  $\text{K}^{+1}$  en espectrofotómetro de flama y  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en EAA); y  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Al}^{+3}$  y  $\text{Si}^{+4}$  extractables (oxalato ácido).

Los métodos se llevaron a cabo de acuerdo con el Manual de Procedimientos de van Reeuwijk (1999), excepto densidad aparente en donde se utilizó el método de Blake (1965) modificado. Todos los procedimientos se realizaron en el laboratorio del Área de Génesis y Clasificación de Suelos; excepto densidad aparente, que se hizo en el laboratorio de Física de Suelos, ambos del programa de Edafología del Colegio de Postgraduados.

#### **2.4.3 Clasificación de los suelos**

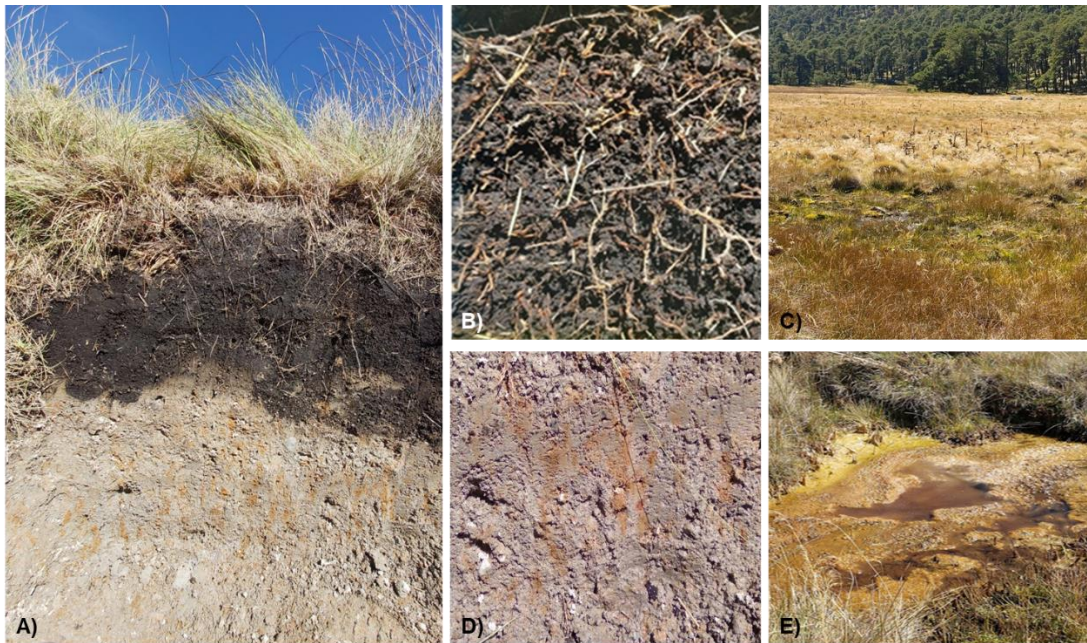
Con la información de la descripción completa del perfil y los análisis de laboratorio se clasificaron los suelos, con base en los dos sistemas internacionales de clasificación: la Base de Referencia Mundial de Suelos de la FAO (IUSS Grupo de Trabajo de la WRB, 2015) y la Taxonomía de Suelos de la USDA (2014). Con la clasificación de la WRB, se asignaron calificadores principales y complementarios. Respecto a la clasificación de la Taxonomía de Suelos se clasificó hasta nivel de familia.

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1 Descripción de los perfiles de los suelos

#### Perfil 1

El suelo de este perfil se ubica en la cresta de la ladera, en un parche de pastizales, tiene una profundidad de 65 cm; se llegó a esa profundidad porque el material ya era homogéneo y muy compacto. Se reconocieron 3 horizontes cuyo cambio en la estructura es muy marcado: suelta-bloques angulares-migajosa en orden de desarrollo del suelo. La textura va de franco arenosa, franca a franco limosa en el horizonte superficial. El pH es fuertemente ácido en todo el perfil. El último horizonte del perfil es muy distinto, reconocido en principio por una transición abrupta y plana entre el segundo horizonte y éste; su color es olivo pálido, contiene un mayor porcentaje de arenas (>50%) y una alta densidad aparente ( $1.01 \text{ gcm}^{-3}$ ); así como una disminución considerable en el porcentaje de carbono orgánico y nitrógeno (Cuadro 2). En la cara de este horizonte se observaron rasgos de oxidación en los poros de las raíces, en una matriz olivo clara, lo que refiere a la influencia de la saturación de agua por procesos de gleyzación.

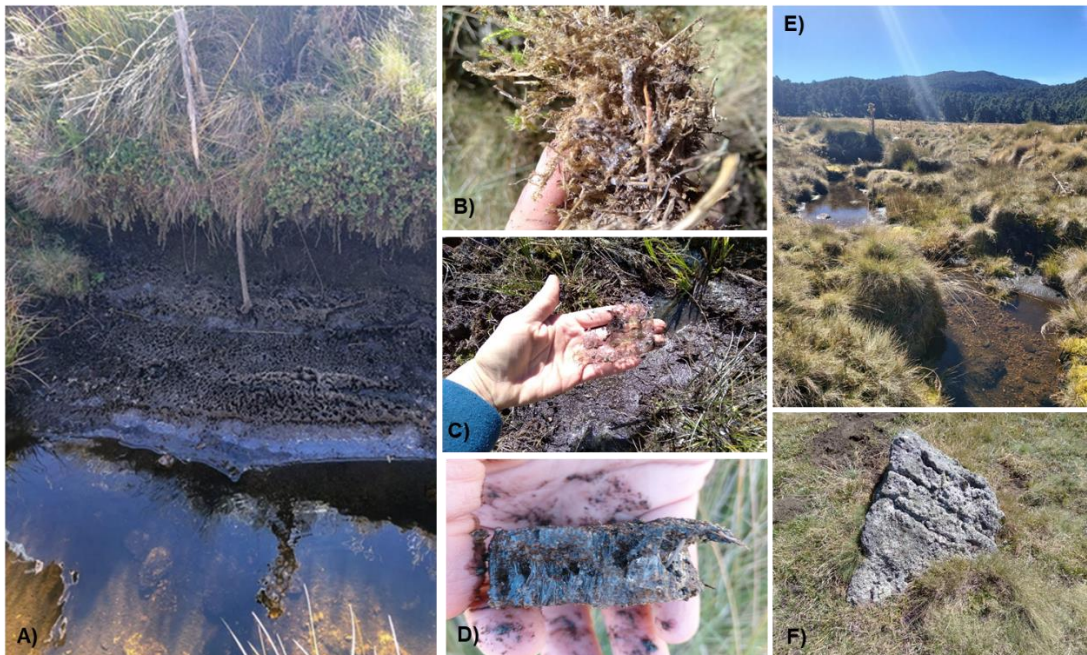


**Figura 12.** A) Perfil 1. B) Horizonte A<sub>h</sub>; C) Vegetación del sitio; D) Rasgos redoximórficos; E) Condiciones reductoras.



## Perfil 2

El suelo de este perfil, ubicado en la misma geoforma y vegetación, tiene una profundidad de 62 cm; se llegó a esa profundidad por la presencia de una lámina de agua, la cual estaba congelada. Aunado a ello, se observaron cristales de hielo de diferentes tamaños a lo largo del perfil, como parte de procesos criogénicos en el suelo. Si bien, estos procesos no son parte de condiciones recientes, puesto que se detectaron algunas morrenas en el sitio que indican glaciales en el pasado. Se reconocieron 3 horizontes con transiciones difusas y planas. En el último horizonte, en campo se reconoció una estructura laminar por procesos de congelamiento en el suelo y tixotropía por la saturación de agua. Su estructura va de laminar y granular a migajosa y su textura de franco arenosa a franco limosa, en orden de desarrollo del suelo. El color gris oscuro apenas disminuye un nivel en luminosidad en el último horizonte. La densidad aparente es baja ( $<0.5 \text{ gcm}^{-3}$ ) y el pH va de fuertemente a muy fuertemente ácido hacia la superficie del perfil. El contenido de carbono orgánico y nitrógeno no son muy variables (Cuadro 2). El horizonte más profundo tiene una mayor retención de fosfatos y una CIC más alta ( $>60 \text{ cmolckg}^{-1}$ ).



**Figura 13.** A) Perfil 2. B) Raíces con cristales de hielo; C) y D) Evidencias de crioturbação en el suelo; E) Inundación del sitio; F) Morrena.

### Perfil 3

El suelo del perfil se localiza en el bosque de oyamel de condición más húmeda. Tiene una profundidad de 93 cm, llegando a tal por el contacto con la roca. Se identificaron cinco horizontes y una capa de material hémico entre el musgo y el horizonte superficial. La estructura cambia de bloques subangulares gruesos y medios a finos, a granulares gruesos a finos en los primeros horizontes. La textura es franca limosa, y franca solo en el horizonte más profundo. El color cambia gradualmente de pardo muy pálido, pardo amarillento a pardo, en orden de desarrollo del suelo. La capacidad de intercambio catiónico, el contenido de carbono orgánico y fósforo y el porcentaje de nitrógeno, tienen un comportamiento descendente con la profundidad, propios de suelos formados *in situ* (Cuadro 2). La densidad aparente es baja ( $<0.6 \text{ g cm}^{-3}$ ) en todo el perfil y el pH es moderadamente ácido, aunque ambos no son graduales con la profundidad.



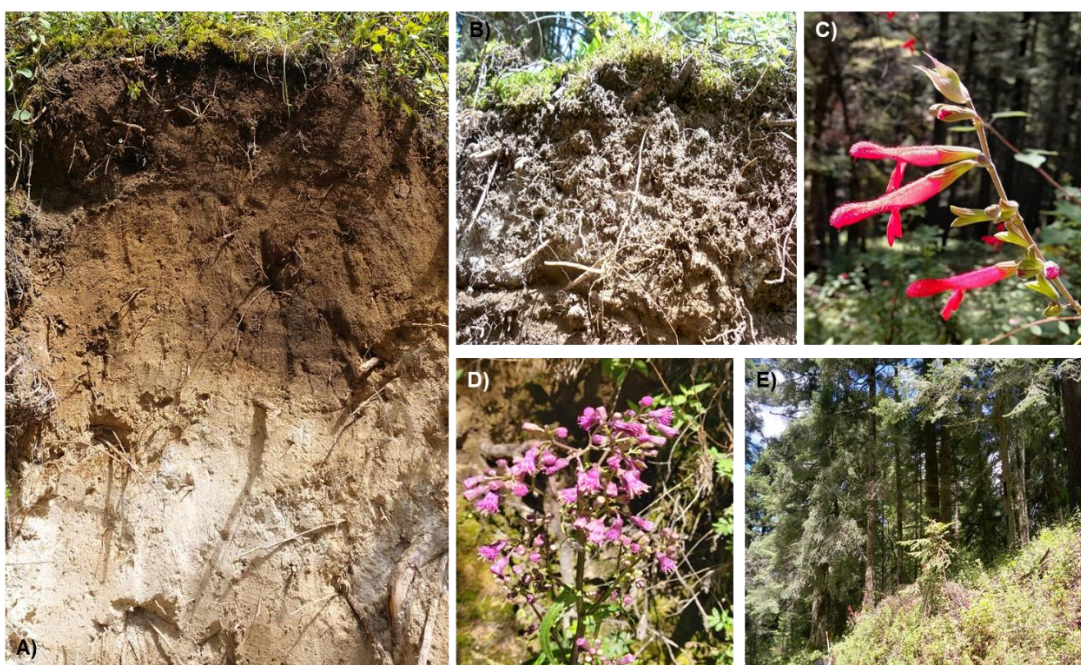
**Figura 14.** A) Perfil 3. B) y C) Detalle del mantillo; D) Horizonte  $A_{h1}$ ; E) Estrato liquénico-muscinal.

### Perfil 4

El suelo de este perfil, de bosque de oyamel más abierto, tiene una profundidad de 200 cm y fue el perfil más profundo que se registró. Se reconocieron siete horizontes, siendo los tres últimos, capas de depósitos volcánicos. La estructura va de suelta en las capas de depósitos, bloques subangulares a granulares en los primeros dos horizontes. La



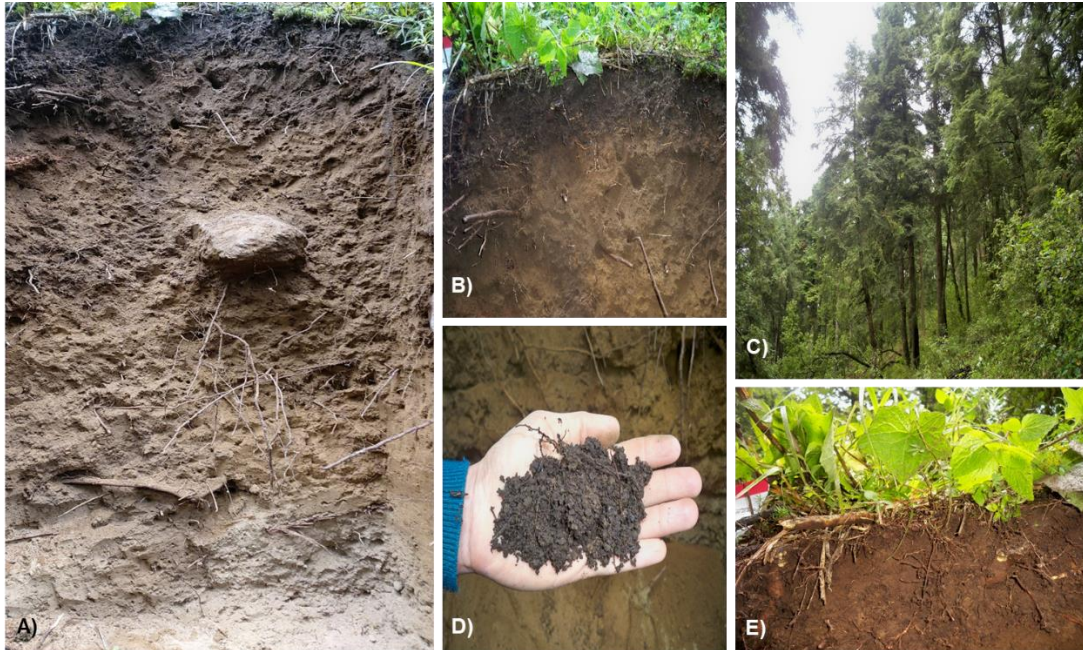
textura es franca y franco limosa. Los colores son pardos muy pálidos a pardos amarillentos oscuros, en orden de desarrollo del suelo. El pH va de fuerte a moderadamente ácido, siendo más ácido en las capas más profundas. El porcentaje de carbono orgánico y nitrógeno son bajos a muy bajos (Cuadro 2), incluso en el primer horizonte. La densidad aparente es baja y variable (Cuadro 2). La capacidad de intercambio catiónico es alta en casi todo el perfil (30 a 36  $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ ) en los primeros 4 horizontes.



**Figura 15.** A) Perfil 4. B) Detalle de la estructura horizonte  $A_{h1}$ ; C) y D) Vegetación del estrato herbáceo; E) Vegetación del sitio.

### Perfil 5

En este perfil de profundidad de 180 cm, se reconocieron seis horizontes, incluyendo transiciones. La estructura es suelta en la última capa, de bloques subangulares gruesos a finos y granular solo en el primero. La textura es franca en los primeros horizontes. El color cambia gradualmente de pardo amarillento claro a oscuro, a pardo oscuro en los primeros horizontes. Los porcentajes de carbono orgánico y nitrógeno son bajos a muy bajos (Cuadro 2), incluso en el primer horizonte. La densidad aparente es baja en todo el perfil y el pH es moderadamente ácido (5.6 a 6.1); aunque ambos son cambiantes con la profundidad (Cuadro 2). La capacidad de intercambio catiónico va de alta a moderada (46 a  $<30 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ ).

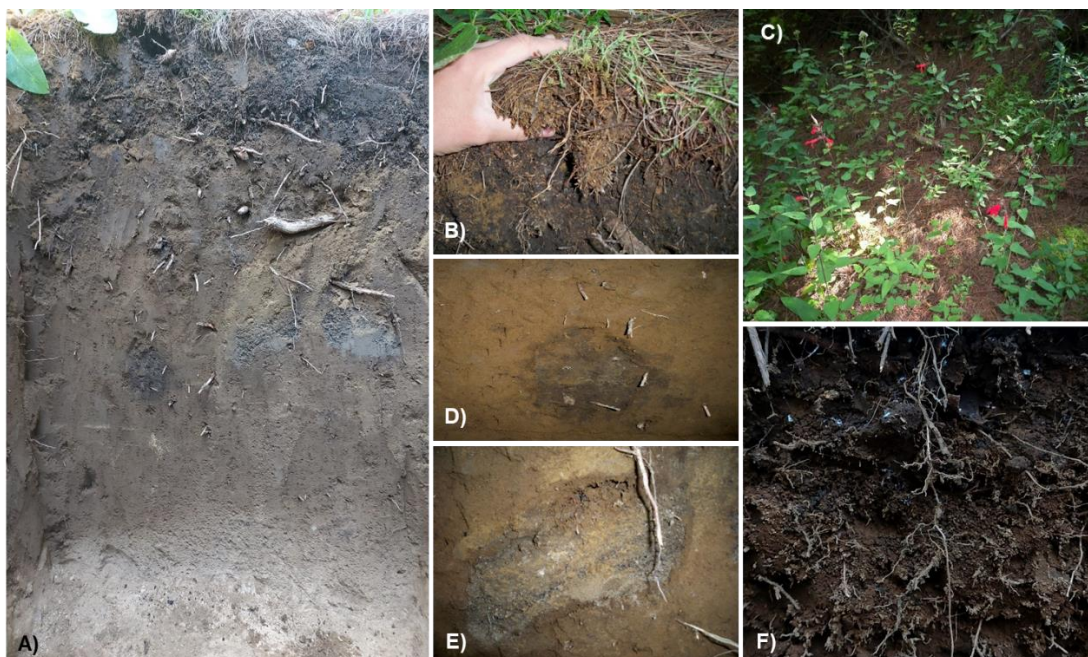


**Figura 16.** Perfil 5. A) Detalle de los horizontes superficiales; B) Vegetación del sitio; C) Estructura del horizonte A<sub>h</sub>; D) Estrato herbáceo.

### Perfil 6

El suelo del perfil, ubicado en el bosque mixto, tiene una profundidad de 120 cm. Se reconocieron siete horizontes, con material hémico y fíbriico de agujas de pino en el horizonte superficial. La estructura es de bloques subangulares gruesos y medios, y granular en los primeros dos horizontes. La textura va de franco arenosa-franca-franco limosa, de mayor a menor profundidad. El color cambia de pardo amarillento a pardo amarillento oscuro. El porcentaje de carbono orgánico y nitrógeno, el contenido de fósforo y la capacidad de intercambio catiónico, disminuyen gradualmente con la profundidad (Cuadro 2). La densidad aparente es baja ( $0.74$  a  $0.77 \text{ gcm}^{-3}$ ) en los primeros 4 horizontes y el pH es más ácido en los primeros horizontes, de fuerte a moderadamente ácido con la profundidad.

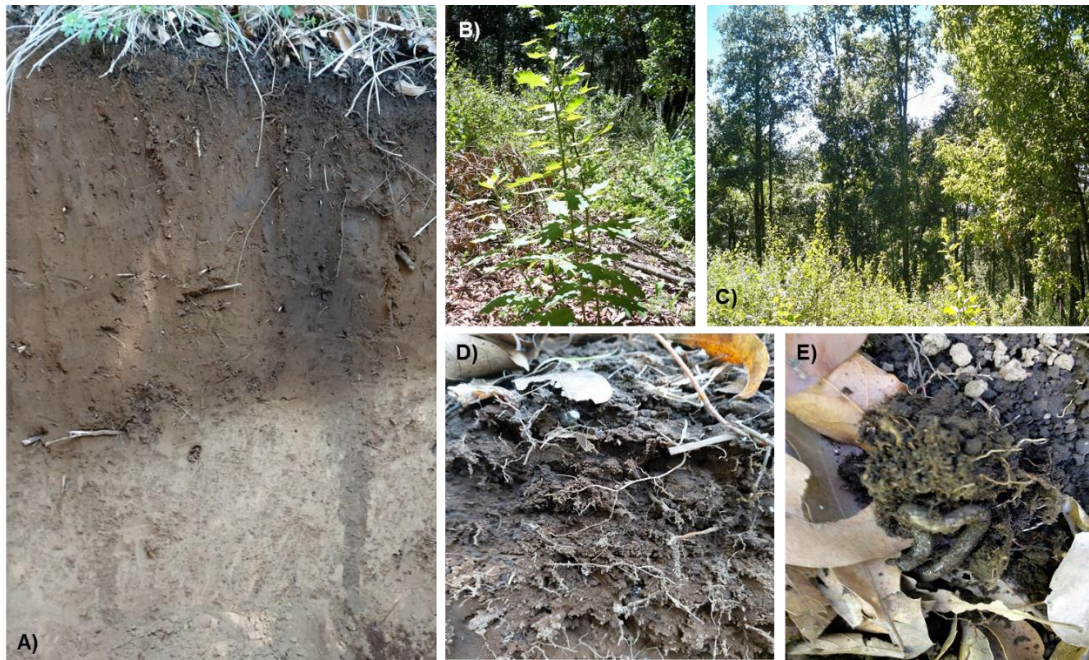




**Figura 17.** A) Perfil 6. B) Material fíbrico; C) Detalle del piso forestal; D) y E) Crotovinas; F) Horizonte A<sub>h1</sub>.

### Perfil 7

El suelo de este perfil, desarrollado en el bosque de encino, tiene una profundidad de 120 cm. Se identificaron cinco horizontes, con transiciones abruptas entre los horizontes genéticos. Principalmente en la última capa que consta de una capa de depósito, que indica una discontinuidad litológica. La estructura va de suelta en el último horizonte, bloques subangulares medios y gruesos a granular solo en el primer horizonte. La textura es franco limosa y franca solo en la última capa. El color cambia de pardo amarillento oscuro a pardo, a menor profundidad. El porcentaje de carbono orgánico y nitrógeno disminuyen gradualmente con la profundidad, los cuales son generalmente bajos a muy bajos (Cuadro 2). El pH es moderadamente ácido y variable a lo largo del perfil. La capacidad de intercambio catiónico es alta en todo el perfil (20 a >30 cmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>) y mayor en los primeros dos horizontes.



**Figura 18.** A) Perfil 7. B) y C) Vegetación del sitio; D) Detalle del horizonte  $A_h$ ; E) Lombrices y estructura granular.

Los suelos de cada sitio de la catena, difieren entre sí por los siguientes aspectos: en principio, por la profundidad total del perfil y la profundidad de desarrollo del suelo. El suelo del perfil 4 tiene una profundidad total mayor; sin embargo, el desarrollo del suelo en todos los perfiles es menor a 100 cm, con excepción del suelo del perfil 6 que llega hasta los 114 cm. Esto es obtenido por la profundidad en la que fueron observadas las capas de ceniza y los materiales volcánicos. Por otra parte, no todos los suelos comparten el mismo material parental: los perfiles 1 y 2 se originaron del mismo material dacítico-andesítico, mientras que los perfiles 3 a 6 poseen un material parental andesítico intermedio y el perfil 7 un material andesítico más ácido. Estas diferencias son determinadas por el color, pH y la textura de las capas de depósitos volcánicos.

En la Figura 19 se muestran los valores de algunas variables de todos los perfiles. Respecto al pH puede notarse que los suelos de los pastizales (perfiles 1 y 2) poseen un pH más ácido que los suelos de otro tipo de vegetación. La densidad aparente en todos los suelos es  $<1 \text{ gcm}^{-3}$ . Los porcentajes de carbono orgánico y nitrógeno son más altos en el perfil 2; mientras que, para el resto de los perfiles, los mayores porcentajes se concentran en el horizonte superficial y disminuyen drásticamente con la profundidad. En los horizontes superficiales, el porcentaje de carbono es considerado como moderado

para la mayoría de los suelos; en tanto que el porcentaje de nitrógeno tiene valores considerados altos (0.2 a 0.5%) (Hazelton y Murphy, 2007).

Los niveles de fósforo disponible son bajos a muy bajos en todos los suelos, lo que se relaciona con un porcentaje de retención de fosfatos mayor a 60% en los perfiles, especialmente en los horizontes superficiales. La capacidad de intercambio catiónico en los horizontes superficiales de los suelos, tiene valores altos a muy altos, especialmente en los perfiles 1 y 3. Las diferencias de las propiedades químicas entre los suelos, principalmente en los horizontes superficiales, obedecen a las características ambientales de cada sitio.

En cuanto a la textura, todos los suelos tienen un mayor porcentaje de limo en general, que aumenta en los horizontes superficiales (Figura 20), lo cual es propio de los procesos de intemperismo en la formación de Andosols. Respecto al desarrollo de partículas finas del suelo, los suelos con mayor contenido de arena son los de los perfiles 5 y 6; mientras que las texturas más finas se encuentran en el suelo del perfil 3. Los cambios texturales con la profundidad muestran cómo los suelos de la catena están sujetos al intemperismo, el cual aumenta a menor elevación (perfiles 3 a 7). En los perfiles 1 y 2 hay una mayor proporción de arenas y no se ha desarrollado un horizonte B, aunado a que se sitúan en una exposición y pendiente distintas; por lo que cabe decir que exhiben procesos de intemperismo diferentes que el resto de los suelos.

**Cuadro 2.** Propiedades físicas y químicas de los suelos.

Horizonte	Profundidad cm	DA gcm <sup>-3</sup>	R L A			Textura	pH	CO	N <sub>tot</sub>	P <sub>disp.</sub> mgkg <sup>-1</sup>	CIC cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	PO <sub>3ret</sub> %	SB
			-----%-----										
<b>Perfil 1</b>													
A <sub>h</sub>	0-24	0.75	14.67	57.69	27.65	FL	5.15	0.86	0.33	2.38	50.54	88.95	35.40
2B <sub>g</sub>	24-35	0.85	26.17	29.79	44.03	F	5.05	0.21	0.21	3.48	17.80	61.2	100
3C <sub>g</sub>	35-65	1.01	15.11	27.49	57.40	FA	5.55	0.03	0.06	4.32	17.99	29.15	100
<b>Perfil 2</b>													
A <sub>h</sub>	0-20	0.41	14.82	60.18	25.00	FL	4.65	1.79	0.52	3.52	24.03	69.8	95.41
C <sub>ij</sub> A <sub>h</sub>	20-40	0.50	10.15	29.81	60.04	FA	4.85	1.59	0.21	4.79	15.75	62.85	61.20
2C <sub>ij</sub>	40-62	0.44	16.63	55.12	28.25	FL	5.1	1.19	0.37	5.01	62.63	77.6	33.69
<b>Perfil 3</b>													
A <sub>h1</sub>	0-7/15	0.52	14.43	69.96	15.61	FL	5.75	2.06	0.43	4.63	79.74	77.3	25.75
A <sub>h2</sub>	7/15-17/22	0.50	12.99	62.33	24.68	FL	6.25	1.19	0.30	4.15	64.77	75.4	28.08
BA	17/22-33/62	0.51	9.65	64.29	26.06	FL	6.5	0.54	0.19	3.45	40.31	79.55	35.46
BC	33/62-51/84	0.55	12.60	50.91	36.49	FL	6.15	0.17	0.06	2.82	23.66	84.05	54.78
C	51/84-93	0.46	18.80	40.96	40.24	F	5.8	0.11	0.05	4.97	23.66	58.7	42.90
<b>Perfil 4</b>													
A <sub>h1</sub>	0-10	0.43	11.71	60.37	27.92	FL	5.95	1	0.27	2.88	29.61	67.2	87.83
A <sub>h2</sub>	10-22	0.65	12.57	52.86	34.58	FL	5.9	0.44	0.13	3.68	35.28	79.2	52.42
B <sub>w1</sub>	22-38	0.68	11.06	46.79	42.15	F	6.05	0.13	0.07	3.85	36.31	72.9	47.06
B <sub>w2</sub>	38-83/38	0.73	10.47	50.79	38.75	FL	5.8	0.33	0.09	3.65	31.29	68.75	41.65
2C	83/38-100/110	0.74	11.49	49.29	39.21	F	5.3	0.06	0.03	5.41	25.15	27.7	33.63
3C	100/110-143/150	0.69	11.42	48.67	39.91	F	5.2	0.02	0.02	5.47	12.31	10	54.05
4C	143/150-200	0.61	6.35	51.87	41.79	FL	5	0	0.01	4.33	7.20	35	98.57

**Nota:** DA: Densidad aparente. R: Arcilla, L: Limo, A: Arena, CO: Carbono orgánico, N<sub>tot</sub>: Nitrógeno total, P<sub>disp.</sub>: Fósforo disponible, CIC: Capacidad de intercambio catiónico. PO<sub>3ret</sub>: Retención de fosfatos. SB: Saturación de bases.

**Cuadro 2.** Propiedades físicas y químicas de los suelos (continuación).

Horizonte	Profundidad cm	DA gcm <sup>-3</sup>	R -----%-----	L	A	Textura	pH	CO -----%-----	N <sub>tot</sub>	P disp. mgkg <sup>-1</sup>	CIC cmolc <sub>1</sub> kg <sup>-1</sup>	PO <sub>3ret</sub> %	SB
<b>Perfil 5</b>													
A <sub>h</sub>	0-8/22	0.65	19.04	46.55	34.41	F	5.6	1	0.34	3.09	46.36	63.45	57.25
BA	8/22-45/50	0.87	14.81	45.84	39.35	F	5.75	0.67	0.10	2.57	28.34	80.6	72.10
B <sub>w1</sub>	45/50-66/80	0.72	13.66	45.35	40.99	F	5.6	0.44	0.06	3.05	21.33	76.15	100
B <sub>w2</sub>	66/80-125/134	0.68	10.92	36.18	52.90	FA	5.4	0.04	0.03	3.68	28.43	48.25	100
BC	125/134-160	0.76	13.74	50.51	35.74	FL	6.1	0.03	0.03	3.24	25.24	48.95	100
C	160-180	0.67	9.52	38.56	51.92	F	5.75	0.03	0.01	5.02	22.42	12.9	100
<b>Perfil 6</b>													
A <sub>h1</sub>	0-10	0.77	14.91	60.18	24.91	FL	5.4	1.26	0.29	4.19	45.05	82.4	45.64
A <sub>h2</sub>	10-22/25	0.76	12.85	56.23	30.92	FL	5.35	0.80	0.20	3.75	27.84	76.65	45.66
B <sub>w1</sub>	22/25-50	0.76	10.40	51.56	38.05	FL	6.05	0.27	0.10	2.82	20.13	85.8	66.42
B <sub>w2</sub> /B <sub>w1</sub>	50-80	0.74	13.51	39.91	46.58	F	6.1	0.14	0.06	2.62	21.61	76.95	91.86
B <sub>w3</sub>	80-96/110	0.91	12.23	26.83	60.93	FA	6.1	0.05	0.02	4.13	11.29	42.25	100
B <sub>w4</sub>	96/110-114	0.70	13.27	27.76	58.97	FA	6.05	0.02	0.03	5.10	9.90	32.3	100
C	114-120	0.69	16.44	48.65	34.91	F	5.8	0.01	0.03	2.74	29.43	26.1	74.94
<b>Perfil 7</b>													
A <sub>h</sub>	0-4/10	0.68	15.35	69.12	15.53	FL	5.65	1.44	0.43	3.51	36.40	76.4	94.64
B <sub>w1</sub>	4/10-38	0.73	14.64	61.19	24.17	FL	5.7	0.30	0.11	2.65	30.54	79.55	74.18
B <sub>w2</sub>	38-65/72	0.69	20.47	52.58	26.95	FL	5.9	0.14	0.08	3.66	23.85	62.3	100
2C	65/72-79	0.54	11.46	60.64	27.90	FL	6.05	0.09	0.06	2.98	26.73	42.6	100
3C	79-120	0.58	25.35	47.82	26.83	F	5.95	0.08	0.04	3.49	25.89	46.4	100

**Nota:** R: Arcilla, L: Limo, A: Arena, MO: Materia orgánica, N<sub>tot</sub>: Nitrógeno total, P<sub>disp.</sub>: Fósforo disponible, CIC: Capacidad de intercambio catiónico y CICE: efectiva, SB: Saturación de bases.



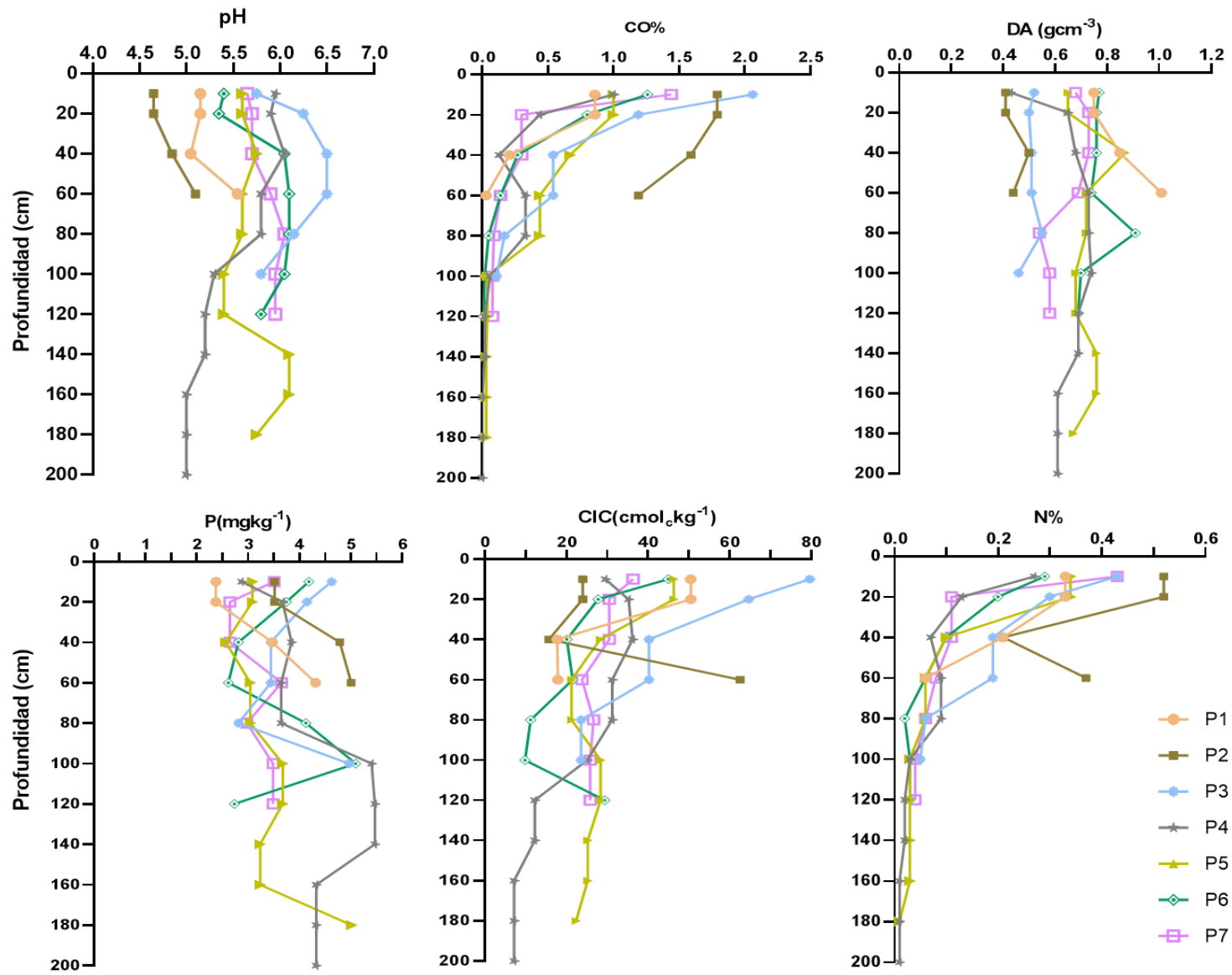


Figura 19. Propiedades de los perfiles de suelos.



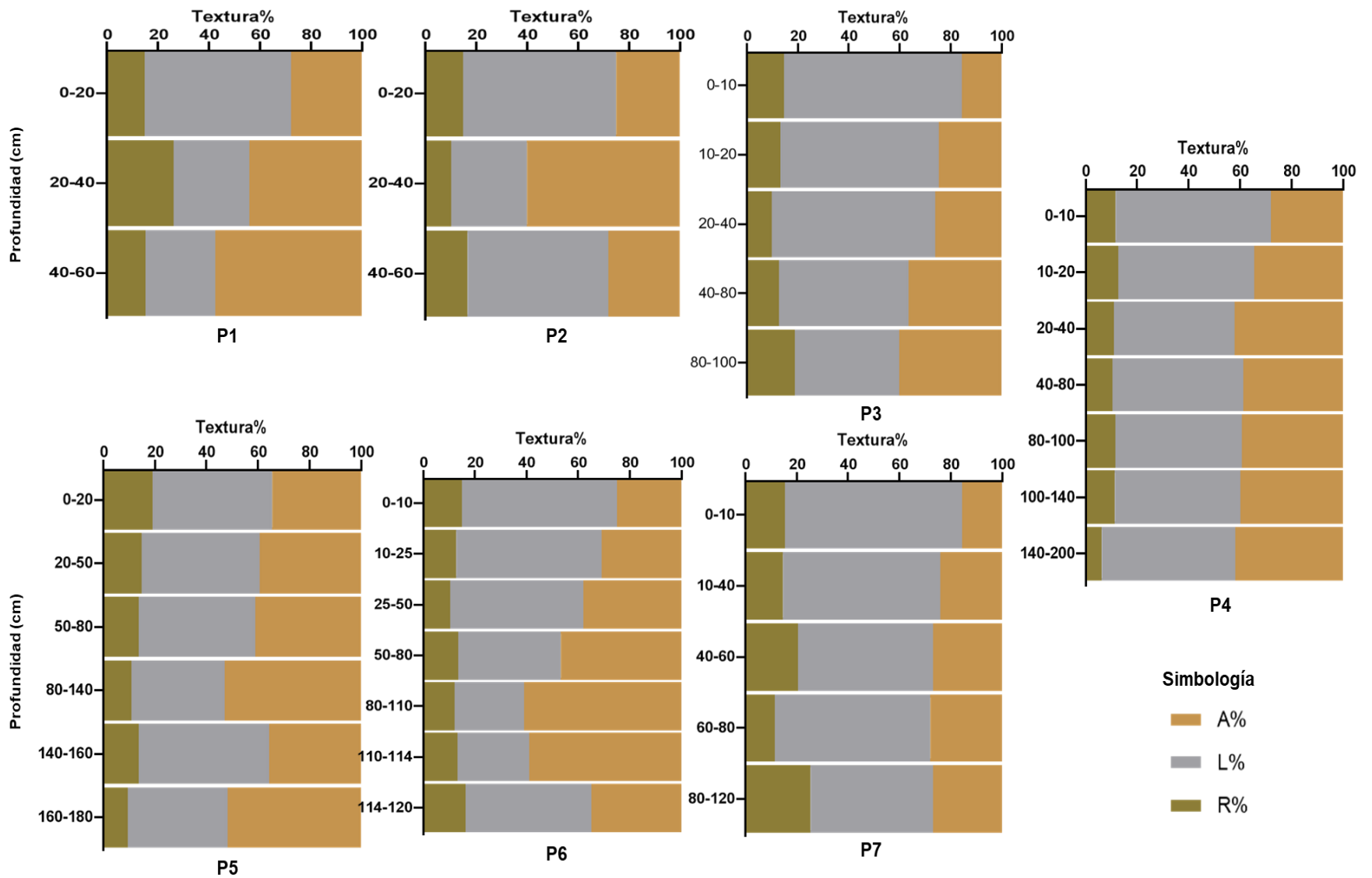


Figura 20. Textura de los suelos: proporción de las partículas del suelo de cada perfil por horizonte.

### 2.5.2 Propiedades ándicas

La Base de Referencia Mundial de Suelos de la FAO (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2015), agrupa a los Andosols en propiedades ándicas y vítricas. Las propiedades ándicas deben cumplir los siguientes requisitos:

1. Valor de  $Al_{ox} + 1/2Fe_{ox} \geq 2\%$  y
2. Densidad aparente  $\leq 0.9 \text{ kgdm}^{-3}$  y
3. Retención de fosfatos  $\geq 85\%$  y
4.  $\leq 25\%$  de carbono orgánico.

Las propiedades vítricas, en cambio, deben cumplir con los siguientes parámetros:

1.  $\geq 25\%$  de retención de fosfatos y
2. Una relación  $Al_{ox} + 1/2 Fe_{ox} \geq 0.4$  y
3.  $\geq 5\%$  de vidrio volcánico.

Para la Taxonomía de Suelos (USDA, 2014), las propiedades ándicas se diferencian en pobremente desarrolladas y bien desarrolladas. Las propiedades bien desarrolladas comparten los mismos parámetros que las propiedades ándicas de la WRB; mientras que las pobremente desarrolladas, presentan los mismos valores que las propiedades vítricas de la WRB, además de poseer  $\geq 30\%$  de arenas medias y el contenido de  $[Al + 1/2 Fe \times (15.625) + \%VV] \geq 35$ .

La WRB indica que las propiedades ándicas de los Andosols deben tener un espesor combinado  $\geq 30$  cm dentro de  $\leq 100$  cm de la superficie del suelo y comenzando dentro de los primeros 25 cm de su superficie (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2015). La Taxonomía de Suelos (ST) señala que las propiedades ándicas de los Andosols se encuentren en  $\geq 60\%$  del espesor, dentro de los 60 cm de la superficie del suelo mineral, sin ningún contacto lítico, dénsico, horizonte petrocálcico o duripán o  $\geq 60\%$  del espesor entre la superficie del suelo mineral y estos contactos (USDA, 2014).

La Figura 21 muestra los valores asociados de cada perfil, comparados con el parámetro de las propiedades ándicas (línea punteada). Puesto que todos los suelos presentaron un porcentaje  $\leq 25\%$  de carbono orgánico, no se tomó en cuenta esta propiedad para ser graficada.

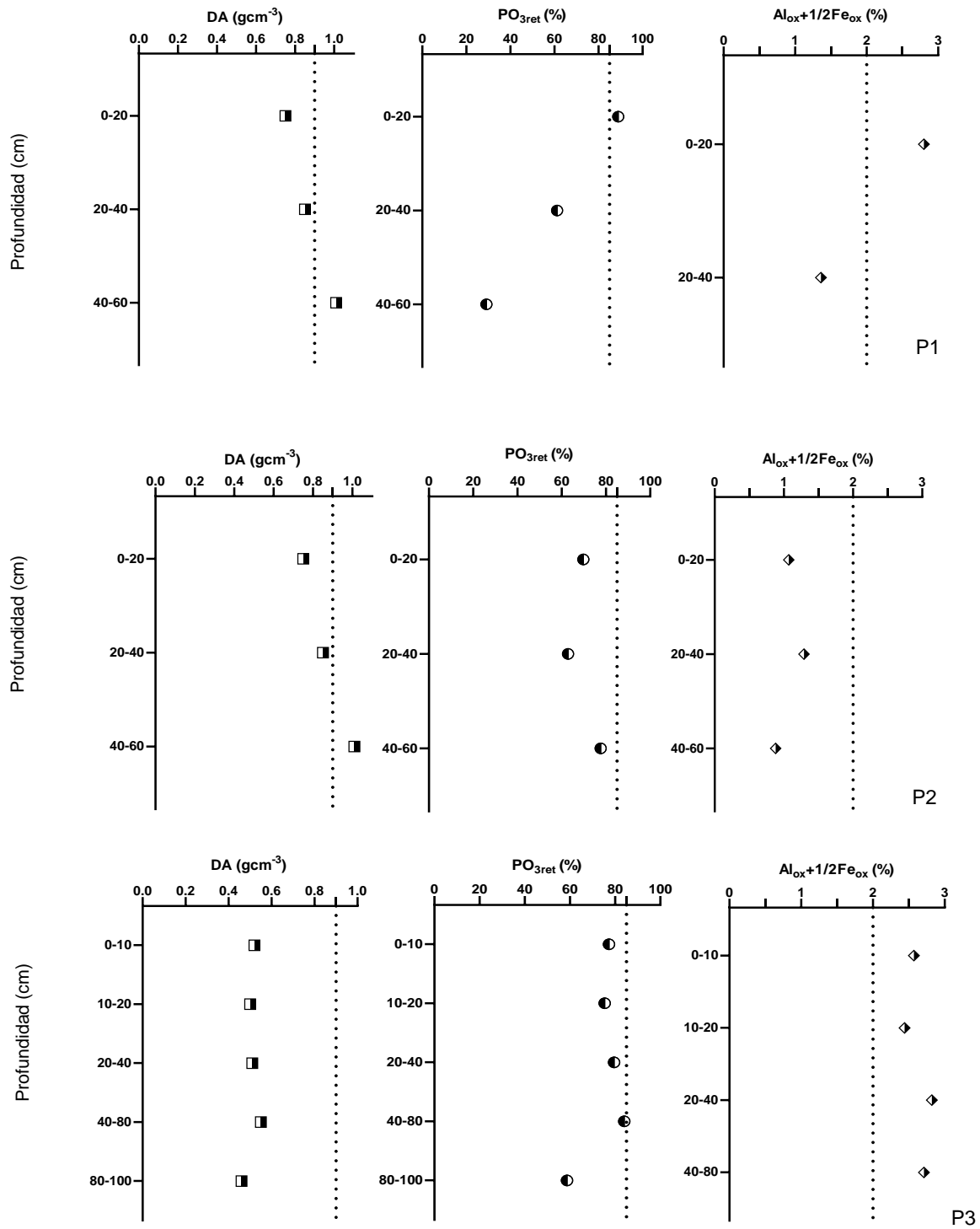


Figura 21. Propiedades ándicas de cada perfil y criterios de clasificación.

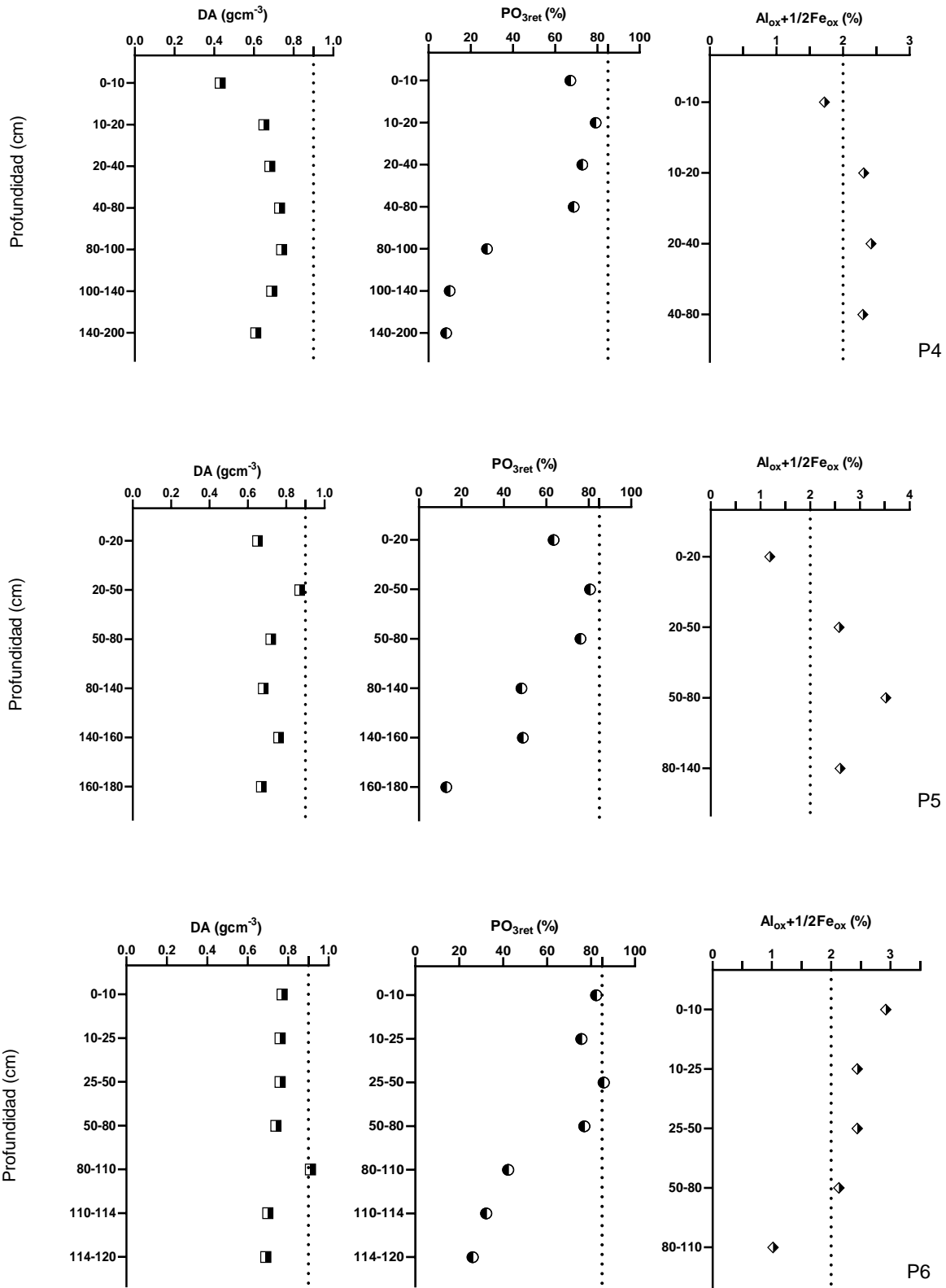
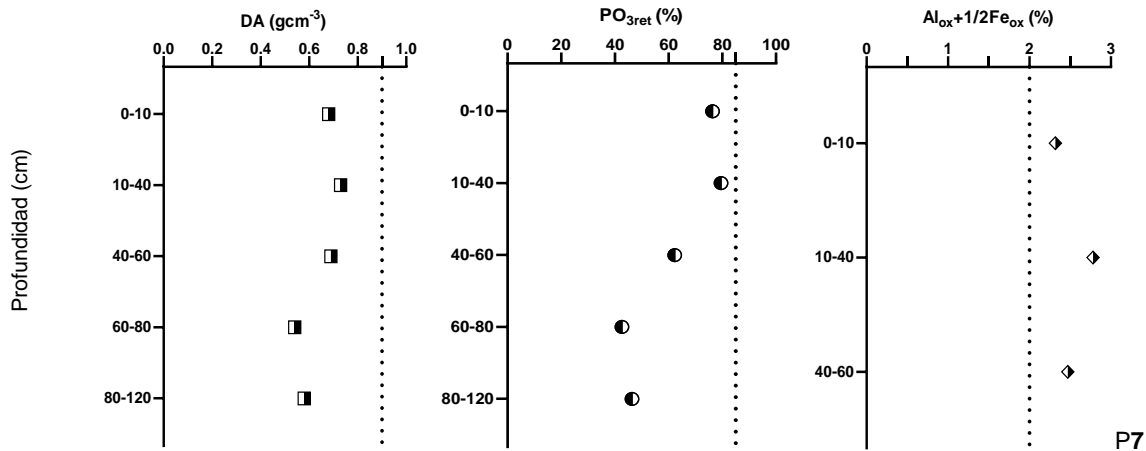


Figura 21. Propiedades ándicas de cada perfil y criterios de clasificación (continuación).



**Figura 21.** Propiedades ándicas de cada perfil y criterios de clasificación (último).

Todos los suelos estudiados poseen una densidad aparente baja  $\leq 0.9 \text{ g cm}^{-3}$  y un contenido  $\leq 25\%$  de CO. Sin embargo, los valores de retención de fosfatos ( $\text{PO}_{3\text{ret}}$ ) y relación  $\text{Al}_{\text{ox}}+1/2\text{Fe}_{\text{ox}}$  son diferentes, siendo estos los que determinan el grado de desarrollo de las propiedades ándicas en estos suelos. Considerando solo los parámetros de estas variables, únicamente el perfil 1 en su horizonte superficial cumpliría con los criterios de las propiedades ándicas propiamente dichas. Por tanto, para especificar el estado de desarrollo de las propiedades en cada suelo, se consideran los otros criterios de ambos sistemas de clasificación: los criterios de las propiedades vítricas y las clases mineralógicas a nivel de familia en ST y los criterios de los calificadores principales en WRB (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Propiedades ándicas de los suelos y criterios de clasificación.

Horizonte	Si <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>o</sub>	Al + ½Fe	Al+½Fe (16.625) + (%VV)= ≥36.25	Ferrihidri- ta %Fe (1.75)	Clase mineralógica en la sección de control en ST						Propiedades				
							8(%Si) +2(%Fe) >5 *	8(%Si) > 2(%Fe) ‡	Amórfica	Ferrihi- drítica	Vítrea >30% VV	Mezclada	V		A		PA
	-----%-----												ST	WRB	ST	WRB	WRB
<b>Perfil 1</b>																	
A <sub>h</sub>	1.08	2.46	0.69	2.8	93.75	1.2	10.01	8.64>1.3 7	x	x	50	x	-	-	x	x	-
2B <sub>g</sub>	0.53	0.86	1.01	1.36	86.25	1.77	6.26	4.24>2.0 2	x	x	65	x	x	x	-	-	x
<b>Perfil 2</b>																	
A <sub>h</sub>	0.34	0.71	0.73	1.07	51.72	1.29	4.19	2.72>1.4 7	-	x	35	-	x	x	-	-	-
C <sub>ij</sub> A <sub>h</sub>	0.32	0.7	1.19	1.29	70.16	2.09	4.91	2.53>2.3 9	-	x	50	-	x	x	-	-	x
<b>Perfil 3</b>																	
A <sub>h1</sub>	0.7	2.26	0.66	2.57	65.16	1.16	6.95	5.63>1.3 2	x	x	25	-	x	x	-	-	x
A <sub>h2</sub>	1.11	2.31	0.25	2.44	63.13	0.44	9.39	8.88>0.5 1	x	x	25	-	x	x	-	-	x
BA	1.4	2.48	0.67	2.82	74.06	1.18	12.55	11.2>1.3 5	x	x	30	x	x	x	-	-	x
BC	1.36	2.43	0.56	2.71	-	0.97	12.03	10.91> 1.11	x	x	-	x	-	-	x	x	-
<b>Perfil 4</b>																	
A <sub>h1</sub>	1.18	1.41	0.63	1.72	56.88	1.1	10.67	9.40>1.2 6	x	x	30	x	x	x	-	-	x
A <sub>h2</sub>	0.94	2.02	0.58	2.31	66.09	1.01	8.7	7.55>1.1 6	x	x	30	x	x	x	-	-	x
B <sub>w1</sub>	nd	1.37	2.09	2.42	97.81	3.67	-	->4.19	-	-	60	-	x	x	-	-	x
B <sub>w2</sub>	1.25	2.09	0.43	2.3	-	0.76	10.9	10.03> 0.87	x	x	-	x	x	x	-	-	x

**nd:** no determinado. **Amórfica si:** \* y ‡. **Ferrihidrítica si:** ‡, **Mezclada si:** amórfica, ferrihidrítica y vítrea. **V:** Vítricas, **A:** Ándicas, **PA:** Proto-ándicas.

**Nota:** Se omitieron los horizontes C, donde domina el material tétrico.

**Cuadro 3.** Propiedades ándicas de los suelos y criterios de clasificación (continuación).

Horizonte	Si <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>o</sub>	Al + ½Fe	Al+½Fe (16.625) + (%VV)= ≥36.25	Ferrihidri- ta %Fe (1.75)	Clase mineralógica en la sección de control en ST						Propiedades				
							8(%Si) +2(%Fe) >5 *	8(%Si) > 2(%Fe) ‡	Amórfica	Ferrihi- drítica	Vítrea >30% VV	Mezclada	V		A		PA
			%										ST	WRB	ST	WRB	WRB
<b>Perfil 5</b>																	
A <sub>h</sub>	0.62	0.86	0.67	1.19	48.59	1.16	6.32	4.99>1.33	x	x	30	x	x	x	-	-	x
BA	1.38	2.13	0.9	2.58	70.31	1.58	12.84	11.03>1.8 1	x	x	30	x	x	x	-	-	x
B <sub>w1</sub>	0.75	3.1	0.83	3.52	115	1.46	7.67	6.0>1.67	x	x	60	x	x	x	-	-	x
B <sub>w2</sub>	1.04	2.29	0.63	2.6	-	1.1	9.57	8.31>1.26	x	x	-	x	x	x	-	-	x
<b>Perfil 6</b>																	
A <sub>h1</sub>	nd	1.04	3.77	2.92	80.63	6.6	-	->7.54	-	-	35	x	x	x	-	-	x
A <sub>h2</sub>	0.93	1.99	0.9	2.44	73.13	1.57	9.24	7.44>1.79	x	x	35	x	x	x	-	-	x
B <sub>w1</sub>	1.27	2.08	0.71	2.44	88.13	1.25	11.62	10.19>1.4 3	x	x	50	x	-	-	x	x	-
B <sub>w2</sub> /B <sub>w1</sub>	1.26	1.71	0.83	2.13	-	1.45	11.7	10.04>1.6 6	x	x	-	-	x	x	-	-	x
B <sub>w3</sub>	0.65	0.62	0.8	1.02	-	1.4	6.81	5.21>1.60	x	x	-	-	x	x	-	-	-
<b>Perfil 7</b>																	
A <sub>h</sub>	0.83	1.8	1.04	2.32	71.25	1.83	8.75	6.66>2.09	x	x	35	x	x	x	-	-	x
B <sub>w1</sub>	1.32	2.23	1.11	2.78	88.44	1.94	12.74	10.52>2.2 2	x	x	45	x	x	x	-	-	x
B <sub>w2</sub>	1.03	1.92	1.1	2.47	88.59	1.93	10.44	8.23>2.20	x	x	50	x	x	x	-	-	x

**nd:** no determinado. **Amórfica si:** \* y ‡. **Ferrihidrítica si:** ‡, **Mezclada si:** amórfica, ferrihidrítica y vítrea. **V:** Vítricas, **A:** Ándicas, **PA:** Proto-ándicas.

**Nota:** Se omitieron los horizontes C, donde domina el material tétrico.

Todos los suelos, con excepción del perfil 2, tienen una relación  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox} \geq 2$  en una o más capas y un alto porcentaje de vidrio volcánico (>30%); no obstante, el porcentaje de  $PO_{3ret}$  es <85% en la mayoría de los suelos (Figura 21). Los suelos de los perfiles 1, 3 y 6 tienen el mayor desarrollo de sus propiedades ándicas, debido a que la relación  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$  es >2 y el  $PO_{3ret}\%$  es más cercano a 85%; aunque en el perfil 1 se encuentran solo en el horizonte superficial. El perfil 2 posee los valores más bajos respecto a los parámetros de las propiedades ándicas, por una relación  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}\%$  <2 y el  $PO_{3ret}\%$  más bajo de todos los suelos, por lo que es considerado con propiedades ándicas pobremente desarrolladas y vítricas de acuerdo a los sistemas ST y WRB respectivamente (Cuadro 3).

El resto de los suelos tiene valores más bajos a los parámetros de las propiedades ándicas, considerándose dentro de las propiedades ándicas pobremente desarrolladas en la ST; en tanto que, en el sistema de clasificación de la WRB, estos valores se ajustan dentro de las propiedades proto-ándicas ( $Al_{ox}+1/2Fe_{ox} \geq 1$ ), de tal forma que se encuentran en un estado intermedio de desarrollo.

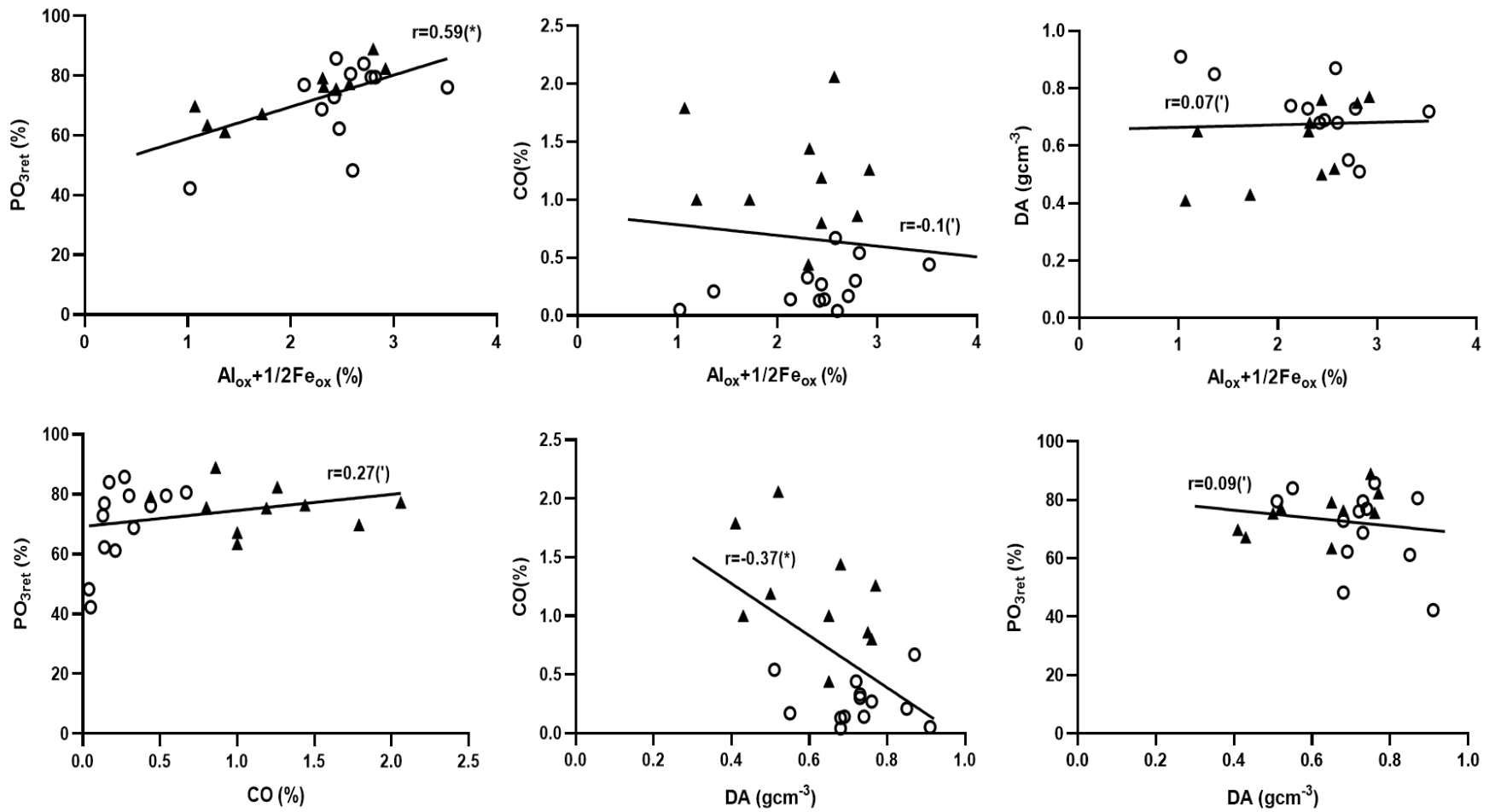
Las propiedades ándicas de estos suelos no presentan un comportamiento agrupado por el tipo de vegetación, como es el caso de los perfiles 1 y 2 que a pesar de tener una vegetación y topografía similar, los valores de los elementos activos ( $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$ ) son muy diferentes en los primeros 20 cm. De igual modo, los perfiles 3 a 5 con una misma vegetación de bosque de oyamel, tienen valores de  $PO_{3ret}\%$  diferentes. El perfil 7 que se ubica en la posición más baja de la catena, tiene relaciones de  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$  incluso más altas que los perfiles 1 y 2; por lo que, bajo este esquema, el desarrollo de las propiedades ándicas no es un reflejo de la posición altitudinal de estos suelos. La característica que comparten la mayoría de los perfiles es un aumento de  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$  y  $PO_{3ret}$  en horizontes subyacentes, que es donde se encuentran los horizontes de transformación, disminuyendo en los horizontes superficiales por el aporte continuo de materia orgánica y exposición e intercambio de materia y energía con el ambiente.

La mayoría de los suelos tiene una clase mineralógica mezclada, es decir, que, pese a su alto contenido de vidrio volcánico, la cantidad de minerales amorfos es tal que su relación es mayor a 5. En cambio, los suelos no tienen clases mineralógicas



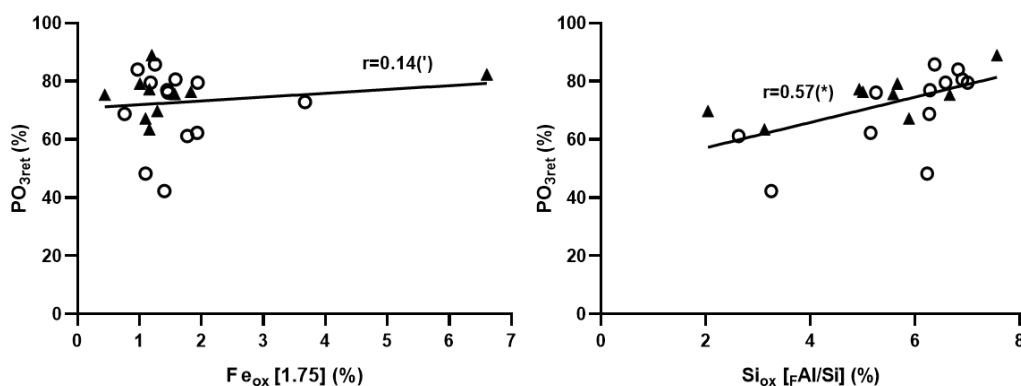
ferrihidricas, puesto que presentan bajos porcentajes de ferrihidrita (<2%) en la mayoría de los suelos.

Se realizaron pruebas de correlación entre las propiedades ándicas de los suelos, entre grupos de valores de los horizontes A y B para una comparación más clara. En la Figura 22, se muestra una mayor correlación entre las variables  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$  y  $PO_{3ret}$ , la cual es estadísticamente significativa. Las variables CO y DA también poseen una correlación estadísticamente significativa, aunque con un valor de r bajo. En cuanto al comportamiento de estas propiedades entre horizontes, puede notarse una agrupación de valores por horizontes, muy marcada entre las correlaciones donde la variable CO% está incluida, lo cual indica simplemente que la diferencia en el contenido de carbono orgánico entre los horizontes A y B de los suelos, es muy marcada.



**Figura 22.** Correlaciones de las propiedades ándicas en los horizontes A (▲) y B (O) de los suelos.  
 (') No significativo, (\*) Significativo, con  $\alpha=0.05$ .

Para determinar que tipo de amorfos contribuye a la retención de fosfatos en esta relación, se generó una nueva correlación, separando los amorfos del Fe (ferrihidrita:  $Fe_{ox} \times [1.7]$  (Childs, 1985)) y los amorfos del Al (alofano-imogolita:  $Si_{ox} \times \text{factor } Al_{ox}/Si_{ox}$  (Parfitt, 1990a)). En la figura 23, se observa que los minerales amorfos del Al, son los que influyen en esta retención, por su correlación más alta y significativa ( $r=0.57$ ).



**Figura 23.** Correlaciones entre la retención de fosfatos y los minerales amorfos en los horizontes A(▲) y B (O) de los suelos. (') No significativo, (\*) Significativo, con  $\alpha=0.05$ .

### 2.5.3 Clasificación de suelos

En el Cuadro 4 se muestra la clasificación obtenida para cada suelo, con ambos sistemas de clasificación, así como su epipedón (ST) u horizonte superficial (WRB) asignado.

**Cuadro 4.** Clasificación de los perfiles de suelos con los sistemas de clasificación WRB y ST.

Perfil	Epipedón	WRB	ST
1	Mólico	Eutric Umbric Gleyic Silandic Andosol (loamic)	ceniza, francosa gruesa, mezclada, semiactiva, frígida Typic Endoaquands
2	Mólico	Eutric Mollic Gleyic Vitric Andosol (gelic, loamic, protoandic, thixotropic)	ceniza, francosa gruesa, vítrea, frígida Typic Endoaquands
3	Úmbrico	Dystric Umbric Tephric Vitric Andosol (protoandic, silty)	ceniza, francosa gruesa, amórfica, subactiva, mélica Eutric Hapludands
4	Ócrico	Eutric Vitric Andosol (protoandic, silty)	ceniza, francosa gruesa, mezclada, activa, mélica Eutric Hapludands

Perfil	Epipedón	WRB	ST
5	Mólico	Eutric Mollic Vitric Andosol (protoandic, loamic)	ceniza, francosa fina, mezclada, activa, méstica Eutric Hapludands
6	Úmbrico	Dystric Umbric Vitric Andosol (protoandic, siltic)	ceniza, francosa gruesa, mezclada, semiactiva, méstica Eutric Hapludands
7	Ócrico	Eutric Vitric Andosol (protoandic, siltic)	ceniza, francosa gruesa, mezclada, activa, méstica Eutric Hapludands

Pese a que algunos suelos poseen propiedades ándicas, ninguno cumplió los requisitos de color y porcentaje de CO ( $\geq 6\%$ ) para un epipedón melánico, lo cual indica que los Andosols aún no son lo suficientemente desarrollados para producir y almacenar tal cantidad de materia orgánica. Los perfiles 3 y 6 formaron un epipedón úmbrico debido a una menor saturación de bases, explicada por un pH más ácido en los horizontes superficiales (Cuadro 2). Es en estos perfiles donde se observaron condiciones más húmedas, con estratos de musgo y líquen en el perfil 3 y litter de pino en el perfil 6. Los perfiles con epipedones mólicos fueron 1, 2 y 5, con una saturación de bases  $>50\%$  y  $pH > 5$ . Los perfiles 4 y 7 no poseen el color, ni el espesor para poder formar alguno de estos epipedones. Cabe resaltar que, en un mismo tipo de vegetación, por ejemplo, en el bosque de oyamel (perfiles 3, 4 y 5) pueden formarse tres tipos de epipedones distintos, dependiendo de las condiciones de humedad y pH.

Ninguno de los suelos contiene horizontes de diagnóstico que puedan distinguirlos; no obstante, las diferencias se encuentran en las propiedades y características de diagnóstico (WRB). Respecto a las propiedades de diagnóstico, las propiedades *ándicas* son de tipo proto-ándicas para la mayoría de los suelos y silándicas ( $Si_{ox} > 0.6\%$ ) para el perfil 1; en tanto que las propiedades *gléyicas* se manifiestan solo en el perfil 1. Respecto a las características de diagnóstico, las condiciones ácuicas influyen en los suelos de los perfiles 1 y 2, de tal manera que propician procesos de saturación y rasgos redoximórficos.

En los calificadores principales de la WRB (Cuadro 4) de estos suelos, puede apreciarse que las condiciones de saturación y procesos óxido-reducción (*Gleyic*) son los más condicionantes para los suelos de pastizal en esta zona; mientras que en el resto de los

suelos son la transformación de la materia orgánica (*Mollic* o *Umbric*) y el grado de intemperismo y desarrollo de los suelos (*Vitric* o *Silandic*). En cuanto a la Taxonomía de Suelos, también se diferencian las condiciones particulares de saturación (*Aquands*) de los suelos de pastizal; aunque la clasificación para el resto de los suelos es muy similar con este sistema.

#### **2.5.4 Efecto topoclimático y propiedades ándicas de los suelos**

Se ha referido que las propiedades del suelo en cada posición de la catena, son condicionadas por el efecto de la topografía, el clima, el drenaje e incluso la vegetación. Para especificar qué tan responsables son estos factores, se generó un análisis de regresión múltiple contemplando los siguientes criterios:

**Covariables independientes.** Se contemplaron los factores ambientales a) topográficos: pendiente y curvatura de la superficie; b) vegetación: por medio del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI); c) climáticos: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y d) drenaje ( $\text{mdía}^{-1}$ ): a través de la conductividad hidráulica del suelo. La pendiente (grados) y la curvatura (grados) fueron obtenidas a partir del modelo de elevación y el NDVI con el uso de imágenes ráster, bandas 4 y 5 (USGS, 2021). La temperatura se obtuvo con el supuesto del gradiente adiabático húmedo (Hemond y Fechner, 2015) y la conductividad hidráulica con la textura del suelo (Van der Molen et al., 2007).

**Variables dependientes.** Se consideraron las variables que corresponden a las propiedades ándicas: carbono orgánico (CO), densidad aparente (DA), relación de Al y Fe activos ( $\text{Al}+1/2\text{Fe}$ ) y retención de fosfatos ( $\text{PO}_3$ ). Para conocer si el efecto de los factores ambientales cambia con la profundidad del suelo, se estandarizaron tres profundidades para los siete perfiles: 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Además de estas propiedades, se tomó en cuenta la profundidad del suelo como una variable dependiente, para saber si la profundidad de desarrollo está sujeto también a estos factores.

En el Cuadro 5 se muestran los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de cada una de las ecuaciones de regresión múltiple de las variables ambientales sobre cada propiedad (Variable Y) y los coeficientes de regresión estandarizados ( $\beta_i$ ), que son números adimensionales que indican el peso que cada variable X tiene sobre la ecuación, de forma que el coeficiente más alto es la variable ambiental que tiene más influencia sobre la propiedad del suelo (ANEXO B).

**Cuadro 5.** Resultados de las ecuaciones de regresión por profundidad.

Variable Y	Profundidad	R <sup>2</sup>	$\beta_i$				
			S	Cu	V	T	D
CO	0-10	0.72	6.205	8.158	2.048	3.624	3.895
	10-20	0.79	6.345	7.506	2.859	3.694	3.824
	20-30	0.34	1.331	1.347	0.008	0.282	0.831
Al+1/2Fe	0-10	0.50	2.989	3.113	1.202	0.977	0.782
	10-20	0.53	1.414	1.499	0.859	0.887	1.315
	20-30	1.00	0.427	0.272	1.061	0.613	0.174
DA	0-10	0.45	4.715	4.943	2.523	1.338	2.176
	10-20	0.48	2.130	3.261	0.488	2.083	1.912
	20-30	0.53	0.021	0.483	0.529	0.726	0.056
PO <sub>3</sub>	0-10	0.52	4.836	5.442	2.359	2.086	1.925
	10-20	0.56	2.538	2.779	1.019	1.104	1.949
	20-30	1.00	0.498	0.044	0.091	0.592	0.178

Variable Y	R <sup>2</sup>	$\beta_i$	$\beta_i$	$\beta_i$
Profundidad		EI	S	Cu
Profundidad	0.97	0.852	0.075	0.765

\*Valores de  $\beta_i$  más altos.

Los coeficientes de determinación son altos para la variable profundidad y para la profundidad 20-30 cm de las variables Al+1/2Fe y PO<sub>3</sub>; mientras que los primeros 20 cm de la variable carbono orgánico tienen valores moderados. Los valores diferentes de R<sup>2</sup> de una misma variable Y indican que el modelo cambia con la profundidad, empleando estos parámetros. Los coeficientes de regresión parcial tienen un comportamiento similar entre variables Y: para el carbono orgánico, el factor más alto es la curvatura, seguido de la pendiente en todas las profundidades y el valor más bajo es el del NDVI en todas las profundidades. En las variables Al+1/2Fe, densidad aparente y retención de PO<sub>3</sub>, los coeficientes más altos pertenecen a la pendiente y la curvatura en los primeros 20 cm, y de 20 a 30 cm a la temperatura y el NDVI. Finalmente, en la variable profundidad, la elevación tiene un peso más alto en la ecuación, seguido de la curvatura y finalmente la pendiente.

Bajo este esquema de regresión lineal múltiple y empleando estas variables con sus diferentes magnitudes, se puede interpretar que las variables topográficas tienen mayor influencia sobre las propiedades ándicas; siendo la curvatura el factor ambiental con más peso, principalmente en el horizonte superficial de los perfiles.

## 2.6 DISCUSIÓN

### 2.6.1 Propiedades de los suelos

Las propiedades de los suelos de esta secuencia se encuentran dentro de un intervalo cercano de valores; con excepción de los perfiles 2 y 3, principalmente en los horizontes superficiales. En el suelo de pastizal con condiciones de saturación y congelamiento (perfil 2), el pH es más ácido, existe una menor densidad aparente y un mayor contenido total de carbono orgánico y nitrógeno. Tsai et al. (2010) y Tsui et al. (2013), explican que las temperaturas más frías en las zonas más altas, tienen una evapotranspiración más baja y un mayor lavado, que favorecen en la acumulación de la materia orgánica y la precipitación de materiales amorfos.

El suelo de bosque de oyamel con condiciones más húmedas (perfil 3), posee una densidad aparente más baja y mayores contenidos totales de carbono orgánico, nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico, respecto a los otros suelos con el mismo tipo de vegetación. Harsh et al. (2002) describen que el pH y el contenido de carbono orgánico en Andosols, a lo largo del perfil, dependen del tipo de vegetación; mientras que la baja densidad aparente es consecuencia del rol entre dos factores: el alto contenido de alófanos para Andosols con bajo contenido de humus o de la alta acumulación de humus en Andosols no alofánicos.

Diversos autores han examinado la composición de la materia orgánica en diferentes tipos de vegetación en Andosols, relacionando los procesos que intervienen en su acumulación y estabilidad. Panichini et al. (2012) encontraron una mayor acumulación de materia orgánica (MO) en suelos de bosque tropical en comparación con pastos agrícolas, de modo que en el suelo de bosque los complejos húmicos y las formas particuladas de MO fueron más sustanciales; mientras que en los pastos, los alófanos fueron más importantes para su acumulación. Tonneijck et al. (2010), hallaron en una secuencia altitudinal de suelos, un mayor contenido de MO y una baja densidad aparente en los horizontes superficiales de Andosols de vegetación de páramo con respecto a parches de vegetación de bosque, atribuyendo la estabilidad de MO a los complejos húmicos.

En términos de calidad de suelos, que sostienen una vegetación natural, los suelos de la catena poseen valores adecuados en sus propiedades, únicamente expresan una

insuficiencia de fósforo. Puesto que los Andosols son susceptibles a degradarse, cualquier alteración ambiental podría afectar sus propiedades físicas y químicas (Hernández-Ordóñez et al., 2017) o aumentar la mineralización de carbono, repercutiendo de forma distinta en los tipos de vegetación (Barrales-Brito, 2020).

### **2.6.2 Propiedades ándicas**

La manifestación de las propiedades ándicas fue diferencial entre los suelos, por la relación  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$  y la retención de fosfatos: el perfil 2 es considerado el suelo con el menor desarrollo de estas propiedades por los valores más bajos; los perfiles 4,5 y 7 mostraron valores de  $PO_{3ret}\%$  más bajos que el criterio; mientras que los suelos de los perfiles 1, 3 y 6 tienen el mayor desarrollo de las propiedades ándicas, por la relación  $Al\%+1/2Fe\% >2$  y el  $PO_{3ret}$  cercano a 85%. Con base en ello, estos suelos son considerados Andosols con propiedades ándicas pobremente desarrolladas para el sistema de Taxonomía de Suelos; mientras que, la clasificación de la WRB refiere a estas propiedades como proto-ándicas, de forma que se encuentran en un estado de desarrollo intermedio.

La mayoría de los suelos tienen una clase mineralógica mezclada, lo cual explica que, pese a su alto porcentaje de vidrio volcánico, la cantidad de minerales amorfos formados es sustancial. Los los perfiles 2 y 3 cuentan con una clase mineralógica dominada por vidrio volcánico y amorfos respectivamente. La composición del material parental de tefras andesíticas, que pueden contener más del 50% de vidrio volcánico (Parfitt, 1990) y los efectos de la precipitación que no tengan el suficiente impacto para poder lixiviar el silice, explican la cantidad de vidrio volcánico presente en estos Andosols. Asimismo, un bajo porcentaje de ferrihidrita indica bajas tasas de intemperismo.

Aunque los suelos de pastizal se ven dominados por procesos de gleyzación y crioturbación, estos no han limitado el intemperismo y formación de minerales amorfos ( $Al_{ox}+1/2Fe_{ox} >1\%$ ). Algunos autores (Arnalds, 2004; Buytaert, 2006; Childs et al. 1990,1992; Oskarsson, 2012) han identificado cantidades altas de amorfos en Andosols pobremente drenados o sujetos a procesos periódicos de óxido-reducción.

Entre las correlaciones de las propiedades ándicas de los suelos, se muestra una relación directa entre los cationes activos y la retención de fosfatos, la cual, aunque moderada ( $r=0.59$ ), fue estadísticamente significativa. Se demostró que los minerales



amorfos del Al (alófano e imogolita) son los que contribuyen significativamente a la retención de fosfatos de los suelos. Diversos autores han observado esta correlación en Andosols (Alcalá et al., 2009; Campos-Cascaredo et al., 2001; Parfitt, 1989). Cabe destacar que los ambientes húmedos y fríos con un pH de 5 a 7 propician la formación de minerales amorfos del Al (Ugolini y Dahlgren, 1991); mientras que la ferrihidrita requiere ambientes más oxidantes y un mayor intemperismo de ferromagnesianos (Bigham et al., 2002; Schwertmann, 1985).

Es interesante señalar que, pese a la relación significativa entre estas propiedades, la retención de fosfatos fue menor a 85%, incluso en los suelos donde la relación  $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}>2$ . Harsh et al. (2002), describen que los alófanos ricos en Al generan una carga neta positiva y los alófanos ricos en Si una carga negativa, promoviendo un intercambio aniónico y catiónico respectivamente. Esta explicación sugiere una mayor presencia de alófanos ricos en Si en estos Andosols, que se argumenta por la naturaleza del material parental, el contenido de vidrio volcánico y los valores moderados a altos de CIC.

La densidad aparente mostró una relación inversa con el CO%, con un coeficiente bajo ( $r=-0.37$ ), pero estadísticamente significativo. Esta tendencia se relaciona comúnmente a que el aumento en el contenido de carbono orgánico por las partículas alofánicas, produce una mayor microporosidad y con ello una disminución en la densidad aparente (Huntington et al., 1989). Yagasaki et al. (2006) determinaron que en suelos de bosque con una cantidad considerable de amorfos, en los horizontes A de los suelos volcánicos, el Al activo está controlado por los complejos formados con la materia orgánica.

Finalmente, el CO% y los elementos activos no tuvieron una relación ni siquiera positiva, lo que indica que los suelos no son lo suficientemente desarrollados para formar la cantidad de minerales amorfos necesaria para el aumento y retención de materia orgánica. Este comportamiento es explicado por Torn et al. (1997), que a través del estudio de una cronosecuencia de Andosols, observan correlaciones más altas entre los contenidos de carbono orgánico y minerales amorfos, como función del desarrollo de los suelos. Otros autores (Basile-Doelsch et al., 2005; Churchman & Tate, 1987; Clapp et al., 1991), también atribuyen el papel de los minerales amorfos en la retención de materia

orgánica en el suelo. Chevallier et al. (2010) prueban que, además, la estabilidad del carbono orgánico se debe al confinamiento de éste en estructuras porosas más finas.

### **2.6.3 Propiedades ándicas en la catena**

El análisis de regresión múltiple efectuado a las propiedades ándicas de los suelos demostró que el  $PO_{3ret}\%$  es la más dependiente de las variables ambientales, seguido de la relación  $Al+1/2Fe$  y la menos dependiente es la densidad aparente. El efecto de las variables ambientales fue más alto en la parte superficial de los suelos para el CO y mayor en las capas subsuperficiales para el  $Al+1/2Fe$  y  $PO_{3ret}$ . La forma y el grado de la pendiente fueron los factores que más influyeron sobre las propiedades analizadas. El NDVI y la temperatura tuvieron menos influencia sobre las mismas. Derivado de estos resultados se puede sugerir el cambio del NDVI por otro índice o variable, donde los diferentes tipos de vegetación observados en los perfiles de los suelos sean incluidos en el modelo.

Existen diversos estudios que comparan las diferentes condiciones ambientales sobre las propiedades de los Andosols. Broquen et al. (2013) observaron mayores concentraciones de MO y actividad del Al y una densidad aparente más baja en suelos de bosque con régimen de humedad údico en las partes altas de la ladera; mientras que en los suelos de estepas con régimen de humedad xérico en las partes bajas de la ladera, se destacó una menor tasa de intemperismo y mayor mineralización de materia orgánica. Por otra parte, Egli et al. (2007) asocian la elevación y la disminución de la temperatura con una menor concentración de la MO, mayor presencia de imogolita y menor intemperismo, respecto a una mayor acumulación y estabilización de CO en altitudes más bajas. Otros autores (Becker et al., 2019; Tsui et al., 2013) también señalan la influencia del gradiente climático sobre los procesos de intemperismo: hallando en las partes altas, una concentración de alófanos más alta, asociada con mayores porcentajes de retención de fósforo, CO y retención de agua y una mayor descomposición de MO en las partes más bajas. Si bien, las condiciones ambientales de menor humedad y mayor temperatura y disponibilidad de oxígeno, incrementan la mineralización del carbono orgánico del suelo (Huang et al., 2019; Kirkels et al., 2014) no obstante, la acumulación o descomposición de la MO es influenciada por el pH (Kleber et al., 2015), así como por

la composición de su microbiota (Miltner et al., 2012) y sus relaciones ecológicas (Hoffland et al., 2020).

Pese a que el NDVI en este trabajo, no contribuyó significativamente sobre las propiedades ándicas de estos suelos, el papel de la vegetación es sustancial como factor ambiental. Becker et al. (2019) muestran que los diferentes tipos de vegetación, acotados por los gradientes climáticos, tienen influencia significativa sobre la materia orgánica del suelo. Drijber et al. (1990) explican que la vegetación sobre el contenido de CO no tiene un rol independiente de otros factores ambientales. Ellos encontraron en suelos del volcán Iztaccíhuatl, que el intemperismo incrementó con la elevación, explicado por las cantidades de Al y Si extractables y un mayor porcentaje de CO en los horizontes A en la vegetación de Pinus, zacatonal y finalmente de Abies, habiendo un mayor grado de humificación en el zacatonal.

Los modelos de regresión lineal múltiple han sido aplicados por algunos autores (Olmedo et al., 2012; Percival et al., 2000) para poder explicar las asociaciones de las variables ambientales sobre las propiedades del suelo. El uso de modelos de regresión lineal múltiple, que integren las covariables ambientales con las propiedades de los suelos, puede ser útil incluso para cartografía de suelos con los pertinentes ajustes estadísticos en cada variable, como ha sido aplicado en diferentes estudios (Malone et al., 2009; Samuel-Rosa et al., 2013; Sevilla et al., 2013).

## **2.7 CONCLUSIONES**

Los valores de retención de fosfatos más bajos que los parámetros en todos los suelos, los clasifican como Andosols de moderado desarrollo. La diferencia entre valores que reflejan a los minerales amorfos, clasifica a las propiedades ándicas de los suelos como pobremente desarrolladas o protoándicas; con excepción de los suelos de pastizal donde se registraron propiedades vítricas y silándicas. El análisis de regresión múltiple indicó que el grado y forma de la pendiente tienen un efecto significativo en las propiedades ándicas en horizontes subsuperficiales. Asimismo, se mostró que, en este caso, el desarrollo de las propiedades ándicas no resulta directamente de la posición altitudinal; sin embargo, el gradiente de elevación entre estos suelos no es tan diferencial.

## **CAPÍTULO 3. MORFOLOGÍA DE LOS SUELOS: ESCALA MICROSCÓPICA**

### **3.1 RESUMEN**

Este capítulo detalla la micromorfología de los suelos, a través de la descripción del tipo y desarrollo de la microestructura, los componentes orgánicos y la distribución de la actividad biológica y los pedorrasgos identificados en cada uno de los perfiles de suelos. Se reconocieron distintos componentes orgánicos de acuerdo al tipo de vegetación de cada suelo, la cual influyó sustancialmente en el tipo de microestructuras de los horizontes

superficiales. Por otra parte, en la mayoría de los suelos se reconocieron distribuciones quitónicas y revestimientos típicos, los cuales son característicos del proceso de intemperismo de material parental y la formación de Andosols. Finalmente, se distinguieron nódulos típicos asociados a concentraciones de hierro y manganeso en todos los suelos de bosque; con excepción de los suelos de pastizal donde se identificaron hiporrevestimientos de hierro característicos de procesos de gleyzación.

**Palabras clave:** microestructura, materia orgánica, actividad biológica, distribuciones quitónicas, rasgos redoximórficos.

### 3.2 ABSTRACT

This chapter details the micromorphology of soils, through the description of the type and development of the microstructure, the organic components and the distribution of biological activity and the pedofeatures identified in each of the soil profiles. Different organic components were recognized according to the type of vegetation of each soil which substantially influenced on the type of microstructures of the surface horizons. Otherwise, chitonic distributions and typical coatings were recognized in most soils, wich are characteristic of the weathering process of parental material and the formation of Andosols. At last, typical nodules associated with iron and manganese concentrations were distinguished in all forest soils; with exception of grassland soils where iron hypocoatings were identified characteristic of gleyization process.

**Key words:** microstructure, organic mater, biological activity, chitonic distributions, redoximorphic features.

### 3.3 INTRODUCCIÓN

#### **Fundamentos de la micromorfología de suelos**

Citando a Bullock et al. (1999): “la micromorfología de los suelos es una rama de las Ciencias del Suelo enfocada en la descripción, medición e interpretación de los componentes, rasgos y fábricas del suelo observados a nivel microscópico”. Se entiende como fábrica del suelo al arreglo (forma, tamaño y frecuencia) de los constituyentes del suelo y sus relaciones funcionales y configuracionales. Los componentes son definidos

como las unidades más básicas observables, siendo identificados como elementos individuales (minerales, fragmentos de roca y/o tejido) o en bloques (partículas arcillosas, materiales finos). Por último, los rasgos pedológicos o pedorrasgos se presentan como entidades discretas distintas en arreglo y concentración a los materiales adyacentes del suelo (Ídem).

La publicación del libro “Micropedología” de Walter Kubiena, en 1938 (Stoops, 2014, 2018) da pie al nacimiento de la micromorfología del suelo. El autor propuso estudiar a las secciones delgadas de los suelos de manera sistemática, enfoque el cual se ha mantenido y mejorado con el avance de la pedología (Brewer, 1964; Douglas, 1990; Douglas y Thompson, 1985; Fitzpatrick, 1984 y 1993; Stoops y Vepraskas, 2003).

### **Uso e interpretación de la micromorfología de suelos**

La micromorfología de los suelos más que una disciplina, puede emplearse como una herramienta valiosa que permite entender de forma más precisa como ocurren los procesos de formación de los suelos, sin que las muestras sean alteradas y las características que no pueden ser reconocidas a nivel de perfil. Asimismo, contribuye al conocimiento y los desafíos en la génesis, clasificación y manejo de los suelos (Stoops, 2018); así como en otras áreas como la geología, agronomía e incluso la arqueología y la paleontología.

## **3.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.4.1 Secciones delgadas**

De cada perfil, se extrajeron muestras inalteradas superficiales y una por cada horizonte hasta el desarrollo del suelo. Las secciones delgadas fueron elaboradas en el Taller de Micromorfología del Área de Génesis y Clasificación de Suelos, de acuerdo con el procedimiento de Murphy (1986). Se reconocieron y describieron las unidades de fábrica en cada muestra (ver ANEXO C), con base en el manual de Bullock (1999).

La interpretación de las unidades de fábrica, se generó con ayuda de los manuales de Stoops et al. (2014, 2018).

## **3.5 RESULTADOS**

### **3.5.1 Descripción micromorfológica de los suelos**

Las propiedades micromorfológicas de los suelos cambian tanto a lo largo de los perfiles, como a través del gradiente topográfico. A nivel de perfiles, estas diferencias se observan esencialmente, como variaciones graduales o abruptas de la microestructura entre horizontes. Entre perfiles de la catena, el material orgánico, la composición de la masa basal y los pedorrasgos, hacen distinguir tales cambios.

A nivel microscópico, el desarrollo de las estructuras pedales del suelo, solo se refleja en la parte superficial del primer horizonte. En la superficie, la estructura es completamente pedal de tipo migajosa fuertemente desarrollada, con algunos bloques subangulares gruesos débilmente desarrollados; ambos entre poros comunes de empaquetamiento compuesto. En el mismo horizonte, a mayor profundidad, los migajones ya no están presentes; solo permanecen los bloques subangulares y aparece una fracción apedal de tipo microagregados entre granos.

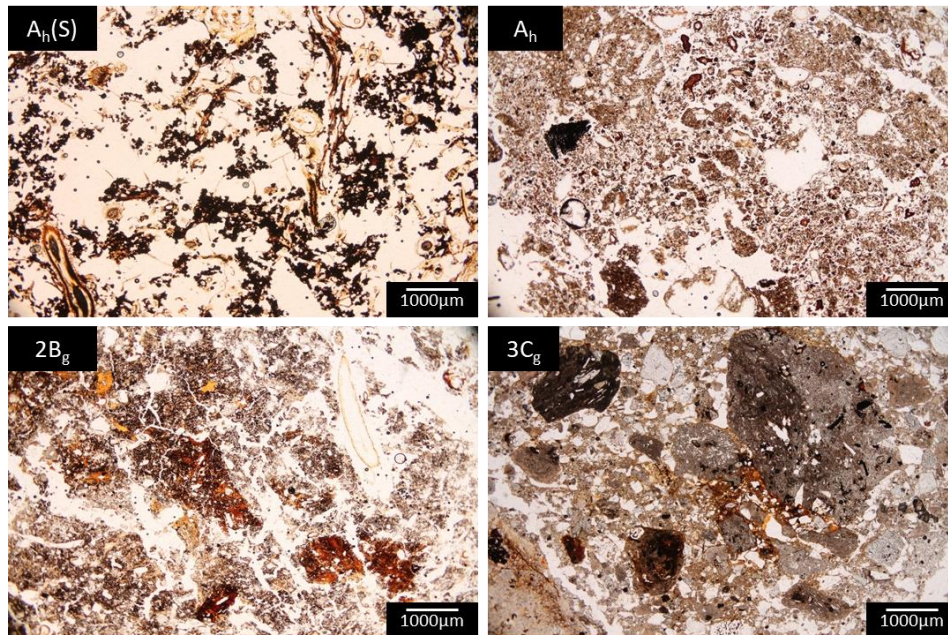
En el segundo horizonte, la estructura apedal cambia a canales entre granos, con muy pocos bloques subangulares. La porosidad disminuye (<15%) y se compone de poros de empaquetamiento complejo, canales y muy pocas fisuras. El último horizonte 3C<sub>g</sub> tiene una estructura completamente apedal de grano compacto, en una distribución relacionada porfídica cerrada, con muy pocas cavidades y canales.

A lo largo del perfil, se observan cambios muy notorios en diversos constituyentes del suelo entre los horizontes del suelo. La microestructura, no solo se modifica entre completamente pedal a apedal en el último horizonte; además el tipo y frecuencia de porosidad se diferencian, con una disminución abrupta en particular para el último horizonte. Asimismo, la relación de fracciones en la masa basal, va de casi completamente gruesa a predominantemente fina en el primer horizonte.

#### **Perfil 1**

El patrón de los constituyentes en el suelo, a nivel microscópico, es un reflejo claro de lo que se aprecia macroscópicamente en el perfil. Para muestra, son los pedorrasgos de hiporrevestimientos en los poros canales y dentro de la micromasa. Estos

hiporrevestimientos muestran una orientación en forma de bandas inclinadas; aunque dentro de la micromasa del suelo, se distribuyen aleatoriamente. El color y la forma de este tipo de revestimientos obedecen a fenómenos de oxidación del hierro en las caras de los poros, acompañados por rasgos de empobrecimiento del hierro dentro de la micromasa, que se distinguen por un color más claro que el del poro (Figura 24).



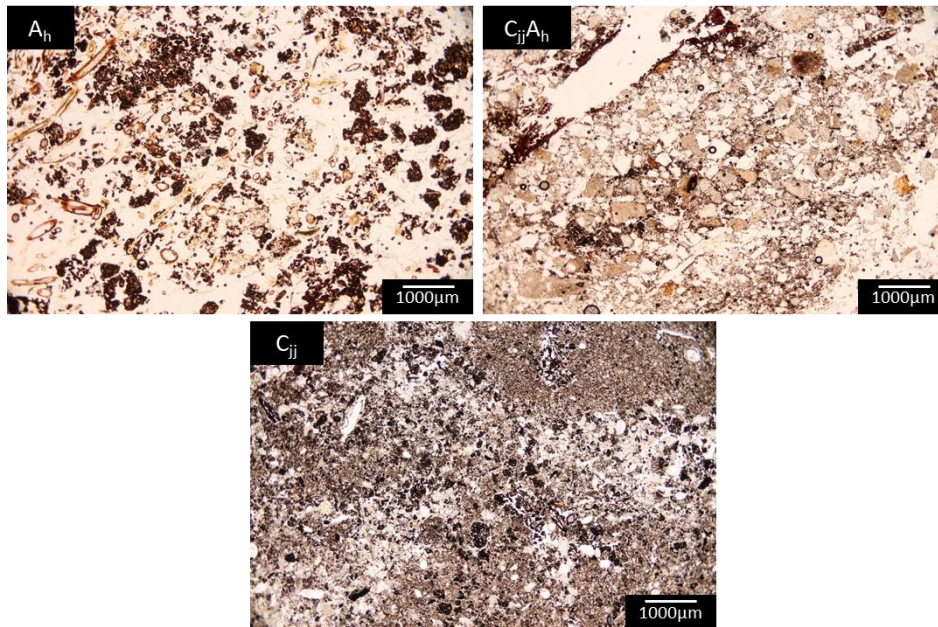
**Figura 24.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 1.PPL. Longitud del marco 5 mm.

## Perfil 2

Al igual que en el suelo del perfil 1, se desarrolla una estructura pedal migajosa en la parte superficial del primer horizonte, con bloques subangulares débilmente desarrollados en el resto del horizonte; ambos dispuestos entre poros de empaquetamiento compuesto de frecuencia dominante. En los horizontes subyacentes existe una estructura predominantemente apedal, típico de horizontes C, de grano compacto, con muy pocos bloques subangulares, entre poros de empaquetamiento complejo y algunos canales. La porosidad tiene una disminución abrupta entre el primer y segundo horizonte, de tal forma que la distribución relacionada cambia de enaúlica a porfídica cerrada. De igual manera, la proporción de la masa basal cambia abruptamente del primer al segundo horizonte, de dominante fina a predominantemente gruesa (Figura 25).



Al igual que en el perfil 1, se aprecian hiporrevestimientos, aunque con una orientación y color distintos. En el último horizonte, se forma un patrón bandeado horizontal entre los granos gruesos y estos pedorascos, con coloraciones negras y pardas rojizas. Tanto el color como la orientación de las bandas, están asociados con procesos de criogénesis, lo cual se evidenció en campo, con el agua congelada que saturaba al suelo.

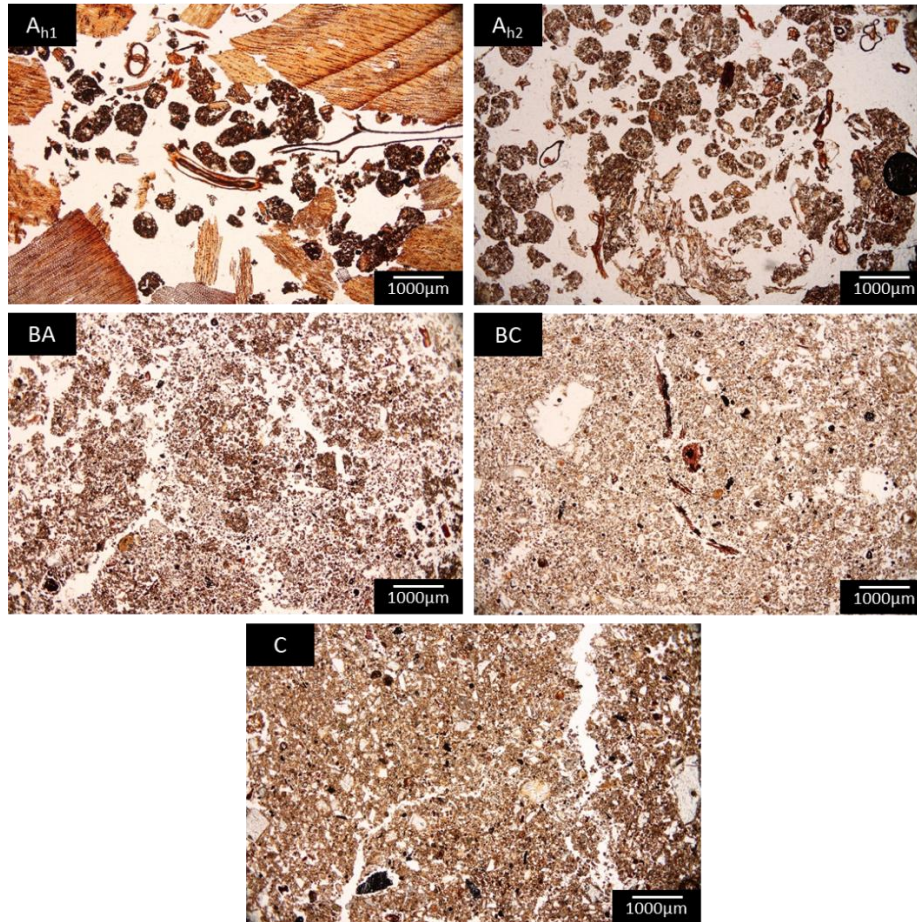


**Figura 25.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 2. PPL. Longitud del marco 5 mm.

### Perfil 3

La microestructura en este perfil tiene una transición gradual: los horizontes  $A_h$  poseen una estructura pedal de granular a bloques subangulares, medios y muy gruesos respectivamente; fuertemente desarrolladas en el horizonte superficial. Su porosidad consta de poros comunes de empaquetamiento compuesto. Los horizontes de transición muestran una estructura apedal de tipo cavidades, entre poros de empaquetamiento complejo, cavidades y muy pocos canales. Su porosidad disminuye de frecuente a baja de un horizonte a otro. En el último horizonte, sin embargo, se aprecia una estructura pedal de bloques subangulares muy gruesos de moderado desarrollo, con una porosidad frecuente de poros de empaquetamiento compuesto y canales (Figura 26).

La fracción de la masa basal es predominantemente fina, cuyos cambios son graduales con la profundidad: la fábrica birrefringente va de indiferenciada a moteada y el color de pardo oscuro a pardo a partir del horizonte BA.



**Figura 26.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 3. PPL. Longitud del marco 5 mm.

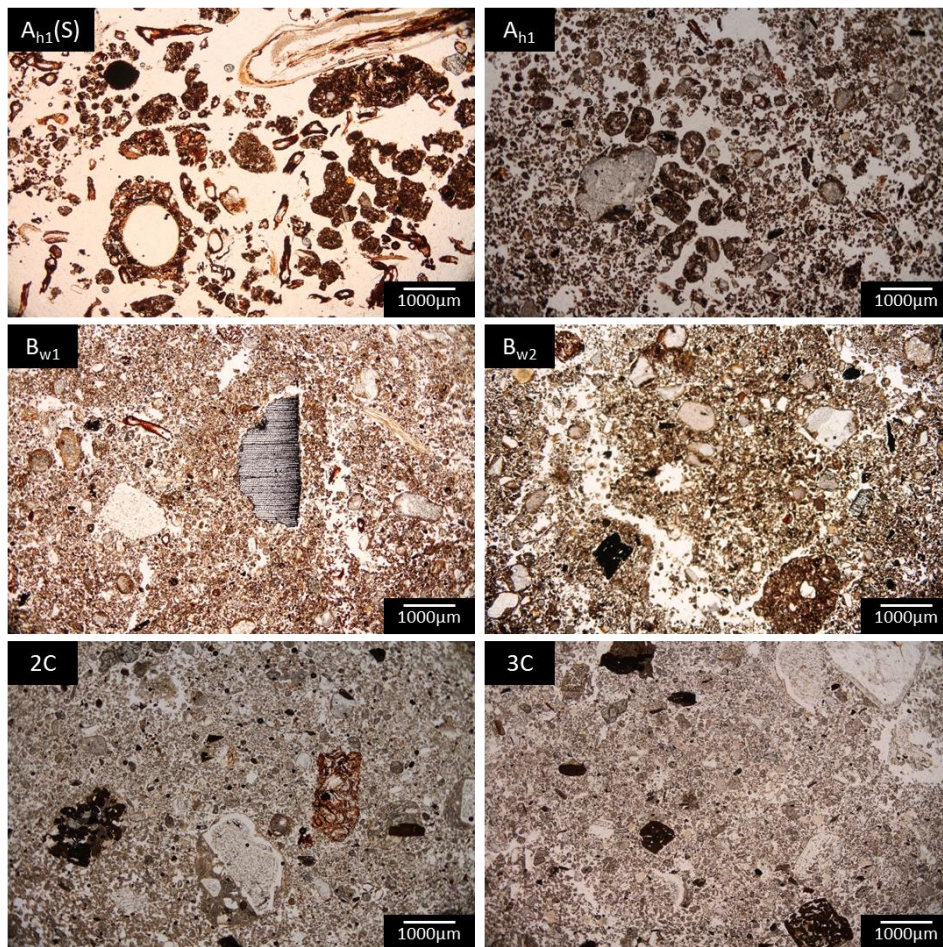
#### Perfil 4

El suelo exhibe una microestructura pedal únicamente en la parte superficial del primer horizonte: de tipo granular y bloques subangulares moderadamente desarrollados, entre poros de empaquetamiento compuesto de abundancia dominante. En el mismo horizonte, la microestructura se vuelve apedal con la profundidad y domina así en todo el perfil. Esta es de tipo cavidad, con poros de empaquetamiento complejo, cavidades, y en menor frecuencia, fisuras de tamaño medio. La porosidad disminuye drásticamente del segundo horizonte a los subyacentes. Únicamente en el horizonte B<sub>w2</sub>, ocurre una fracción de microestructura pedal, compuesta de bloques subangulares pobremente



desarrollados, entre poros de empaquetamiento compuesto y un aumento en la porosidad. Esto se explica por la mezcla del horizonte suprayacente, dada por la actividad de las raíces, la cual se identificó con el color y el límite del horizonte a nivel de perfil (Figura 27).

La estructura predominantemente apedal, el tipo y frecuencia de la porosidad y el tamaño y grado de alteración de los minerales primarios, indican que no existe un desarrollo pedal fuerte en este suelo.



**Figura 27.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 4. PPL. Longitud del marco 5 mm.

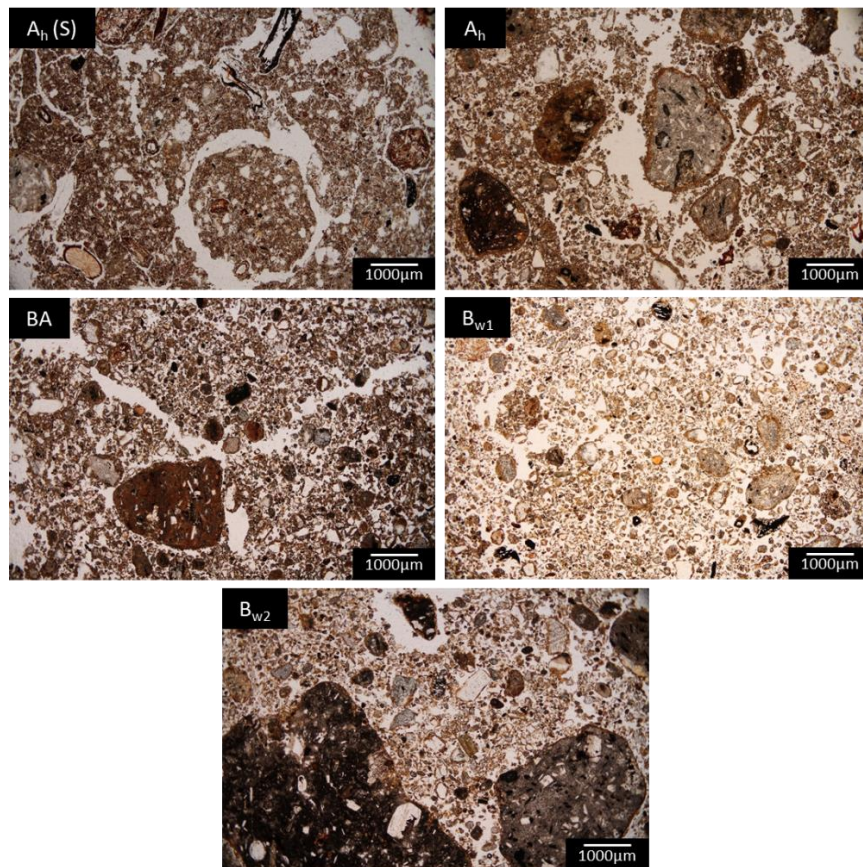
### Perfil 5

Tal como en el perfil 4, en el suelo se exhibe una estructura pedal solo en la parte superficial del primer horizonte; aunque solo compuesta de bloques subangulares

gruesos a muy gruesos, de moderado desarrollo, entre poros de empaquetamiento compuesto y algunos canales. La estructura de los horizontes subyacentes es apedal de tipo cavidades.

Con excepción del horizonte superficial domina una distribución relacionada quitónica, donde los granos de arena y los minerales, son revestidos por una micromasa fina. El color de los revestimientos es pardo oscuro en el horizonte BA y cambia a pardo amarillento en los horizontes subyacentes, como una disminución en el contenido de materia orgánica (Figura 28).

El tipo de microestructura y el tipo y relación de la masa basal manifiestan un cambio abrupto entre el primer horizonte y los subsecuentes, lo que indica que el suelo tiene poca profundidad de desarrollo.



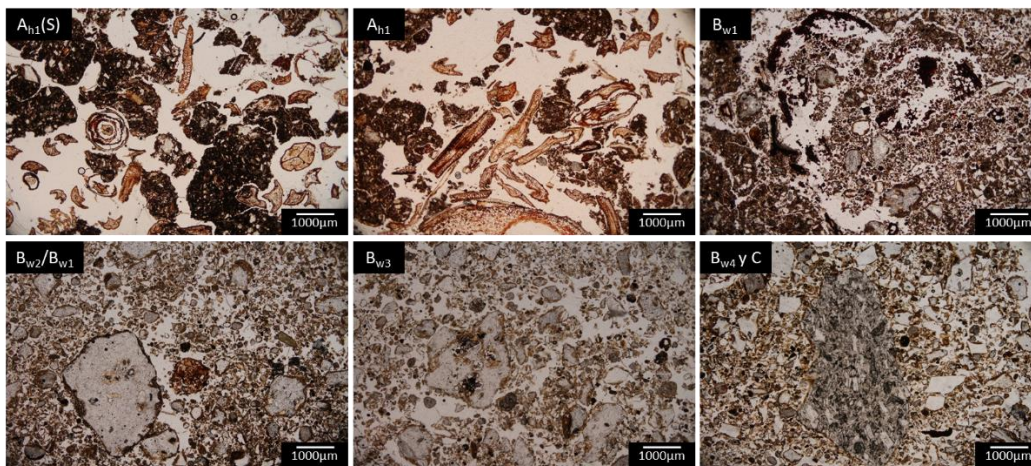
**Figura 28.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 5. PPL. Longitud del marco 5 mm.

## Perfil 6



En los horizontes  $A_h$  se ha desarrollado una estructura pedal de tipo granular media y bloques subangulares gruesos a muy gruesos, ambos de moderado desarrollo, dispuestos entre poros frecuentes de empaquetamiento compuesto y algunos canales y cavidades dentro de los agregados.

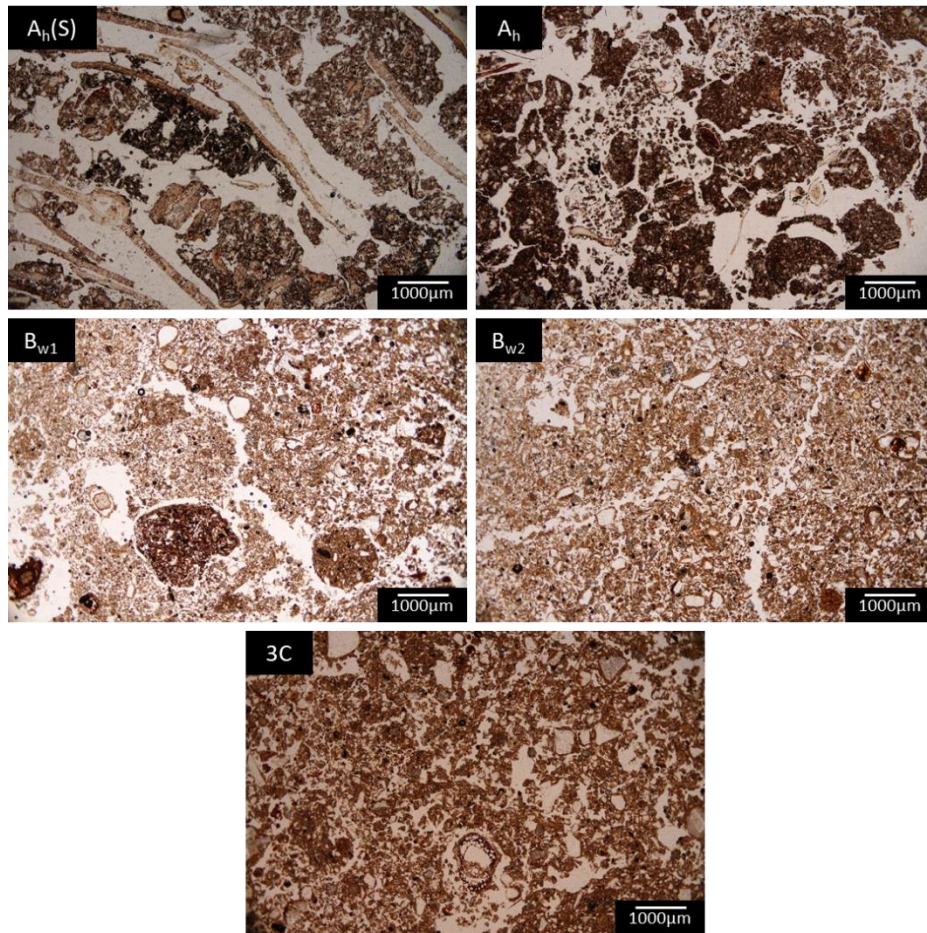
En el horizonte  $B_{w1}$ , aún se muestran bloques subangulares, pero con una baja frecuencia y débil desarrollo. A partir de este horizonte, la microestructura se vuelve apedal de tipo cavidades, y de grano pelicular en los horizontes más profundos. La distribución relacionada es mayoritariamente quitónica en los horizontes  $B_{w3}$  y C, donde las arenas son revestidas. Microscópicamente, la profundidad de desarrollo del suelo llega hasta el horizonte  $B_{w1}$  (Figura 29).



**Figura 29.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 6. PPL. Longitud del marco 5 mm.

### Perfil 7

El horizonte  $A_h$  se compone de una estructura pedal de bloques subangulares gruesos y muy gruesos, de moderado a fuerte desarrollo; entre poros frecuentes de empaquetamiento compuesto, y algunos poros cámara y canales. En el horizonte  $B_{w1}$ , los bloques subangulares son poco frecuentes, ya que domina una microestructura apedal de tipo cavidades; la cual continúa en el resto del perfil (Figura 30). La fracción gruesa de la masa basal aumenta desde el horizonte  $B_{w1}$  y la fracción fina cambia de indiferenciada a moteada. La profundidad de desarrollo del suelo se acota al horizonte  $A_h$ .



**Figura 30.** Detalle de la micromorfología por horizonte en el perfil 7. PPL.  
Longitud del marco 5 mm.

Entre los resultados más acentuados del análisis micromorfológico es que el tipo de vegetación dominante define la microestructura pedal de los horizontes superficiales; es decir, en los pastizales se forman agregados migajosos, los bosques de oyamel tienen agregados granulares predominantemente y el bosque de encino bloques subangulares. El tamaño y grado de desarrollo de estas estructuras pedales biológicas, es distinto para cada suelo. Para muestra, en los suelos de los perfiles 3 y 4 que están bajo el mismo tipo de vegetación de bosque de oyamel, los agregados granulares tienen distinto grado de desarrollo: en el perfil 3 son finos a medios de fuerte desarrollo, mientras que en el perfil 4 son medios y moderadamente desarrollados. Existe un mayor desarrollo de estructuras pedales en los suelos de los perfiles 3 y 6 y un desarrollo más incipiente en los perfiles 5 y 7.

**Cuadro 6.** Resumen de los componentes de las secciones delgadas en los perfiles de suelos.

P	H	Microestructura										Componentes orgánicos				Masa basal			Pedorrasgo				
		Tipo		Porosidad						Fracción gruesa		Fracción fina		Fracción gruesa	Fábrica -b	g/f 50 µm	DR	T	A	E			
		Apedal	Pedal	Sp	Cd p	Cx p	Vu	Ve	Ch n	Ch m	P n	GD	GP								GD	GP	
1	A <sub>h</sub> (S)	-	C r Fr	Sb Vf	-	C	-	-	-	-	-	-	Of	G	Wo	M	Qu,Pl, Bi	Un	2:9 8	Po	H c	-	-
	A <sub>h</sub>	Igm Fw		Sb D	-	Fr	-	-	-	Fw	-	-	Of	M	Wo	M	Qu,Pl, Ag,Bi	Ss	15: 85	Po	-	NT y	El
	2B <sub>g</sub>	Igc D		Sb Fw	-	-	Fw	-	-	Fw	-	Vf	Tf	M	-	-	Qu,Pl, Am	Un	30: 70	Po	H c	-	-
	3C <sub>g</sub>	Mg Vd		-	Fw	-	-	Vf	-	Vf	-	-	Tf	P	-	-	Qu,Pl, Bi,Ag	Un	97: 3	Po	H c	-	-
2	A <sub>h</sub>	-	Cr Fr	Sb Fw	-	D	-	-	-	-	-	-	Of	G	Wo	G	Qu,Px,	Un	0:1 00	En	-	N	-
	C <sub>ij</sub> A <sub>h</sub>	Mg D		Sb Vf	-	-	Vf	-	-	Fw	-	-	Of	M	Of	P	Qu,Pl,Bi	Un	90: 10	Po	H c	-	-
	C <sub>ij</sub>	Mg Vd		Sb Fw	-	-	Vf	-	-	Fw	-	-	Of	M	Wo	M	Qu,Pl, Bi,Px,	Un	25: 75	Po	H c	-	-
3	A <sub>h1</sub>	-	Gr Fr		-	C	-	-	-	-	-	-	Of	M	Wo	M	ND	Un	2:9 8	Po	-	-	El
	A <sub>h2</sub>	-	G r Fr	Sb Fw	-	C	-	-	-	-	-	-	Of	M	Wo	M	ND	Un	5:9 5	Po	-	-	El
	BA	Vu Vd		-	-	-	Fw	Fw		Fw	-	-	Of	P	Wo	P	Pl,Qu, Bi,Ag	Ss	10: 90	En	-	NT y	S p
	BC	Vu Vd		-	-	-	Fw	Fw	Vf		-	-	Tf	P	Wo	P	Qu,Px,Ag	Ss	10: 90	En	-	NT y	El
	C	-	Sb D		Fw				Vf	-	-	Of	M	Wo	P	Qu,Pl, Ol,Ag	Ss	20: 80	Po	-	NT y NC o	S p	

**Cuadro 7.** Resumen de los componentes de las secciones delgadas en los perfiles de suelos (continuación).

P	H	Microestructura										Componentes orgánicos				Masa basal			Pedorrasgo				
		Tipo		Porosidad								Fracción gruesa		Fracción fina		Fracción gruesa	Fábrica -b	g/f <sub>50</sub> µm	DR	T	A	E	
		Apedal	Pedal	Sp	Cd <sub>p</sub>	Cx <sub>p</sub>	Vu	Ve	Ch <sub>n</sub>	Ch <sub>m</sub>	P <sub>n</sub>	GD	GP	GD	GP								
4	A <sub>h1</sub> (S)	-	G r Fr	Sb Fw	-	D	-	-	-	-	-	-	Wo	G	Wo	G	Qu, Px	Un	4:9 6	Po	-	-	S p El
	A <sub>h1</sub>	Vu D	Gr Vf	-	C	-	Fw	-	-	-	-	Of	M	Wo	P	Pl, Qu, Bi, Ag	Un	18: 82	Ch	C	N	S p S p El	
	B <sub>w1</sub>	Vu Vd	-	-	-	-	Fw	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu	Un	20: 80	Po	C	-	S p El	
	B <sub>w2</sub>	Vu Vd	-	-	-	Vf	Fw	-	-	-	-	Tf	P	Of	P	Qu, Px, Pl	Ss	26: 74	Po	C	-	S p S p	
	3C	Vu D	-	-	-	-	Fw	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu, Pl, Bi,	Un	30: 70	Po	C	-	S p	
	4C	Vu Vd	-	-	-	-	Fw	-	-	-	-	Tf	P y Co	Of	P	Qu, Pl, Am, Ag	Un	30: 70	Po	C	-	-	
5	A <sub>h</sub> (S)	-	Sb D	Fr	-	-	-	-	-	Vf	-	Of	M	Wo	G	Qu, Pl, Ol	Un	15: 85	Po	-	NT y	El	
	A <sub>h</sub>	Vu D	-	-	-	-	C	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu, Pl, Ol	Ss	25: 75	Ch	C	-	S p El	
	BA	Vu Vd	-	-	-	-	Fw	-	-	-	-	Tf	M	-	-	Qu, Ol	Ss	60: 40	Ch	C	-	-	
	B <sub>w1</sub>	Vu Vd	-	-	-	-	Fw	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu, Px, Kf	Ss	70: 30	Ch, En	C	NT y	-	
B <sub>w2</sub>	Vu D	-	-	-	-	C	Fw	-	-	-	Tf	P y Co	-	-	Qu, Px, Ag	Ss	78: 22	Ch, En	C	-	-		



**Cuadro 8.** Resumen de los componentes de las secciones delgadas en los perfiles de suelos (continuación).

P	H	Microestructura										Componentes orgánicos				Masa basal			Pedorrasgo			
		Tipo		Porosidad								Fracción gruesa		Fracción fina		Fracción gruesa	Fábrica -b	g/f <sub>50</sub> µm	DR	T	A	E
		Apedal	Pedal	Sp	Cd p	Cx p	Vu	Ve	Ch n	Ch m	P n	GD	GP	GD	GP							
	A <sub>h1</sub>	-	G r Vf	Sb C	-	C	-	-	-	-	-	Wo	G	Wo	G	Qu,Pl,Px	Un	4:9 6	Po	-	N	El
	A <sub>h2</sub>	-	G r Vf	Sb D	-	Fr	-	Vf	-	-	-	Wo	M	Wo	G	Qu,Pl, Px,Ag	Un	7:9 3	Po	-	N NT y	B cy
6	B <sub>w1</sub>	Vu D	Sb Fw	-	-	Fw	Vf		Vf		Vf	Of	M	Wo	M	Qu,Pl, Px,Ag	Ss	13: 87	Ch	C	NC o	-
	B <sub>w2</sub> / B <sub>w1</sub>	Vu D	-	-	-	Vf	Vf	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu,Pl, Px,Ag,Bi	Ss	40: 60	Ch	C	NC o	-
	B <sub>w2</sub> / B <sub>w1</sub> (C)	Vu D	Sb Fw	-	-	Fw	Vf	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu,Pl, Px,Ag,Bi	Ss	36: 64	Po	C	N	-
	B <sub>w3</sub>	Pg Vd	-	-	-	Fr	Fw	-	-	-	-	Tf	P	-	-	Qu,Pl, Ag,Bi	Un	46: 54	Ch	C	NT y	El
	B <sub>w4</sub> y 2C	Pg Vd	-	-	-	Fr	Fw	-	-	-	-	-	-	-	-	Qu,Pl, Px,Ag,Bi	Ss	70: 30	Ch	C	NC o	-
	A <sub>h</sub> ( S)	-	Sb C	-	Fr	-	Fw	-	-	-	-	Of	G	Wo	M	ND	Un	2:9 8	Po	-	N	S p
	A <sub>h</sub>	-	Sb D	-	Fr	-	-	-	Vf	Fw	-	Of	M	Wo	G	Qu,Pl,Px,	Ss	6:9 4	Po	-	N	S p
7	B <sub>w1</sub>	Vu Vd	Sb Fw	-	-	Fw	-	-	-	Vf	Vf	Tf	M	-	-	Qu,Pl, Px,Ag	Ss	12: 88	Po	C	H c	-
	B <sub>w2</sub>	Vu Vd	-	-	-	Fw	-	-	Vf		Vf	Tf	M	Wo	M	Qu,Pl, Px,Ag	Ss	20: 80	Po	C	-	-
	2C	Vu Vd	-	-	-	-	C	-	-	-	-	Tf	P	Wo	M	Qu,Pl,Bi	Ss	55: 45	Po	C	NT y	-

**Abreviaturas.** P: Perfil; H: Horizonte; **En Horizonte:** (S): Superficial; (C): Crotovina. **En estructura apedal:** Vu: Cavidad; Pg: Grano pelicular; Mg: Grano compacto; Igm: Microagregados entre granos; Igc: Canales entre granos. **En estructura pedal:** Cr: Migajosa; Gr: Granular; Sb: Blocosa subangular. **En Porosidad:** Sp: Empaquetamiento simple; Cdp: Empaquetamiento compuesto; Cxp: Empaquetamiento complejo; Vu: Cavidad; Ve: Vesícula; Chn: Canales; Chm: Cámaras; Pn: Fisuras. **Frecuencia en tipo de estructura y porosidad:** Vd: Muy dominante (>70%); D: Dominante (50-70%); C: Común (30-50%); Fr: Frecuente (15-30%); Fw: Escasa (5-15%); Vf: Muy escasa (<5%). **En componentes orgánicos:** GD: Grado de desmenuzamiento; Wo: Órganos completos; Of: Fragmentos de órganos; Cf: Fragmentos celulares; Tf: Fragmentos de tejidos; Células individuales. GP: Grado de preservación; G: Bueno; M: Moderado; P: Pobre; Co: Sólo contornos. **En masa basal:** Fracción gruesa: Qu: Cuarzo; Pl: Plagioclasa; Kf: Feldespato-K; Bi: Biotita; Am: Anfíbol; Ol: Olivino; Ag: Vidrio volcánico; ND: No distinguibles. **En Fábrica-b:** Un: Indiferenciada; Ss: Moteada. g/f: Relación grueso: fino. DR: Distribución relacionada g/f. Ch: Quitónica; Po: Porfídica; En: Enáulica. **En pedorrasgos:** T: Textural; C: Revestimientos; Hc: Hiporrevestimientos. A: Amorfo; N: Nódulos; Ty: Típico; Co: Concéntrico. E: Excremento; Sp: esférico; El: Elipsoidal; Bcy: Basocilíndrico. Los códigos fueron tomados del apartado Codificación de datos del Manual para la descripción de secciones delgadas de suelos (Bullock et al., 1999).

### 3.5.2 Materia orgánica

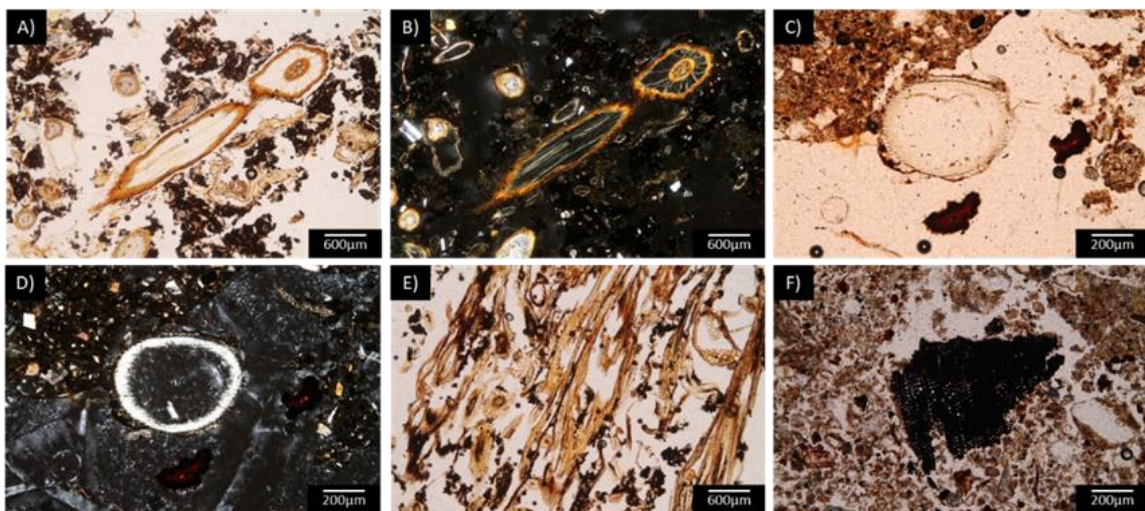
La materia orgánica del suelo en las secciones delgadas se describe mediante los componentes básicos orgánicos que incluyen a las fracciones gruesas y finas, amorfas y humificadas; así como con la actividad de los organismos (macro, meso y micro) a través de los pedorrasgos identificados de fábrica y/o excretas.

Como cada perfil de suelo se ha desarrollado bajo condiciones distintas de vegetación y humedad, la materia orgánica a nivel microscópico es diferente en tipo y frecuencia en cada uno de ellos.

#### Perfil 1

La materia orgánica está delimitada al horizonte superficial del suelo. De todos los componentes, dominan los materiales de fracción gruesa, los cuales son frecuentes solo en este horizonte. Dicha fracción se compone de raíces y tallos de pasto, bien preservados y en su mayoría completos. Estos materiales influyen sobre la estructura migajosa del suelo en la parte superficial y en la porosidad de empaquetamiento compuesto.

La materia orgánica humificada se percibe solo en los agregados migajosos y en algunas porciones de la fracción gruesa. La macro y mesofauna en este sitio es inexistente y solo se refleja la participación de las bacterias con la decoloración de las raíces y tallos (Figura 31).



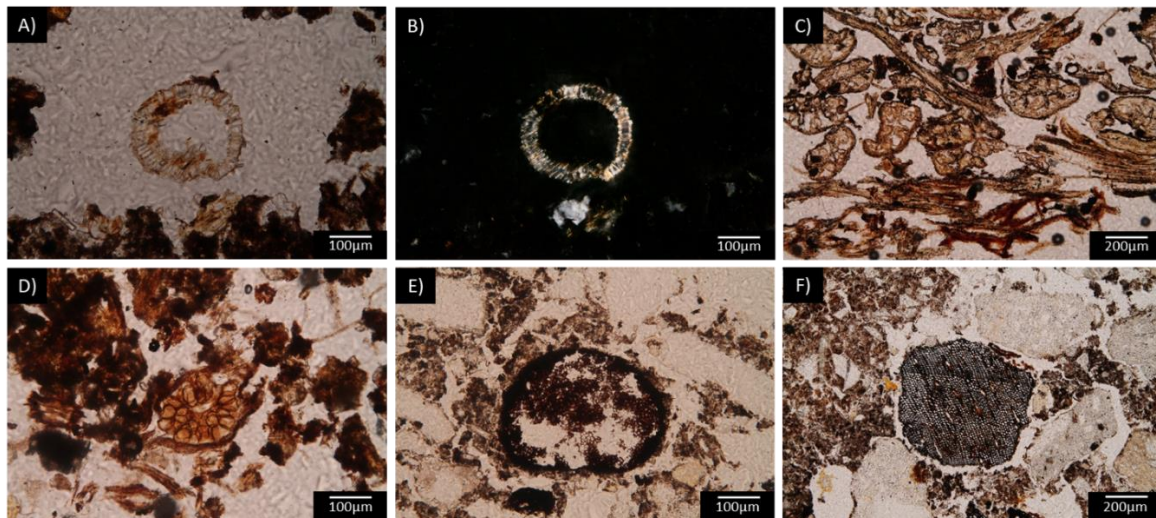
**Figura 31.** Componentes orgánicos del Perfil 1 en horizonte  $A_h$ . A) Corte longitudinal de raíz en PPL y B) en XPL; C) Corte transversal de tallo en PPL y D) XPL; E) Raíces de pasto con agregados migajosos (PPL); F) Fragmento de hoja carbonizada (PPL).

Longitud del marco 3 mm (A,B,E) y 1 mm (C,D,F).

## Perfil 2

Debido a la cercanía con el perfil 1, la expresión de la materia orgánica en este perfil es muy similar. Domina la fracción gruesa del material orgánico, completa y bien preservada, por las condiciones de saturación y temperatura; su abundancia es frecuente solo en el primer horizonte (Figura 32). Ésta fracción es responsable de la estructura migajosa, de la porosidad de empaquetamiento compuesto y los canales presentes en las estructuras apedales de los horizontes subyacentes. La materia orgánica humificada impregna algunos agregados migajosos y fragmentos de tallos, pero no es dominante en el suelo.

De igual manera, la actividad biológica consta solo en la descomposición de estructuras vegetales por los microorganismos debido a que, las condiciones de humedad y temperatura, restringen la existencia de macro y mesofauna en este sitio.



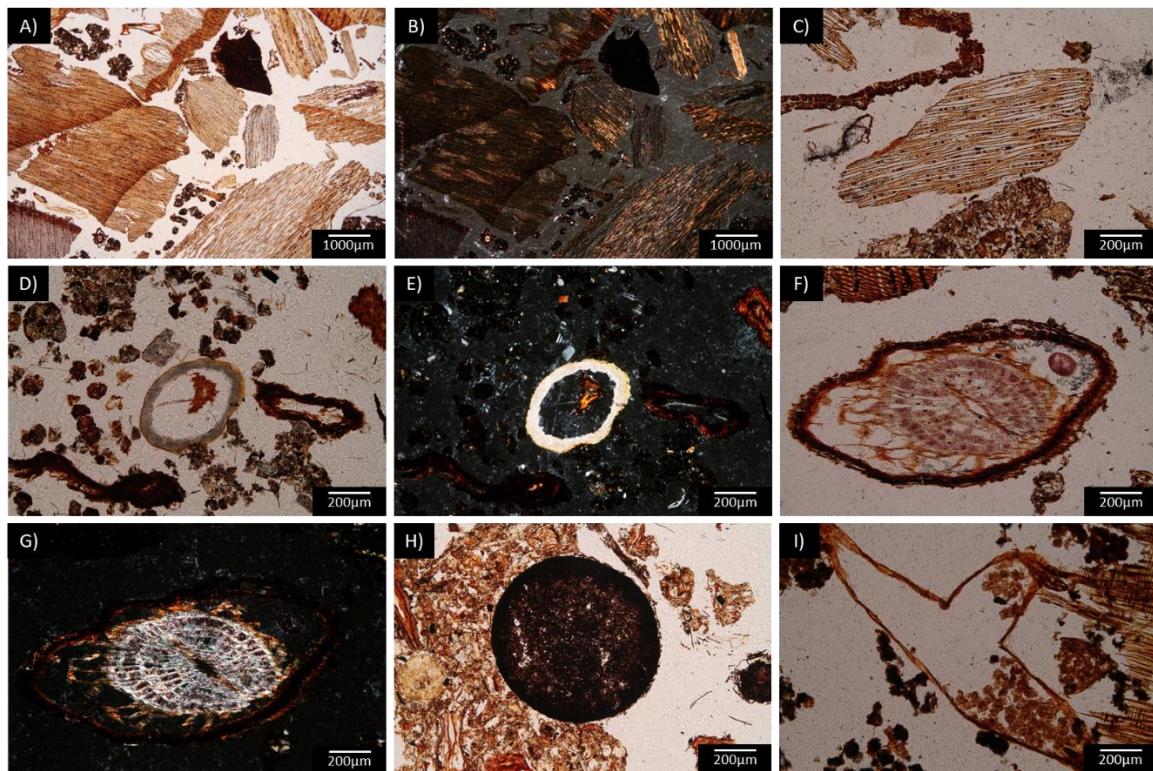
**Figura 32.** Componentes orgánicos del Perfil 2. Horizonte  $A_h$ : A) Sección transversal de tallo en PPL y B) en XPL; C) Raíces de pasto y anteras entre migajones (PPL); D) Granos de polen (PPL). Horizonte  $C_{jj}A_h$ : E) Esclerocio de hongo poco preservado (PPL) y F) Fragmento de hoja carbonizada (PPL). Longitud del marco 0.5 mm (A,B,D,E) y 1 mm (C y F).

## Perfil 3

En este suelo, la presencia y función de todos los componentes de la materia orgánica es muy evidente. El material orgánico es diverso y bien preservado, está compuesto tanto de una fracción gruesa de plantas vasculares, como una fracción fina de diferentes tipos de esporas. La materia orgánica humificada también es frecuente, impregna parcial o totalmente a los agregados, principalmente a los granulares.



Entre los organismos presentes, la mesofauna tiene un rol importante en este suelo. Se identifica una abundancia de ácaros, a través de sus excretas dentro de hojas y raíces y formando microagregados en todo el perfil (Figura 33). Los hongos micorrízicos identificados a nivel de perfil, contribuyen en la formación de agregados granulares y en su cohesión y grado de desarrollo; así como en la descomposición del material orgánico.



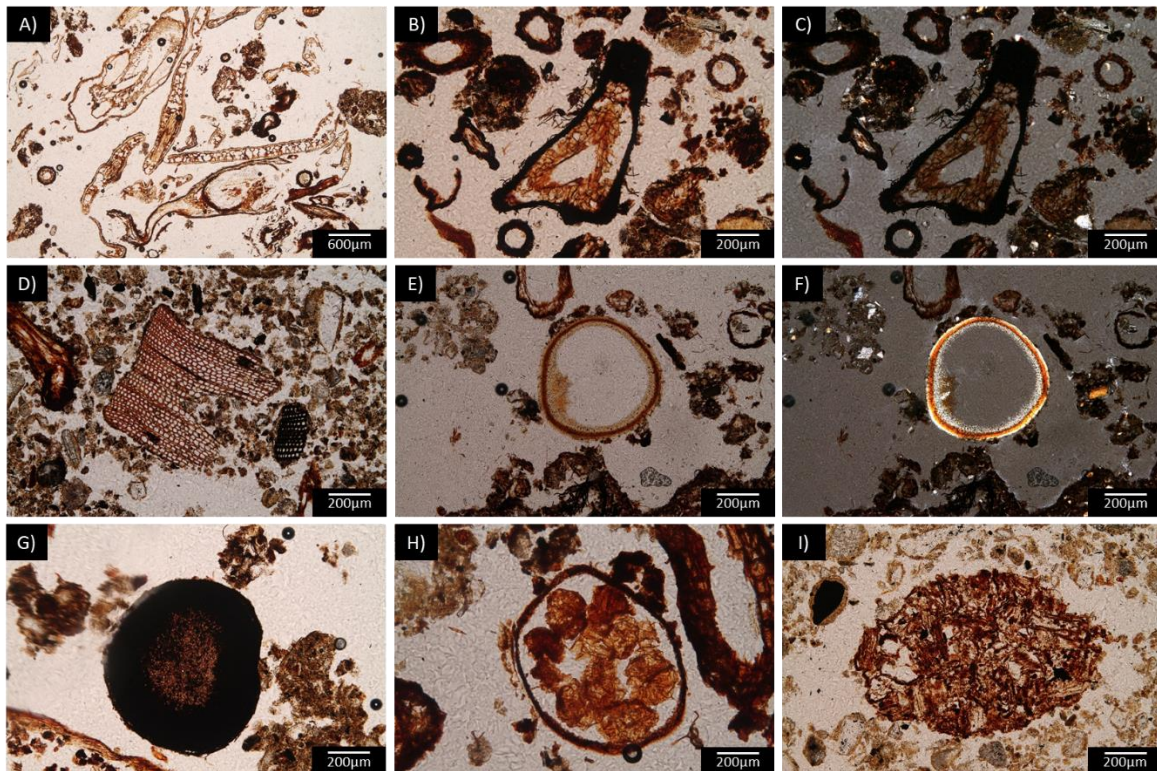
**Figura 33.** Componentes orgánicos del Perfil 3 en horizonte  $A_{h1}$ . A) Fragmentos de hoja y corteza en PPL y B) XPL; C) Fragmento de madera con sus estructuras internas (PPL); D) Espora completa en PPL y E) XPL; F) Corte transversal de hoja de pino (PPL), G) con parénquima muy birrefringente (XPL); H) Esclerocio de hongo (PPL) e I) Excretas de ácaros (PPL). Longitud del marco 1 mm (C,D,E,F,G,H,I) y 5 mm (A y B).

#### Perfil 4

El componente de la materia orgánica de mayor participación en el suelo es la actividad biológica. La mesofauna se distribuye casi completamente a lo largo del perfil, con una abundancia de ácaros y larvas de dípteros, identificados a través de sus excretas (Figura 34). Los ácaros no solo se encuentran degradando el material orgánico, además forman parte de los poros cámara. En cuanto a los microorganismos, las bacterias se manifiestan en el horizonte superficial, decolorando y degradando al material orgánico.

El material orgánico tiene una frecuencia común únicamente en el horizonte superficial; se compone de fracción gruesa moderadamente preservada, de agujas

de pino y fragmentos de tallos y raíces, y una fracción fina de escasas esporas y muy pocas semillas. Se observan fragmentos carbonizados de hojas; aunque al ser poco frecuentes y distribuirse aleatoriamente indican que se incorporaron por sedimentación desde otras zonas del incendio. La materia orgánica humificada es el componente que menos se expresa en el suelo, es poco frecuente e impregna parcialmente a algunos agregados.



**Figura 34.** Componentes orgánicos del Perfil 4. Horizonte  $A_{h1}$ : A) Agujas de pino del material fibrico (PPL); B) Fragmentos de raíces y tallos (PPL), C) moderadamente preservados y poco birrefringentes (XPL); D) Fragmento de hoja y hoja carbonizada (PPL); E) Espora en PPL y F) XPL; G) Esclerocio de hongo (PPL); H) Excretas de ácaros (PPL). Horizonte  $B_{w2}$ : I) Excretas de larva *Bibionidae* (PPL). Longitud del marco 1 mm (B,C,D,E,F,G,H,I) y 3 mm (A).

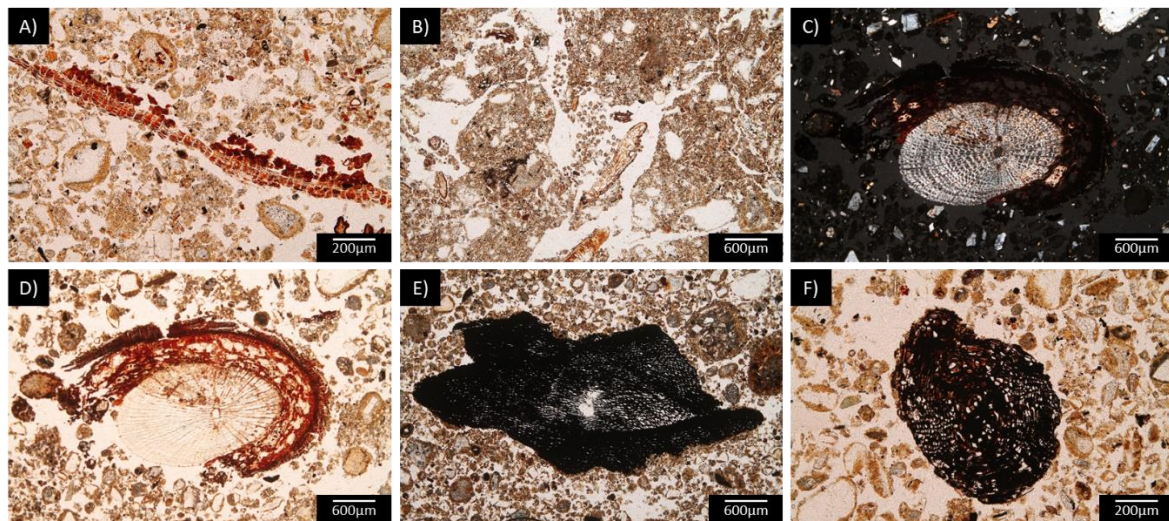
### Perfil 5

Al igual que en el perfil 4, el papel importante de la materia orgánica lo tiene la actividad de los organismos, particularmente las lombrices. Estas contribuyen a la microestructura, formando los poros cámara y redondeando a los bloques subangulares. Sin embargo, esta participación se limita al horizonte superficial.

El material orgánico se compone esencialmente de fracción gruesa de fragmentos de raíces moderadamente preservados. La fracción fina es mínima y se compone únicamente de esclerocios de hongos muy opacos, presentes en los horizontes



superficiales. La materia orgánica humificada es la menos perceptible en el suelo (Figura 35).



**Figura 35.** Componentes orgánicos del Perfil 5. Horizonte A<sub>n</sub>: A) Fragmento de tejido epidérmico de raíz (PPL); B) Excretas de lombriz en poros cámara (PPL). Horizonte BA: C) Fragmento de raíz en XPL y D) PPL; E) Hoja carbonizada (PPL). Horizonte B<sub>w1</sub>: Fragmento de corteza pobremente conservada (PPL). Longitud del marco 1 mm (A,D) y 3 mm (B,C,E,F).

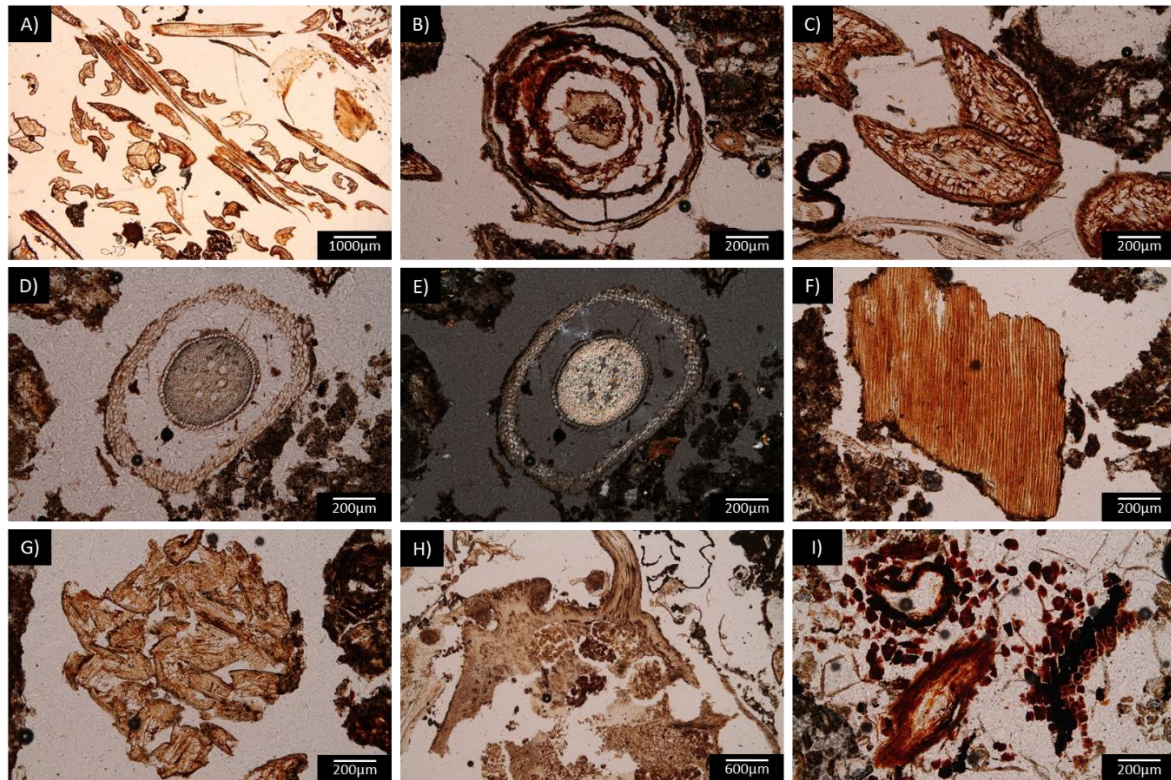
## Perfil 6

En este suelo la presencia y función de todos los componentes de la materia orgánica es evidente y sustancial. El material orgánico es principalmente fracción gruesa muy heterogénea, siendo en su mayoría agujas de pino que componen al material fibrico del horizonte superficial. La fracción fina es menos frecuente y se compone de esporas, semillas y granos de polen. La materia orgánica humificada es tal, que se identifica humus de tipo moder, en el horizonte superficial, impregnando totalmente a los agregados de la parte superficial de la sección delgada (Figura 36).

Los organismos están presentes a nivel de meso y macrofauna. Las lombrices son comunes solo en los horizontes superficiales y contribuyen en la formación de agregados granulares y poros canales. Existe una abundancia de ácaros, enquitréidos y larvas de dípteros en casi todo el perfil, identificados por medio de sus excretas.

Tanto la actividad biológica, como la capa gruesa de agujas de pino, proporcionan a los agregados del horizonte superficial, una consistencia friable y esponjosa.



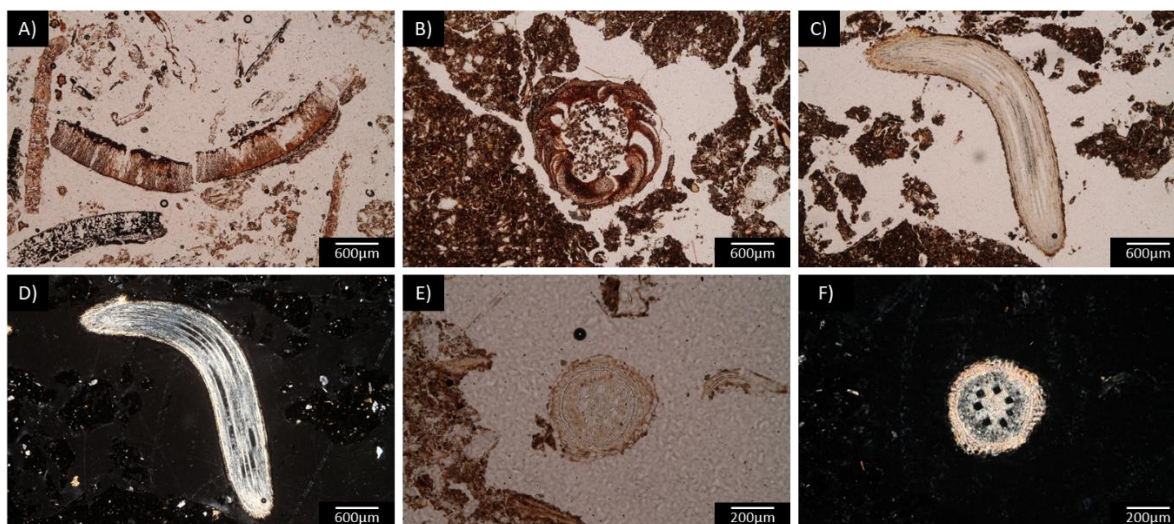


**Figura 36.** Componentes orgánicos del Perfil 6. Horizonte  $A_{h1}$ : A) Acículas y agujas de pino como material fibroso (PPL); B) Agujas de pino en tejidos concéntricos (PPL); C) Acículas de pino unidas (PPL); D) Corte transversal de raíz (PPL), E) moderadamente birrefringente (XPL); F) Fragmento de corteza (PPL); G) Agujas de pino conglomeradas en excretas (PPL); H) Material orgánico con rasgos de excretas y humificación (PPL). Horizonte  $B_{w1}$ : I) Fragmentos de tejido parcialmente humificado. Longitud del marco 1 mm (B,C,D,E,F,G,H), 3 mm (I) y 5 mm (A).

## Perfil 7

El componente más relevante de la materia orgánica es la fracción gruesa del material orgánico. Se conforma esencialmente de fragmentos de raíces y hojas de coníferas. En este perfil, los fragmentos carbonizados son más numerosos, además existen evidencias de carbonización en algunos agregados, siendo posible un incendio en el sitio o en una zona adyacente.

La materia orgánica está poco humificada y se presenta más como una descomposición parcial de las fracciones gruesas. La abundancia de mesofauna es baja y su actividad se limita a excretas de ácaros en el horizonte superficial (Figura 37).



**Figura 37.** Componentes orgánicos del Perfil 7 en horizonte  $A_h$ : A) Fragmentos de hojas de coníferas (PPL); B) Excretas de ácaros dentro del material vegetal (PPL); C) Organismo preservado de enquitréido (PPL), D) muy birrefringente (XPL); E) Sección transversal de raíz (PPL), F) bien preservada y muy birrefringente (XPL). Longitud del marco 6 mm (A,B,C,D) y 1 mm (E,F).

### 3.5.3 Pedorrasgos

En el análisis micromorfológico de estos suelos se identificaron tres grupos principales de pedorrasgos: texturales, amorfos y de excrementos (Figura 38). Los pedorrasgos de excrementos permiten examinar la diversidad y abundancia de organismos en el suelo; por ello fueron incluidos como parte de la materia orgánica en la sección 3.5.2. Los pedorrasgos que permitieron analizar cómo es el grado y profundidad de desarrollo de los suelos, fueron los texturales. En los suelos de los perfiles 3 a 7 se reconocieron pedorrasgos texturales de tipo revestimientos típicos. Estos revestimientos se localizan principalmente en los horizontes genéticos C, B y en menor abundancia en los horizontes de transición BA. Los revestimientos cubren completamente los granos de arena, completa o parcialmente a los minerales y en menor proporción a los fragmentos de roca formando una distribución relacionada quitónica y en algunos casos el material fino es tal, que forma relaciones porfídicas con los granos de arena. Los revestimientos en los minerales primarios revelan como estos se están intemperizando para formar a los minerales secundarios.

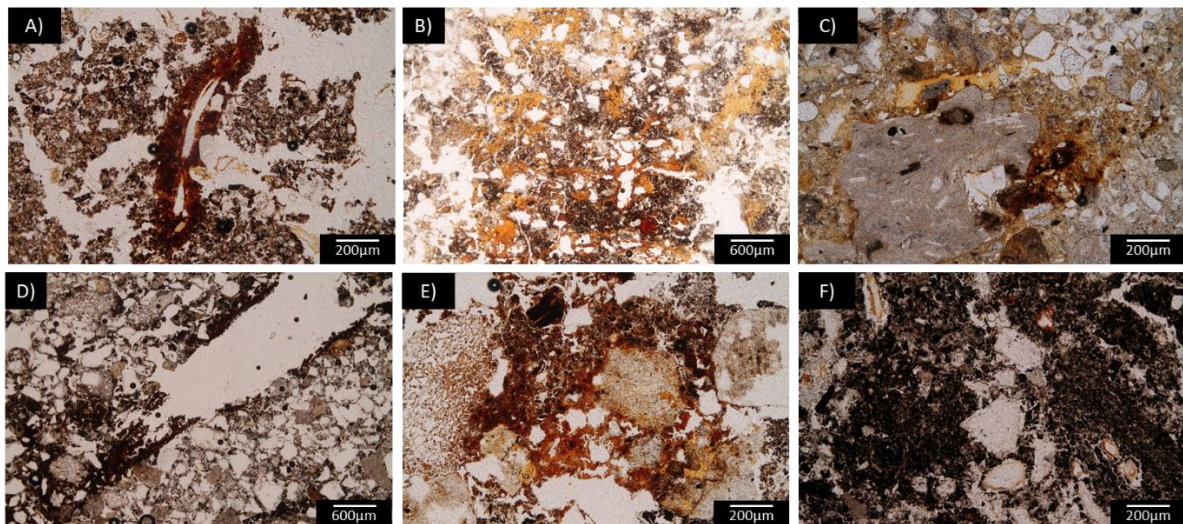
Los pedorrasgos texturales de los perfiles 1 y 2 son muy distintos a los anteriores, se presentan como hiporrevestimientos en los poros generados por las raíces, en los horizontes superficiales e inmersos en la micromasa en los horizontes subyacentes. Aunque los perfiles se ubican en una misma vegetación y posición topográfica; en el perfil 1 el color y la forma de los hiporrevestimientos obedecen a fenómenos de



oxidación de hierro en los poros y en el perfil 2 se presentan además hiporrevestimientos asociados con procesos de congelación del agua en el suelo.

Respecto a los pedorrasgos amorfos, consisten principalmente de nódulos típicos concéntricos de colores rojos pardos, impregnados en la micromasa. La forma, color y contraste de los nódulos, se relaciona a concentraciones de hierro en el suelo, sin rasgos de reducción. Únicamente fueron observados en los perfiles 3,6 y 7, en los horizontes genéticos B y C. Se observa una frecuencia mayor de nódulos en el perfil 6, particularmente en los horizontes B<sub>w</sub>.

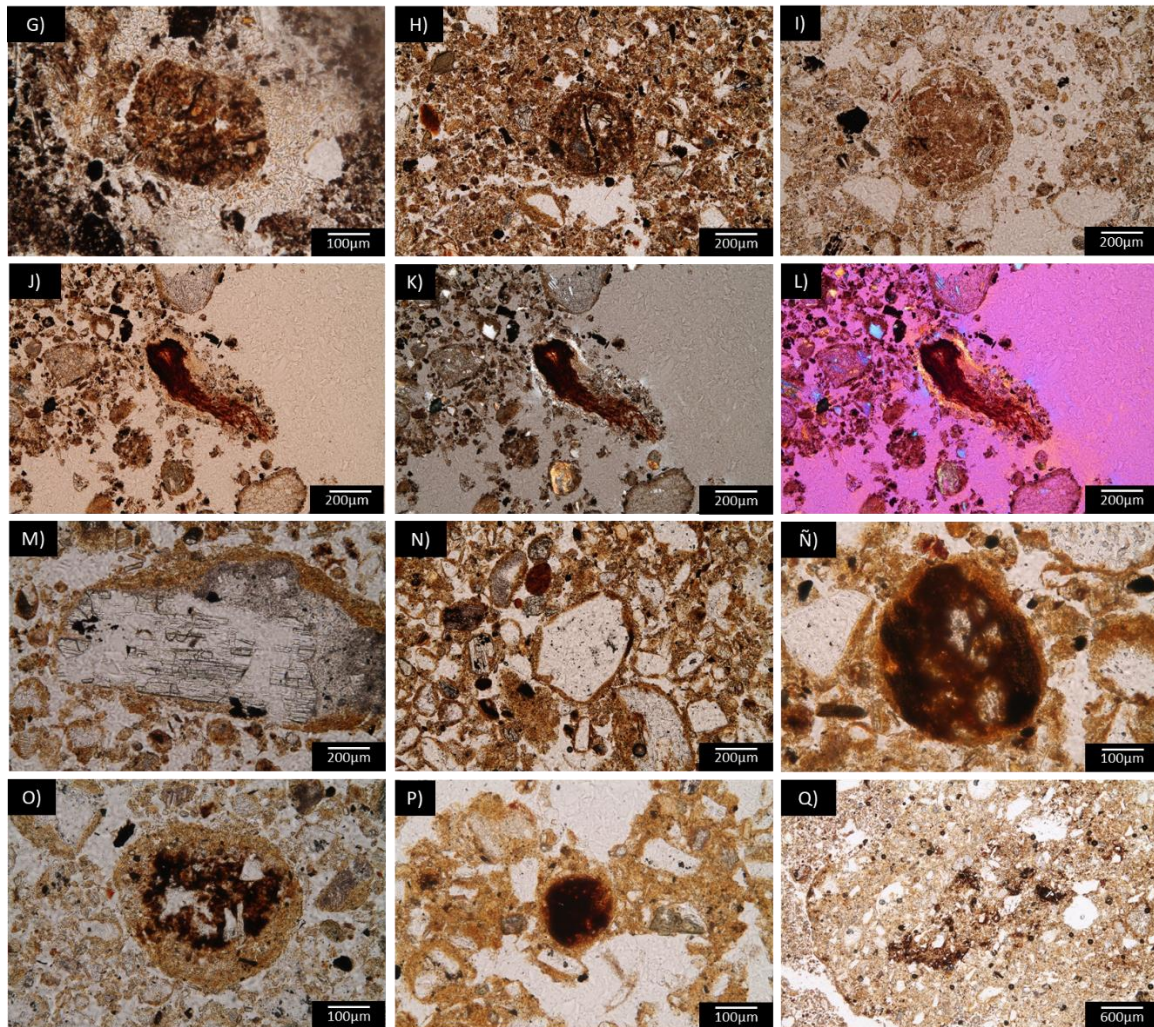
Se identifican, además, nódulos pseudomórficos dentro de los agregados, negros y pardos oscuros, con un contraste desvanecido y límite difuso. Es posible que estos rasgos se asocien con las formas del manganeso en el suelo, lo cual indica un hidromorfismo débil.



**Figura 38.** Pedorrasgos identificados en los perfiles. Perfil 1: A) Hiporrevestimiento de Fe en poro canal en horizonte A<sub>n</sub>; Hiporrevestimientos de Fe con zonas de empobrecimiento en B) horizonte 2B<sub>g</sub> y C) 3C<sub>g</sub>. Perfil 2: D) Hiporrevestimientos en un canal y E) Hiporrevestimiento de Fe en horizonte C<sub>jj</sub>A<sub>h</sub>; F) Hiporrevestimiento de Mn en horizonte C<sub>jj</sub>.

La fábrica birrefringente (fábrica-b) de la masa basal también ofrece información sobre el desarrollo del suelo en los perfiles. A diferencia de los perfiles 1 y 2, donde la fábrica-b es completamente indiferenciada, en el resto de los perfiles se reconoce un cambio en la fábrica-b de moteada a indiferenciada hacia los horizontes superficiales.





**Figura 37 (continuación).** Pedorrasgos identificados en los perfiles. Perfil 2: G) Nódulo de Fe en horizonte  $C_{ij}$ . Perfil 3: H) Nódulo típico e I) Nódulo concéntrico en horizonte C. Perfil 4 en horizonte  $B_{w2}$ : J) Revestimiento sobre material vegetal, K) y L) el revestimiento es ligeramente birrefringente. Perfil 5 en horizonte  $B_{w1}$ : M) Revestimientos en minerales y arenas. Perfil 6 en horizonte  $B_{w2}/B_{w1}$ : N) Revestimientos sobre fracciones gruesas; Ñ) Nódulo concéntrico; O) Revestimiento con rasgos de empobrecimiento. Perfil 7: P) Nódulo pseudomórfico en horizonte 3C y Q) Hiporrevestimiento en horizonte  $B_{w1}$ . Todos en PPL, excepto K) en XPL y L) en XPL- $\lambda$ . Longitud del marco 3 mm (B,D,Q), 1 mm (A,C,E,F,H,I,J,K,L,M,N) y 0.5 mm (G,Ñ,O,P).

### 3.6 DISCUSIÓN

#### 3.6.1 Morfología del suelo y materia orgánica

La descripción micromorfológica de los suelos proporcionó un entendimiento de cómo es el desarrollo del suelo a lo largo de cada perfil y con ello, poder generar comparaciones e identificar diferencias entre los componentes de los suelos.

En principio, la microestructura pedal es distinta entre tipo, grado de desarrollo y profundidad en cada perfil. El tipo de vegetación dominante incide evidentemente en el tipo de estructuras pedales; mientras que, para el grado de desarrollo, profundidad,

y porosidad, también contribuye la actividad biológica. El desarrollo de estructuras biológicas es completo solo en los horizontes identificados como A de todos los suelos; en los horizontes B se muestran también estructuras apedales y en ciertos casos, un nulo desarrollo de estructuras pedales, como en los perfiles 4 y 5 (Cuadro 6). Las estructuras pedales indican que el desarrollo edáfico es más profundo en los suelos de los perfiles 3 y 6 y más incipiente en los perfiles 5 y 7. Diversos autores atribuyen la formación de agregados a las excretas de los mesoorganismos, mientras que la adhesión y estabilidad son gracias a los microorganismos. Jiménez-Martínez (2018) estudió el papel de las comunidades fúngicas en la adhesión de microagregados en Andosols vítricos de Calpulalpan, siendo la especie *F. mosseae* la de mayor impacto en la agregación. Suástegui-Méndez (2011) generó una microcartografía de las secciones delgadas, observando que la mayor población de hongos se distribuye en la superficie de agregados, entre los poros de empaquetamiento compuesto.

Dawod y Fitzpatrick (1993) examinan la importancia de los enquistados sobre la microestructura y porosidad, a partir de sus excretas en forma de pellets. Estos anélidos constituyeron una alta proporción de biomasa de la fauna. Sin embargo, su abundancia se condicionó por el pH, al observar una mayor población a un pH de 4.5; en contraste con un pH más alto, donde la presencia de lombrices dominó y disminuyó la población de enquistados por competición. Kim y Singh (2000) apuntan que mientras algunos organismos pueden tolerar un amplio rango de temperatura, humedad y pH, otros tienen una tolerancia limitada, por ejemplo, los basidomicetos son más resistentes que las bacterias. Davidson y Grieve (2006) plantean que las alteraciones en la diversidad de fauna del suelo, pueden tener efectos además sobre su agregación. Por otra parte, las raíces también determinan un papel fundamental en la agregación y porosidad del suelo (De León-González et al., 2007).

En cuanto al componente orgánico se distingue una composición de la materia orgánica diferente para cada suelo, de tal manera que algunas fracciones son más dominantes y se expresan más que otras sobre las propiedades del suelo. En los suelos de los perfiles 3 y 6, las formas de la materia orgánica son más variadas y su función sobre las propiedades morfológicas del suelo es apreciable. Con el grado de preservación y desmenuzamiento del material orgánico, principalmente de los horizontes superficiales, se infiere la tasa de la actividad biológica. Los suelos con

materiales menos preservados son los de los perfiles 4 y 5. Por otra parte, en el suelo de los perfiles 3 y 4 el proceso de humificación es mayor, identificado por la decoloración y deformación de los restos orgánicos y el color de los agregados. El aporte continuo de materia orgánica influye en su grado de preservación, como es el caso de las acículas de pino del perfil 6. Respecto a los suelos del pastizal, las condiciones de humedad y saturación de agua, permiten una mayor preservación de la fracción gruesa.

Martínez Rojas (2015) comparó la diversidad de comunidades bacterianas en el suelo, bajo diferentes tipos de vegetación en el monte Tláloc: bosque de encino, de oyamel, de pino y pradera alpina. Se destaca una mayor diversidad de comunidades bacterianas en el bosque de encino, seguido de oyamel, pino y por último pradera alpina. En el mismo estudio, se señala que la mineralización en el bosque de oyamel es menor a una mayor altitud influyendo en ello, una mayor densidad arbórea, altos niveles de humedad y menor temperatura. Bronick y Lal (2005) explican que las temperaturas más bajas y los suelos húmedos propician un mayor almacenamiento de carbono orgánico. Por su parte, Dubroeuq et al. (2002) indican que también influye la interacción entre la materia orgánica y los componentes minerales para generar compuestos órgano-minerales amorfos más resistentes a la descomposición y considerados como reserva de carbono. En síntesis, las condiciones de temperatura y humedad en el suelo, afectan la actividad microbiana y biológica y con ello, las tasas de descomposición y humificación.

Aunque no es parte de los objetivos de este estudio, la información que ofrecen las secciones delgadas, pueden rebasar más allá de la descripción y comparación de la composición de la materia orgánica. Dicha información puede proyectarse para estudios de composición y clasificación de tipos de humus (Zaeits y Poch, 2016), hasta relaciones ecológicas entre la biota y el suelo (Kooistra, 1991).

### **3.6.2 Desarrollo de los suelos**

Los suelos de los perfiles 3 a 7 comparten un orden de distribuciones relacionadas de quitónica a enaúlica, de mayor a menor profundidad respectivamente. La distribución quitónica se da esencialmente en los horizontes C y en algunos horizontes B en forma de revestimientos típicos sobre los granos de arena y de los minerales primarios. Como existe una mayor abundancia de minerales primarios, respecto a la fracción fina de los revestimientos, se infiere que el proceso de intemperismo en los suelos de

esta zona, tiene un desarrollo incipiente. Stoops et al. (2018), explican que este orden de distribuciones relacionadas, es característico de la formación de los Andosols a partir del intemperismo de las fracciones gruesas: las tefras, como parte del material parental, tienen una distribución mólica básica de granos gruesos y cambian a una distribución quitónica, de minerales secundarios y partículas finas como parte de esos revestimientos. Cuando el material más fino domina forma agregados, evolucionando finalmente a una distribución enaúlica, hasta el punto de generar una microestructura granular en los horizontes superficiales.

Con excepción de los perfiles 1 y 2, se observaron fábricas-b indiferenciadas en los horizontes A y fábricas-b moteadas en los horizontes B y C en la mayoría de los perfiles. Las fábricas birrefringentes moteadas a indiferenciadas en el perfil del suelo, son características de la formación de Andosols (Ídem).

Stoops (2007) en su revisión sobre suelos derivados de cenizas volcánicas en Europa, además de describir estos patrones de distribución relacionada, explica que, en los suelos desarrollados donde se han formado propiedades ándicas, la fábrica birrefringente es siempre indiferenciada, como expresión de la dominancia del alófano. Vingiani et al. (2014) también refieren que en el desarrollo fuerte de las propiedades ándicas, la matriz del suelo es claramente isotrópica; mientras que un Andosol con propiedades vítricas, la matriz es ligeramente anisotrópica.

### **3.6.3 Micromorfología de procesos del suelo**

Se hallaron nódulos típicos de poca frecuencia, en los horizontes B y C de algunos perfiles, cuyo color y forma se asocian con el hierro. Stoops (2007) argumenta que los nódulos de oxi-hidróxidos de Fe están relacionados a las condiciones de drenaje del suelo; aunque en suelos fuertemente intemperizados se han identificado nódulos de gibbsita. Malucelli et al. (1999), descubrieron en su estudio que en los Andosols más antiguos existe una mayor dinámica de Fe activo vista en forma de concreciones.

Los suelos de los perfiles 1 y 2 no muestran este orden de distribuciones relacionadas. Las condiciones de saturación y menor drenaje han generado dos procesos distintos en un mismo sitio. En el perfil 1 se revelan pedorrasgos de oxidación en los poros y reducción dentro de la masa basal. En el perfil 2, además, la congelación temporal ha tenido un impacto tal que ha ocasionado un arreglo de los granos en forma de bandas y sin gradación.



La micromorfología de los suelos afectados por congelación ha sido ampliamente documentada, principalmente para los suelos permanentemente congelados. La formación de estas bandas se debe a la retracción del hielo por desecación o “criosucción”. El movimiento de los cristales de hielo propicia la migración de los granos de arena gruesa, y una gradación invertida entre estos y las capas de limo con arena fina (Van Vliet-Lanoë y Fox, 2018). Mermut y Arnaud (1981) explican que las capas de material fino se dan por movimiento descendente de la solución del suelo y el espesor de estas bandas, por tanto, varía de acuerdo al tamaño de ped individual. Van Vliet-Lanoë (1985) apunta que la pendiente determina el tipo de fábricas producidas por el efecto del hielo en el suelo, de forma que a mayor pendiente ocurren procesos geliflujión, lo cual puede ocurrir tanto en suelos con permafrost como con los temporalmente congelados. La presencia del hielo en el perfil 2 no ha tenido el impacto suficiente para generar microestructuras lenticulares o planas, al menos no a la profundidad alcanzada.

Fedorova y Yarilova (1972) analizaron suelos con procesos de gleyzación similares al suelo del perfil 1. Ellos detallan que el congelamiento temporal de los suelos, favorece a las condiciones de superhumedad y desarrollo de hidromorfismo en los suelos, con subsecuentes zonas de gleyzación en el perfil, distintas con la profundidad. Un suelo que es friable, cuando está congelado es cementado por el hielo y, por ende, cambia a muy denso. Vepraskas et al. (1993) exponen que el volumen de nódulos o revestimientos del Fe, depende de que tan rápido penetra el aire a los horizontes reducidos. Estos rasgos asociados con los procesos redox, generalmente consisten de minerales de Fe como goethita, lepidocrocita y ferrihidrita.

### **3.7 CONCLUSIONES**

Las características en la micromorfología de los suelos, no exhiben rasgos drásticos como suelos enterrados o cambios en el tipo de mineralogía y ordenes de suelo entre perfiles, pese a que no todos los suelos comparten el mismo material parental, como se refirió en el capítulo 2. Las diferencias se manifestaron a nivel de tipo y desarrollo de microestructuras, agregación y tipos de materia orgánica, cambios en las distribuciones relacionadas a lo largo de los perfiles, así como en los pedorrasgos que expresaron la influencia de las condiciones de humedad y drenaje en cada uno de los suelos.

## CONCLUSIONES GENERALES

La asociación entre escalas de observación permitió identificar cómo los factores y procesos de formación, influyen en las propiedades de los Andosols en la catena. Con base en el primer objetivo, se demuestra que los tipos de vegetación en la catena no influyen sobre el grado de desarrollo de las propiedades ándicas de los Andosols.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos no fueron muy contrastantes; sin embargo, sus propiedades ándicas mostraron diferencias, sobre todo en la retención de fosfatos y los minerales amorfos, específicamente los amorfos del Al, con una correlación directa significativa entre estos. Refutando la hipótesis planteada, una mayor elevación no responde a un desarrollo más alto de las propiedades ándicas en este caso; sin embargo, los análisis de regresión lineal múltiple revelaron que la elevación ejerce un efecto significativo sobre la profundidad de desarrollo de los suelos. Paralelamente estos modelos demostraron que el relieve, particularmente el grado y forma de la pendiente, si tuvo un efecto significativo más alto sobre las propiedades ándicas retención de fosfatos y minerales amorfos, principalmente en los horizontes subsuperficiales.

A nivel de micromorfología, la vegetación manifestó un papel fundamental sobre la microestructura y las formas de la materia orgánica, en los horizontes superficiales. No obstante, la densidad de vegetación y humedad en los suelos no reflejaron directamente microestructuras pedales y porosidad más desarrolladas; en cambio, estas características son favorecidas por la presencia de litter y formación de mantillo en algunos suelos. Exceptuando los suelos del pastizal, en los suelos se examinó un patrón de distribuciones relacionadas de las fábricas, de forma ascendente: porfídica-quitónica-enáulica de estructuras de bloques subangulares a granulares, típico del intemperismo y formación de Andosols.

En relación a la clasificación, los suelos de la catena son considerados Andosols de moderado desarrollo, ya que las propiedades ándicas no están completamente manifestadas en todos los suelos, esencialmente por la retención de fosfatos menor al criterio de clasificación. De acuerdo con la Taxonomía de Suelos, todos los suelos poseen propiedades ándicas pobremente desarrolladas; en tanto que, en el sistema de la WRB, la mayoría de los suelos tiene propiedades proto-ándicas. Contradiendo la hipótesis planteada, los distintos tipos de vegetación tuvieron influencia únicamente en la formación de epipedones. En este estudio, las propiedades ándicas en estos Andosols no presentan una gradación respecto a la elevación en la catena, así como

tampoco los procesos de inundación y congelamiento en los sitios más elevados imposibilitaron la formación de estas propiedades.

En síntesis, el conjunto de información en todas las escalas, expresa que las condiciones de saturación y los procesos redoximórficos, son los más ponderantes en los suelos de pastizal; la vegetación es determinante en las formas y contenido de la materia orgánica en los horizontes superficiales de todos los suelos, y el relieve como factor ambiental es el más significativo en el desarrollo de las propiedades ándicas a nivel sub-superficial en esta secuencia.

## LITERATURA CITADA

- Alcalá de Jesús M., Hidalgo-Moreno C., Gutiérrez-Castorena M. del C. (2009). Mineralogía y retención de fosfato en Andisoles. *Terra Latinoamericana* 27 (4): 275-286.
- Arnalds, O. (2004). Volcanic soils of Iceland. *Catena* 56: 3-20. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.catena.2003.10.002>
- Asio V.B. (21 de enero de 2012). *The origin of the catena concept*. Soil and environment. Soil and its relation to environment, agriculture, global warming, and human health. Recuperado el 03 de junio del 2021 de <http://soil-environment.blogspot.com/2012/01/origin-of-catena-concept.html>
- Astudillo-Sánchez C., Villanueva-Díaz J., Endara-Agramont A., Nava-Bernal G. y Gómez-Albores M. (2017). Influencia climática en el reclutamiento de *Pinus hartwegii* Lindl. del ecotono bosque-pastizal alpino en Monte Tláloc, México. *Agrociencia* 51: 105-118.
- Barrales-Brito E., Paz-Pellat F., Etchevers-Barra J.D., Hidalgo-Moreno C., Velázquez-Rodríguez A. (2020). Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 38: 275-288. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.680>
- Basile-Doelsch I., Amundson R., Stone W.E.E., Masiello C.A., Bottero J.Y., Colin F., Masin F., Borschneck D., Meunier J.D. (2005). Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. *European Journal of Soil Science* 56: 689-703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x>
- Bigham J.M., Fitzpatrick R.W. & Schulze D.G. (2002). Iron oxides. In: Dixon J.B., Schulze D.G. (eds.). *Soil mineralogy with environmental applications*, Vol. 7. (pp. 323-366). SSSA Book Series. <https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c10>
- Blake. G.R. (1965). Bulk Density. En: Black C.A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*. (pp. 374-390). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c30>
- Becker J., Dippold M., Hemp A. & Huzyakov Y. (2019). Ashes to ashes: Characterization of organic matter in Andosols along a 3400m elevation transect at Mount Kilimanjaro using analytical pyrolysis. *Catena* 180: 271-281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.033>
- Bockheim J., Munroe J., Douglass D. & Koerner D. (2000). Soil development along an elevational gradient in the southeastern Uinta Mountains, Utah, USA. *Catena*. 39: 169–185. <https://doi.org/10.1016/S0341-8162%2899%2900091-0>
- Borden R. W., Baillie I. C., Hallett S. H. (2020). The East African contribution to the formalisation of the soil catena concept. *Catena* 185: 104291. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104291>
- Brewer R. (1964). *Fabric and mineral analysis of soils*. Wiley. London.

- Broquen P., Lobartini J.C., Candan F. & Falbo G. (2005). Allophane, aluminium and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina. *Geoderma* 129: 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.041>
- Broquen P., Suárez A., Girardin J. L., Percz J. C. (2013). Procesos pedogenéticos en una secuencia de suelos desarrollados en cenizas volcánicas en el noroeste de Neuquén, Argentina. *Cienc Suelo* (Argentina) 31(2): 213-222.
- Bronick C.J. and Lal R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bullock P., Stoops A., Jongerius A., Fedoroff N., Tursina T. (1999). *Manual para la descripción micromorfológica de suelos.* (Gutiérrez-Castorena M. C. y Ortiz Solorio C. A. Trans.). Waine Research. (Obra original publicada en 1985).
- Buytaert W., Deckers J. & Wyseure G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology* 73: 207-221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Cadoux A., Missenard Y., Martínez-Serrano R. & Guillou H. (2011). Trenchward Plio-Quaternary volcanism migration in the Trans-Mexican Volcanic Belt: the case of the Sierra Nevada range. *Geol. Mag.* 148 (3): 492-506. <https://doi.org/10.1017/S0016756810000993>
- Campos-Cascaredo A., Oleschko K., Cruz-Huerta L., Etchevers J.D., Hidalgo-Moreno C. (2001). Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra Latinoamericana* 19 (2): 105-116.
- Carter, B.J., Ciolkosz, E.J., (1991). Slope gradient and aspect effects on soils developed from sandstones in Pennsylvania. *Geoderma* 49: 199–213.
- Chadwick O., Gavenda R., Kelly E., Ziegler K., Olson C., Elliott C. & Hendricks D. (2003). The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chemical geology* 202: 195-223. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.09.001>
- Chen Z., Asio V. & Yi D. (1999). Characteristics and Genesis of Volcanic Soils Along A Toposequence Under A Subtropical Climate in Taiwan. *Soil Science* 164 (7): 510-525. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199907000-00007>
- Chen Z., Hsieh C., Jiang F., Hsieh T. & Sun I. (1997). Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan. *Plant Ecology* 132: 229-241.
- Chevallier T., Woigneur T., Toucet J., Blanchart E. (2010). Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols. *Geoderma* 159: 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.010>
- Childs C.W. (1985). *Towards understanding soil mineralogy.* II. Notes of ferrihydrite. N.Z. Soil Bureau Laboratory Report CM7, DSIR, New Zeland.

- Childs C.W. (1992). Ferrihydrite: A review of structure, properties and occurrence in relation to soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 155 (5):441–448. <https://doi.org/10.1002/jpln.19921550515>
- Childs C. W., Palmer R. W. P. & Ross C. W. (1990). Thick iron oxide pans in soils of Taranaki, New Zealand. *Aust. J. Soil Res.* 28(2): 245-257. <https://doi.org/10.1071/SR9900245>
- Churchman G.J. & Tate K.R. (1987). Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *Journal of Soil Science* 38: 19-27. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1987.tb02119.x>
- Clapp C., Harrison R. & Hayes M. (1991). Interaction between organic macromolecules and soil inorganic colloids and soils. In: Bolt G., De Boedt M., Hayes M., McBride M. & De Strooper E. (eds.). *Interactions at the Soil Colloid–Soil Solution Interface*. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences) Vol. 190. (pp. 409-468). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1909-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1909-4_12)
- Dahlgren R.A., Saigusa M. & Ugolini F.C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy* 82: 113-182. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
- Daniels R.B., Gamble E.E., Cady J.G. (1971). The relation between geomorphology and soil morphology an genesis. *Advances in Agronomy* 23: 51-88. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60150-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60150-9)
- Davidson D. and Grieve I. (2006). Relationships between biodiversity and soil structure and function: Evidence from laboratory and field experiments. *Applied Soil Ecology* 33: 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.11.002>
- Dawod V. and Fitzpatrick E.A. (1993). Some population sizes and effects of the Enchytraeidae (Oligochaeta) on soil structure in a selection of Scottish soils. *Geoderma* 56: 173-178. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90108-W](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90108-W)
- De León-González F., Gutiérrez-Castorena M.C., González Chávez M.C.A. and Castillo-Juárez H. (2007). Root-aggregation in a pumiceous sandy soils. *Geoderma* 142: 308-317. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.023>
- Delvaux B., Herbillon A.J. & Vielvoye L. (1989), Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon –taxonomic, mineralogical, and agronomic implications. *Geoderma* 45: 375-388. <https://doi.org/10.1016/0016-7061%2889%2990017-7>
- Delvaux B., Strebl F., Maes E., Herbillon A., Brahy V. & Gerzabek M. (2004). An Andosol–Cambisol toposequence on granite in the Austrian Bohemian Massif. *Catena* 56: 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.10.003>
- Deumlich D., Schmidt R., Sommer M. (2010). A multiscale soil–landform relationship in the glacial-drift area based on digital terrain analysis and soil attributes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173: 843–851. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900094>

- Dixon, J.C. (1986). Solute movement on hillslopes in the alpine environment of the Colorado Front Range. In: Abrahams A.D. (Ed.). *Hillslope Processes*. (pp.139–159). Allen and Unwin, London.
- Dixon J.C. (2013). Pedogenesis with respect to geomorphology. In: Shroder J. (Ed.). *Treatise on Geomorphology*. Vol.4, Weathering and Soils Geomorphology. (pp. 27-43). San Diego, CA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00058-0>
- Dixon, J. (2015). Soil Morphology in the Critical Zone: The role of Climate, Geology and Vegetation in Soil Formation in the Critical Zone. In: Giardino J. and Houser C. (Eds.). *Developments in Earth Surface Processes* Vol. 19 (pp.147-172). Elsevier.
- Djukic I., Tatzber M. & Gerzabek M. (2010). Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173 (1): 30-38. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200900027>
- Dongli S., Dongdong L., Shizhang P., Ming'an S. (2013). Multiscale Influences of Soil Properties on Soil Water Content Distribution in a Watershed on the Chinese Loess Plateau. *Soil Sci.* 178 (10): 530–539. <http://dx.doi.org/10.1097/SS.0000000000000021>
- Dongli S., Qian C., Timm L. C., Beskow S., Wei H., Caldeira T., Montebello de Oliveira L. (2017). Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. *Geoderma* 286: 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.017>
- van Dooremolen W.A., Wielemaker W.G., van Breemen N., Meijer E.M. & van Reeuwijk L. (1990). Chemistry and mineralogy of andosols of various age in a soil chronosequence on Andesitic lahars in Costa Rica. *Chemical geology* 84: 139-141.
- Douglas L.A. (1990). *Soil micromorphology: a basic and applied science*. 1° edition. Developments in Soil Science 19. Elsevier.
- Douglas L.A. and Thompson M. L. (1985). *Soil Micromorphology and Soil Classification*. Soil Science Society of America Special Publication No. 15.
- Drijber R., Lowe L.E. (1990). Nature of humus in Andosols under differing vegetation in the Sierra Nevada, Mexico. *Geoderma* 47: 221-231. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(90\)90030-D](https://doi.org/10.1016/0016-7061(90)90030-D)
- Dubroeuq D., Geissert D., Barois I. and Ledru M.P. (2002). Biological and mineralogical features of Andisols in the Mexican volcanic highlands. *Catena* 49:183-202. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00043-7)
- Egli M., Alioth L., Mirabella A., Raimondi S., Nater M. & Verel R. (2007). Effect of climate and vegetation on soil organic carbon, humus fractions, allophanes, imogolite, kaolinite, and oxyhydroxides in volcanic soils of Etna (Sicily). *Soil Science* 172 (9): 673-691. <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0b013e31809eda23>



- Egli M., Mirabella A., Sartori G. & Fitze P. (2003). Weathering rates as a function of climate: results from a climosequence of the Val Genova (Trentino, Italian Alps). *Geoderma* 111: 99–121. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00256-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00256-2)
- Fauzi A.I. & Stoops G. (2004). Reconstruction of a toposequence on volcanic material in the Honje Mountains, Ujung Kulon Peninsula, West Java. *Catena* 56: 45-66. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.10.004>
- Fedorova N. and Yarilova E. (1972). Morphology and genesis of prolonged seasonally frozen soils of Western Siberia. *Geoderma* 7:1-13. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(72\)90049-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(72)90049-3)
- Fitzpatrick E.A. (1984). *Micromorphology of Soils*. Springer. Netherlands.
- Fraccica A., Romero E., Fourcaud T. (2019). Multi-scale effects on the hydraulic behaviour of a root-permeated and compacted soil. *E3S Web of Conferences* 92: 12014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199212014>
- Galván-Tejeda N., Peña-Ramírez V., Mora-Palomino L. & Siebe Ch. (2014). Soil P fractions in a volcanic soil chronosequence of Central Mexico and their relationship to foliar P in pine trees. *J. Plant Nutr. Soil. Sci.* 177: 792-802. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300653>
- García-Tovar G. y Martínez-Serrano R. (2011). Geología y geoquímica de las lavas pleistocénicas del estratovolcán Telapón, Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 28 (2): 301-322.
- Guerra-García J.A., Rodríguez- Rodríguez A. y Arbelo C.D. (2013). Caracterización de los suelos del Monteverde mediante secuencias edáficas evolutivas y regresivas (Tenerife, Islas Canarias). *SJSS* 4(1): 19-50. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2014.V4.N1.02>
- Gutiérrez-Castorena. M. C. (2020). Manual para la descripción de perfiles de suelos. Edafología. Montecillos, Edo. de México. (INÉDITO).
- Hall G. F. (1983). Pedology and geomorphology. In: Wilding L.P., Smeck N.E. and Hall G.F. (Eds.). *Pedogenesis and Soil Taxonomy I., Concepts and Interactions*. Vol. 11-A. (pp. 117-140). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70600-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70600-7)
- Harsh J., Chorover J. & Nizeyimana E. (2002). Allophane and Imogolite. In: Dixon J. & Schulze D. (eds.). *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. (pp. 291-322). Soil Science Society of America Inc. Madison Wisconsin, USA.
- Hazelton P., Murphy B. (2007). Interpreting soil test results. What do all the numbers mean? NSW Department of Natural Resources. CSIRO Publishing.
- Hemond H.F., Fechner E.J. (2015). The Atmosphere. In: Hemond H.F., Fechner E.J. (Eds.). *Chemical Fate and Transport in the Environment* (Third edition). (pp. 311-454). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398256-8.00004-9>
- Hernández-Ordóñez J.O., Gutiérrez-Castorena M. del C., Ortiz-Solorio C.A., Sánchez-Guzmán P., Ángeles-Cervantes E. (2017). Calidad de Andosols en sistema forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana* 35: 179-189.

- Hirai H. & Hamazaki T. (2004). Historical Aspects of Soil Classification in Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50 (5): 611-622. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408519>
- Hoffland E., Kuyper T., Comans R. & Creamer R. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant Soil* 455: 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- Huang J., Zhang C., Cheng D., Hu B., Zhang P., Wang P., Liu J. & Liu Z. (2019). Soil organic carbon mineralization in relation to microbial dynamics in subtropical red soils dominated by differently sized aggregates. *Open Chemistry* 17(1): 381-391 <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0051>
- Huntington T., Johnson C., Johnson A., Siccama T. & Ryan D. (1989). Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol. *Soil Science* 148: 380-386.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). Conjunto de datos vectoriales. Escala 1:1 000 000. *Unidades climáticas*. Recuperado el 3 de mayo del 2020 de <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014*, Sistema Internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Jahn R., Blume H.P., Asio V.B., Spaargaren O. & Schad P. (2006). *Guidelines for Soil Description*. (Fourth edition). FAO. Rome.
- Jiménez-Martínez A. (2018). Formación de agregados de suelo en la interacción suelo-raíz-microorganismos endófitos: micromorfología y análisis de imágenes. (Tesis doctoral). Colegio de Postgraduados-Montecillo. Repositorio institucional-Colegio de Postgraduados.
- Jobbágy E.G. & Jackson R.B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10: 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Kawai K. (1978). Amorphous Materials of Andosols (Kuroboku) in Japan. *Japan Agricultural Research Quarterly*.12(3): 132-137.
- Kerfahi D., Tateno R., Takahashi K., Cho H., Kim H. & Adams J. (2017). Development of Soil Bacterial Communities in Volcanic Ash Microcosms in a Range of Climates. *Microb. Ecol.* 73(4): 775-790. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0873-y>
- Kim Y.S. and Singh A.P. (2000). Micromorphological characteristics of Wood biodegradation in wet environments: a review. *IAWA Journal* 21(22): 135-155. <http://dx.doi.org/10.1163/22941932-90000241>
- Kirkels F., Cammeraat L. & Kuhn N. (2014). The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes-A review of different

concepts. *Geomorphology* 226: 94-105.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023>

Kleber M., Mikutta R., Torn M. & Jahn R. (2005). Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. *Eur. J. Soil Sci.* 56: 717–725.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00706.x>

Kooistra M.J. (1991). A micromorphological approach to the interactions between soil structure and soil biota. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 34: 315-328.  
[https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90117-G](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90117-G)

Kramer M. & Chadwick O. (2016). Controls on carbon storage and weathering in volcanic soils across a high-elevation climate gradient on Mauna Kea, Hawaii. *Ecology* 97(9): 2384-2395. <https://doi.org/10.1002/ecy.1467>

Lilienfein J., Qualls R., Uselman S. & Bridgham S. (2003). Soil formation and organic matter accretion in a young andesitic chronosequence at Mt. Shasta, California. *Geoderma* 116: 249-264. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00086-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00086-7)

López-López A. (2014). Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo en una catena en laderas de montaña del Parque Nacional Izta-Popo. (Tesis de maestría). Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. TESIUNAM.

Macías J.L., Arce J.L., García-Tenorio F., Layer P.W., Rueda H., Reyes-Agustín G., López-Pizaña F. & Avellán D. (2012). Geology and geochronology of Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico. *Geological Society of America Field Guide* 25: 163-193.  
[https://doi.org/10.1130/2012.0025\(08\)](https://doi.org/10.1130/2012.0025(08))

Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., Laslett G.M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma* 154: 138-152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.007>

Malucelli F., Terribile F. & Colombo C. (1999). Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of São Miguel (Azores). *Geoderma* 88: 73-98. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00081-0)

Martínez-Rojas V. (2015). Microorganismos del suelo y cinética de carbono en ecosistemas del monte Tláloc. (Tesis doctoral). Colegio de Postgraduados-Montecillo. Repositorio institucional-Colegio de Postgraduados.

Mermut A.R. and Arnaud R. J. (1981). Microband fabric in seasonally frozen soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 378-586. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500030029x>

Miehlich G. (1991). Chronosequences of volcanic ash soils. Vol. 15. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Hamburg, Germany.

Miltner A., Bombach P., Schmidt-Brücken B. & Kästner M. (2012). SOM genesis: microbial biomass as a significant source. *Biogeochemistry* 111: 41–55.  
<https://doi.org/10.1007/s10533-011-9658-z>

- Mizota C. and van Reeuwijk L.P. (1989). *Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions*. Soil monograph 2. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). The Netherlands.
- van der Molen W.H., Martínez-Beltrán J., Ochs W.J. (2007). *Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Irrigation and Drainage Paper 62.
- Mooser, F., Nairn, A. E. M., & Negendank, J. F. W. (1974). Palaeomagnetic investigations of the tertiary and quaternary igneous rocks: VIII a palaeomagnetic and petrologic study of volcanics of the valley of Mexico. *Geologische Rundschau* 63(2): 451–483. <https://doi.org/10.1007/BF01820824>
- Murphy C. (1986). *Thin section preparation soils and sediments*. AB Academic Publishers. Berkhamsted.
- Nanzyo M. (2002). Unique Properties of Volcanic Ash Soils. *Glob. Environ. Res.* 6: 99-112. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70268-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70268-X)
- Ndyeshumba P. (1995). Soil and land use catenas. A case study of Amani sub-catchment, East Usambara mountains, Tanzania. International Institute for Aerospace survey and Earth Sciences (ITC). The Netherlands.
- Olmedo G.F., Angelini M.E., Vallone R.C., Moretti L.M. (2012). Estimación de variables edáficas en el oasis productivo de Tupungato, Mendoza. (Conference Paper). XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Vol 1.
- Óskarsson B., Riishuus M. & Arnalds O. (2012). Climate-dependent chemical weathering of volcanic soils in Iceland. *Geoderma* 189-190: 635-651. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.030>
- Panichini M., Matus F., Mora M.L., Godoy R., Bolan N.S., Rumpel C., Borie F. (2012). Carbon distribution in top- and subsoil horizons of two contrasting Andisols under pasture or forest. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01488.x>
- Parfitt, R. L. (1989). Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *J. Soil Sci.* 40: 259-269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01280.x>
- Parfitt R. L. (1990a). Allophane in New Zealand-A review. *Aust. J. Soil Res.* 28: 343-360. <http://dx.doi.org/10.1071/SR9900343>
- Parfitt, R. L. (1990b). Soils formed in tephra in different climatic regions. In: *Transactions 14th International Congress of Soil Science, Kyoto, 7* (pp.134-139).
- Parfitt R.L., Wilson A.D. & Hutt L. (1985). Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *Catena supplement 7*: 1-8.
- Percival H. J., Parfitt R.L., Scott N.A. (2000). Factors Controlling Soil Carbon Levels in New Zealand Grasslands: Is Clay Content Important? *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1623-1630. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451623x>

- van Reeuwijk J.P. (1999). *Procedimientos para análisis de suelos. Clasificación y correlación*. (Gutiérrez-Castorena M. C., Tavares-Espinosa C. A. y Ortiz Solorio C.A. Trans.). Colegio de Postgraduados-Montecillo. (Obra original publicada en 1995).
- Rueda H., Macías J.L., Arce J.L., Gardner J.E. & Layer P.W. (2013). The ~31ka rhyolitic Plinian to sub-Plinian eruption of Tláloc Volcano, Sierra Nevada, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 252: 73-91. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.001>
- Samuel-Rosa A., Diniz-Dalmolin R.S., Miguel P. (2013). Building predictive models of soil particle-size distribution. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37: 422-430. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200013>
- Sánchez-González A. (2004). Análisis sinecológico, florístico y biogeográfico de la vegetación del Norte de la Sierra Nevada, México. (Tesis doctoral). Colegio de Postgraduados-Montecillo. Repositorio institucional-Colegio de Postgraduados.
- Sánchez-González A. y López-Mata L. (2003). Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología. UNAM. Serie Botánica* 74(1): 47-71.
- Sánchez-González A., López-Mata L. y Vibrans H. (2006). Composición y patrones de distribución geográfica de la flora del bosque de oyamel del Cerro Tláloc, México. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 79: 67-78. <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.1734>
- Sedov S., Solleiro E. & Gama J. (2003). Andosol to Luvisol in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *Catena* 54(3): 495-513. [http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00123-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00123-1)
- Sevilla V., Valera A., Rey J.C., Vilorio J., Comerma J. (2013). Uso de la regresión kriging para elaborar mapas de propiedades de suelo en Venezuela. (Conference Paper). XX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2781.4645>
- Schaetzl R. J. (2013). Catenas and soils. In: Shroder J. (Ed.). *Treatise on Geomorphology* Vol. 4, Weathering and Soils Geomorphology. (pp.145-158). San Diego: Academic Press.
- Schwertmann, U. (1985). The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. In: B.A. Stewart (ed.). *Advances in soil science*. 1. (pp. 171–200). Springer-Verlag, New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3_5)
- Shoji S., Nanzyo M. & Dahlgren R. (1993). Classification of volcanic ash soils. In: *Volcanic Ash Soils. Genesis, properties and utilization*. Developments in Soil Science Vol. 21:(pp.73-100). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70265-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70265-4)
- SMN-CONAGUA. *Estaciones climatológicas*. Estación climatológica Río Frío (15082). Recuperado el 30 de agosto del 2020 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>



- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (Eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Stoops G. (2007). Micromorphology of soils derived from volcanic ash in Europe: a review and synthesis. *European Journal of Soil Science* 58: 356-377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00903.x>
- Stoops G., Marcelino V., Mees F. (Ed.). (2018). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths* (2° Edition). Elsevier.
- Stoops G., Poch R. M., Casamitjana M. y Loaiza J.C. (Eds). (2014). *Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias*. Fondo Editorial Pascual Bravo. Colombia.
- Stoops G., Sedov S. and Shoba S. (2018). Regoliths and Soils on Volcanic Ash. In: Stoops G., Marcelino V., Mees F. (Ed.). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths* (2° Edition). (pp. 721-743). Elsevier.
- Stoops G. and Vepraskas M. (2003). *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Suástegui-Méndez E. (2011). Microcartografía y patrones espectrales de la actividad biológica en secciones delgadas. (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados-Montecillo. Repositorio institucional-Colegio de Postgraduados.
- Tonneijck F.H., Jansen B., Nierop K.G., Verstraten J.M., Sevink J., de Lange L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science* 61: 392-405. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>
- Torn M.S., Trumbore S.E., Chadwick O.A., Vitousek P.M. & Hendricks D.M. (1997). Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature* 389: 170-173.
- Tsai C.C., Chen Z.S., Kao C.I., Ottner F., Kao S.J. & Zehetner F. (2010). Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. *Geoderma* 156:48-59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.01.007>
- Tsui C., Tsai C. & Chen Z. (2013). Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. *Geoderma* 209-210: 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013>
- Turner C. (2018). Soil chemical properties dynamics in glacial moraines across a chronosequence: Breiðamerkurjökull outwash plane, Iceland. (MS. Thesis). Graduate Program in Environment and Natural Resources. The Ohio State University.
- Ugolini F. & Dahlgren R. (1991). Weathering environments and occurrence of imogolite/allophane in selected Andisols and Spodosols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55 (4): 1166-1171. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500040045x>
- Ugolini F. and Dahlgren R. (2003). Soil Development in Volcanic Ash. *Glob. Environ. Res.* 6 (2): 69-82.



- United States Department of Agriculture. (2020). *Java Newhall Simulation Model*. Recuperado el 2 de agosto del 2020 de [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs14\\_2p2\\_053559](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs14_2p2_053559)
- United States Geological Survey. *Earth Explorer*. Imágenes Landsat 8. Recuperado el 14 de junio 2021 de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- USDA. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. 12° Edición. (Ortiz-Solorio C., Gutiérrez-Castorena M. C. y Gutiérrez-Castorena E., Trans.) Colegio de Postgraduados-Montecillo. (Obra original publicada en 2014).
- Van Vliet-Lanoë B. (1985). Frost effects in soils. In: Boardman J. (Ed.). *Soil and Quaternary Landscape Evolution*. (pp.115-156). J. Wiley Pub.
- Van Vliet-Lanoë B. and Fox C. (2018). Frost action. In: Stoops G., Marcelino V., Mees F. (Ed.). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths* (2° Edition). (pp. 575-604). Elsevier.
- Velázquez A. (1993). Landscape ecology of Tláloc and Pelado volcanoes, Mexico. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC). No. 16. The Netherlands.
- Velázquez A. (1994). Multivariate analysis of the vegetation of the volcanoes Tláloc and Pelado, Mexico. *Journal of Vegetation Science* 5: 263-270. <https://doi.org/10.2307/3236159>
- Vepraskas. M.J., Wilding L.P. and Drees L.R. (1993). Aquic conditions for Soil Taxonomy: concepts, soil morphology and micromorphology. In: Ringrose-Voase A.J. and Humphreys G.S. (Ed.). *Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Developments in Soil Science Vol. 22. (pp. 117-131). Elsevier, Amsterdam. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70402-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70402-1)
- Vingiani S., Scarciglia F., Mileti F., Donato P. and Terribile F. (2014). Occurrence and origin of soils with andic properties in Calabria (southern Italy). *Geoderma* 232-234: 500-516. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.001>
- Yagasaki Y., Mulder J., Okazaki M. (2006). The role of soil organic matter and short-range ordered aluminosilicates in controlling the activity of aluminum in soil solutions of volcanic ash soils. *Geoderma* 137: 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.001>
- Yakimenko O.S., Sedov S. & Solleiro E. (2007). The humus status of modern and buried volcanic soils in Mexico and its role in the paleogeographic interpretation of tephra-paleosol sequences. *Eurasian Soil Sc.* 40: 274–280. <https://doi.org/10.1134/S1064229307030052>
- Yemefack M., Rossiter D.G., Njomgang R. (2005). Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma* 125: 117–143. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.007>

- Wada K. (1989). Allophane and Imogolite. In: Dixon J. & Weed S. (eds.). *Minerals in Soil Environments*. Vol. 1. (2° edition). (pp. 1051-1087). SSSA Book Series. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c21>
- Zaiets O. and Poch R. M. (2016). Micromorphology of organic matter and humus in Mediterranean mountain soils. *Geoderma* 272: 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.006>
- Zhang G.L., Pan J.H., Huang C.M., Gong Z.T. (2007). Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 24(2): 261-169.
- Zonneveld I. S. (1989). The land unit-A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape ecology* 3(2): 67-86. <https://doi.org/10.1007/BF00131171>

## ANEXOS

### ANEXO A. Descripción de perfiles

#### Perfil 1

**Ejido:** Tequexquihuac, del monte Tlálloc. **Municipio:** Texcoco.

**Ubicación:** 19°23'39.7"N, 98°43'29.9"W. **Coordenadas UTM:** 525046,2150216

**Elevación:** 3810 msnm. **Orientación:** Suroeste. **Pendiente:** Nivel (0.2-0.5%). **Posición:** Cumbre. **Forma de la pendiente:** Plana simple.

**Condición climática:** Despejado. **Drenaje:** Moderadamente drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Acuíco. **Régimen de temperatura del suelo:** Frígido.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Mólico.



<b>A<sub>h</sub></b>	0-24 cm. Color en seco pardo grisáceo oscuro 10 YR 4/2; gris muy oscuro 10 YR 3/1 en húmedo, textura franco limosa; estructura migajosa de desarrollo moderado; muy friable y ligeramente plástico; poros intersticiales frecuentes finos y muy finos; raíces abundantes muy finas y finas y frecuentes medianas. Reacción nula al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte instantánea al NaF/Fenofaleína; transición difusa y plana.
<b>2B<sub>g</sub></b>	24-35/42 cm. Color en seco pardo grisáceo 10 YR 5/2; y pardo grisáceo muy oscuro 10 YR 3/2 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares muy redondeados finos, medios y gruesos de fuerte desarrollo; firme y muy ligeramente plástico; poros intersticiales frecuentes finos y muy finos; raíces comunes muy finas y medianas y frecuentes finas. Reacción nula al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y fuerte instantánea al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y plana.
<b>3C<sub>g</sub></b>	35/42-65 cm. Color olivo pálido en seco 2.5 Y 6/2; y pardo olivo claro 2.5 Y 5/3 en húmedo, textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares a suelta, medios y gruesos de desarrollo débil; consistencia muy firme y no plástica; pocos poros intersticiales muy finos y pocos vesiculares finos; muy pocas raíces muy finas. Reacción nula al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y ligera al NaF/Fenofaleína.

## Perfil 2

**Ejido:** Tequexquihuac, del monte Tlálloc. **Municipio:** Texcoco.

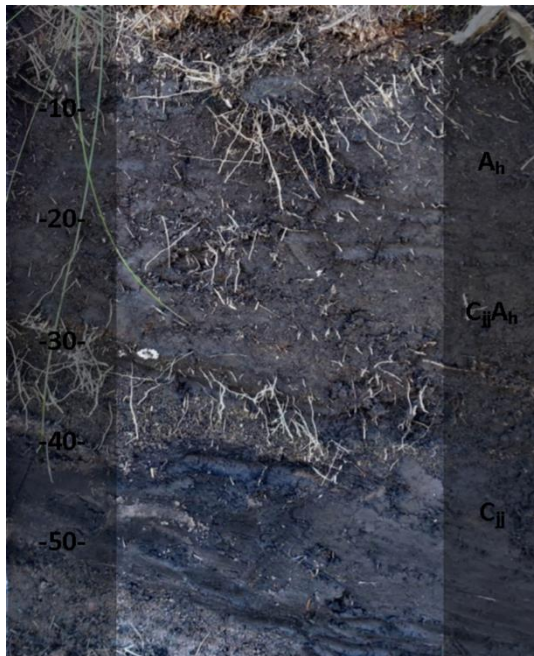
**Ubicación:** 19°23'39.4"N, 98°43'30.1"W. **Coordenadas UTM:** 525843,2149394

**Elevación:** 3810 msnm. **Orientación:** Suroeste. **Pendiente:** Nivel (0.2-0.5%). **Posición:** Cumbre. **Forma de la pendiente:** Plana simple.

**Condición climática:** Soleado despejado. **Drenaje:** Algo pobremente drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Acuico. **Régimen de temperatura del suelo:** Frígido.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Mólico.



<b>A<sub>h</sub></b>	0-20 cm. Color en seco gris oscuro 10 YR 4/1; gris muy oscuro 10 YR 3/1 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular finos y medios de fuerte desarrollo; muy friable y moderadamente plástico; poros intersticiales comunes finos y muy finos; raíces frecuentes muy finas y finas. Reacción nula al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y moderada al NaF/Fenofaleína; transición difusa y plana.
<b>C<sub>jj</sub>A<sub>h</sub></b>	20-40 cm. Color en seco gris oscuro 10 YR 4/1; y negro 10 YR 2/1 en húmedo, textura franco arenosa; estructura granular medios, gruesos y muy gruesos de fuerte desarrollo; friable y ligeramente plástico; poros intersticiales comunes finos y muy finos; raíces abundantes muy finas y finas. Reacción nula al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte instantánea al NaF/Fenofaleína; transición difusa y plana.
<b>C<sub>jj</sub></b>	40-62 cm. Color gris muy oscuro en seco 10 YR 3/1; y negro 10 YR 2/1 en húmedo, textura franco limosa; estructura laminar; consistencia friable y ligeramente plástica; pocos poros intersticiales finos y muy finos; raíces comunes muy finas y finas. Reacción nula al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y débil al NaF/Fenofaleína.



### Perfil 3

**Ejido:** Nativitas, del monte Tláloc. **Municipio:** Texcoco

**Ubicación:** 19°25'23.1"N, 98°44'59.1"W. **Coordenadas UTM:** 526272,2147661

**Elevación:** 3529 msnm. **Orientación:** Suroeste. **Pendiente:** Inclinado (5-10%). **Posición:** Ladera media. **Forma de la pendiente:** Cóncava-Convexa.

**Condición climática:** Parcialmente nublado. **Drenaje:** Bien drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Údico. **Régimen de temperatura del suelo:** Mésico.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Úmbrico.



<b>A<sub>h1</sub></b>	0-7/15 cm. Color en seco pardo 10 YR 4/3; y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular finos y medios de fuerte desarrollo; muy friable y ligeramente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, vesiculares frecuentes finos y medios; raíces numerosas muy finas y finas, medias frecuentes y gruesas comunes. Reacción violenta al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y ondulada. Abundantes micorrizas. 5 cm de mantillo. Abundantes micorrizas.
<b>A<sub>h2</sub></b>	7/15-17/22 cm. Color en seco pardo 10 YR 4/3; y gris muy oscuro 7.5 YR 3/1 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular gruesos y muy gruesos de fuerte desarrollo; muy friable y ligeramente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, pocos poros vesiculares finos y medios; raíces muy finas y finas frecuentes, medianas y gruesas comunes. Reacción muy fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara y ondulada. Abundantes micorrizas.
<b>BA</b>	17/22-33/62 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10 YR 4/4; y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares finos, medios y gruesos de moderado desarrollo; consistencia firme y ligeramente plástica; poros intersticiales comunes finos; raíces muy finas, finas y medias comunes y gruesas pocas. Reacción muy fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara y ondulada. Policromático.
<b>BC</b>	33/62-51/84 cm. Color en seco pardo amarillento claro 10 YR 6/4; y pardo fuerte 7.5 YR 4/6 en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de moderado desarrollo; consistencia firme y ligeramente plástica; pocos poros intersticiales finos; raíces pocas muy finas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara y ondulada. Materiales coluviales.
<b>C</b>	51/84-93 cm. Color en seco pardo muy pálido 10 YR 7/4; y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de moderado desarrollo; consistencia firme y ligeramente plástica; muy pocos poros intersticiales finos; pocas raíces finas y medianas. Reacción moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína. Materiales coluviales.

### Perfil 4

**Ejido:** San Pablo Izayoc, del monte Tiáloc. **Municipio:** Texcoco.

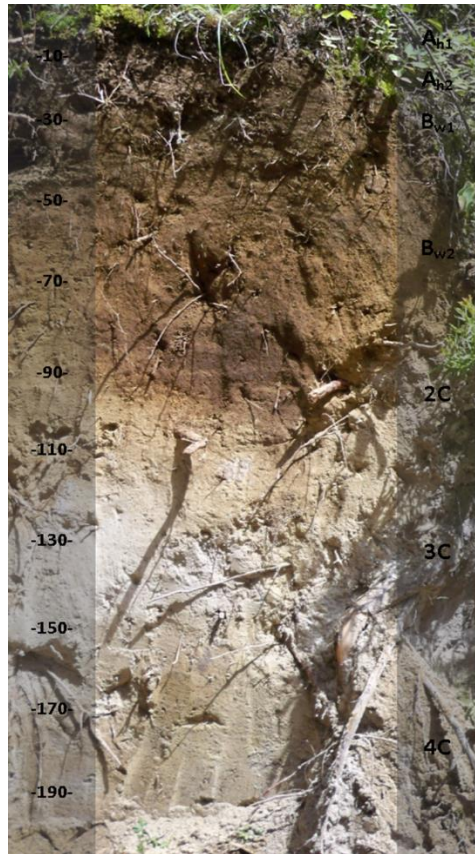
**Ubicación:** 19°25'58.5"N, 98°44'49.6"W. **Coordenadas UTM:** 526547, 2148749

**Elevación:** 3460 msnm. **Orientación:** Suroeste. **Pendiente:** Inclinado (5-10%). **Posición:** Ladera baja. **Forma de la pendiente:** Convéxa plana.

**Condición climática:** Soleado despejado. **Drenaje:** Bien drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Údico. **Régimen de temperatura del suelo:** Mésico.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Ócrico.



<b>A<sub>h1</sub></b>	0-10 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10 YR 4/4; pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular gruesos y muy gruesos de desarrollo moderado; friable y ligeramente plástica; abundantes poros intersticiales finos, vesiculares frecuentes medios y gruesos y frecuentes dendríticos finos y medios; raíces abundantes muy finas y finas, numerosas medias y pocas gruesas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y plana. Abundantes hifas.
<b>A<sub>h2</sub></b>	10-22 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10YR 4/4; y pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular medios, gruesos y muy gruesos de desarrollo moderado; friable y ligeramente plástica; abundantes poros intersticiales finos, vesiculares comunes medios y gruesos y dendríticos comunes medios; raíces muy finas y finas abundantes, medianas numerosas y pocas gruesas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara y ondulada. Abundantes hifas.
<b>B<sub>w1</sub></b>	22-38 cm. Color pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco y húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares a granular finos, medios y gruesos de desarrollo débil; consistencia friable y ligeramente plástica; poros intersticiales abundantes finos, vesiculares frecuentes medios y gruesos y dendríticos comunes medios; raíces muy finas, finas y medias numerosas. Reacción moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara e irregular.
<b>B<sub>w2</sub></b>	38-83/38 cm. Color pardo amarillento 10 YR 5/4 en seco y en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de desarrollo débil; consistencia firme y ligeramente plástica; poros intersticiales finos frecuentes, y pocos vesiculares medios; raíces medias comunes y pocas gruesas y muy gruesas. Reacción moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara e irregular.
<b>2C</b>	83/38-100/110 cm. Color en seco pardo muy pálido 10 YR 7/3; y pardo amarillento 10 YR 5/6 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares y suelta, finos y medios de desarrollo débil; consistencia firme y ligeramente plástica; pocos poros intersticiales finos; pocas raíces gruesas y muy gruesas. Reacción ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y fuerte al NaF/Fenofaleína.
<b>3C</b>	100/110-143/150 cm. Color en seco pardo muy pálido 10 YR 8/2; y gris claro 10 YR 7/2 en húmedo, textura franca; estructura suelta; consistencia suelta y no plástica; pocos poros intersticiales finos; pocas raíces gruesas y muy pocas muy gruesas. Reacción muy ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y al NaF/Fenofaleína.
<b>4C</b>	143/150-200 cm. Color en seco pardo muy pálido 10 YR 8/2; y gris claro 10 YR 7/2 en húmedo, textura franco limosa; estructura suelta; consistencia suelta y no plástica; muy pocos poros intersticiales finos; muy pocas raíces muy gruesas. Reacción muy ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y al NaF/Fenofaleína.



## Perfil 5

**Ejido:** San Miguel Tlaixpan, del monte Tlálloc. **Municipio:** Texcoco.

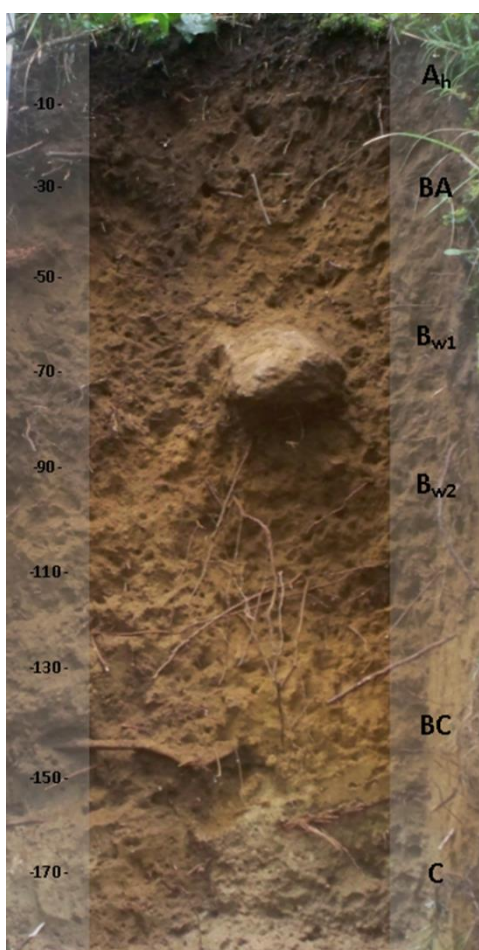
**Ubicación:** 19°25'40.4"N, 98°45'11.2"W. **Coordenadas UTM:** 525918, 2148192

**Elevación:** 3298 msnm. **Orientación:** Oeste. **Pendiente:** Inclinado (5-10%). **Posición:** Ladera media. **Forma de la pendiente:** Convexa plana.

**Condición climática:** Lluvioso. **Drenaje:** Bien drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Údico. **Régimen de temperatura del suelo:** Mésico.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Mólico.



<b>A<sub>h</sub></b>	0-8/22 cm. Color en seco pardo oscuro 7.5 YR 3/3; y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en húmedo, textura franca; estructura granular media a gruesa de fuerte desarrollo; muy friable y ligeramente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, poros tubulares comunes medios y vesiculares comunes medios; raíces muy finas y finas abundantes y medias frecuentes. Reacción muy violenta al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y débil al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y ondulada.
<b>BA</b>	8/22-45/50 cm. Color en seco pardo oscuro 7.5 YR 3/3; y pardo oscuro 10 YR 3/3 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares finos y medios de fuerte desarrollo; muy friable y ligeramente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, abundantes poros vesiculares medios; raíces muy finas abundantes, finas frecuentes, gruesas comunes y pocas muy gruesas. Reacción muy violenta al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición difusa y ondulada.
<b>B<sub>w1</sub></b>	45/50-66/80 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10 YR 3/6; y pardo 10YR 4/3 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de moderado desarrollo; friable y no plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, comunes poros vesiculares medios y gruesos; raíces finas pocas, medianas comunes y gruesas comunes. Reacción muy fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición gradual y ondulada. Policromático.
<b>B<sub>w2</sub></b>	66/80-125/134 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6; y pardo amarillento oscuro 10YR 4/4 en húmedo, textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de moderado desarrollo; friable y no plástico; comunes poros intersticiales finos y muy finos, comunes poros vesiculares medios y gruesos; raíces gruesas numerosas y abundantes muy gruesas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara y ondulada.
<b>BC</b>	125/134-160 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10 YR 3/6; y pardo amarillento oscuro 10YR 4/6 en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de débil desarrollo; friable y ligeramente plástico; comunes poros intersticiales finos y muy finos, pocos poros vesiculares finos y medios; raíces gruesas numerosas y numerosas muy gruesas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y débil al NaF/Fenofaleína; transición clara y plana.
<b>C</b>	160-180 cm. Color en seco pardo amarillento claro 10 YR 6/4; y pardo amarillento oscuro 10YR 4/4 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares a suelto; suelto y no plástico; poros intersticiales pocos finos y muy finos, muy pocos poros vesiculares finos y medios; raíces gruesas pocas y muy pocas finas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy débil al NaF/Fenofaleína.

## Perfil 6

**Ejido:** San Pablo Izayoc, del monte Tláloc. **Municipio:** Texcoco.


**Ubicación:** 19°26'19.5"N, 98°45'13.7" W. **Coordenadas UTM:** 525843,2149394

**Elevación:** 3299 msnm. **Orientación:** Oeste. **Pendiente:** Ligeramente inclinado (2-5%). **Posición:** Ladera baja. **Forma de la pendiente:** Plana simple.

**Condición climática:** Soleado despejado. **Drenaje:** Bien drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Údico. **Régimen de temperatura del suelo:** Mésico.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Úmbrico.

	<p><b>A<sub>h1</sub></b></p>	<p>0-10 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10 YR 4/4; pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular, gruesos y muy gruesos de fuerte desarrollo; muy friable y moderadamente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, y abundantes vesiculares finos y medios; raíces abundantes muy finas y finas, y frecuentes medianas. Reacción moderada al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición difusa y plana. Horizonte hémico. Numerosas micorrizas y actividad de lombrices. Abundantes acículas de pino.</p>
	<p><b>A<sub>h2</sub></b></p>	<p>10-22/25 cm. Color en seco pardo amarillento oscuro 10YR 4/4; y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular, gruesos de fuerte desarrollo; muy friable y moderadamente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, y abundantes vesiculares finos y medios; raíces abundantes muy finas y finas, frecuentes medianas y comunes gruesas. Reacción moderada al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y ondulada. Numerosas micorrizas y actividad de lombrices.</p>
	<p><b>B<sub>w1</sub></b></p>	<p>22/25-50 cm. Color pardo amarillento en seco 10 YR 5/6; pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares finos y medios de moderado desarrollo; consistencia friable y ligeramente plástica; poros intersticiales comunes finos y muy finos; raíces comunes finas y pocas gruesas. Reacción muy ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición clara y plana.</p>
	<p><b>B<sub>w2</sub>/B<sub>w1</sub></b></p>	<p>50-80 cm. Color pardo amarillento 10 YR 5/4 en seco y en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares medios y gruesos de débil desarrollo; consistencia friable y ligeramente plástica; poros intersticiales pocos finos y muy finos; raíces pocas medias y gruesas. Reacción muy ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición difusa y plana. Presencia de crotovinias (10 YR 4/1 gris oscuro en húmedo y seco).</p>
	<p><b>B<sub>w3</sub></b></p>	<p>80-96/110 cm. Color pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco y en húmedo, textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos de débil desarrollo; consistencia firme y no plástica; pocos poros intersticiales finos y muy finos; pocas raíces medias. Reacción nula al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y al HCl y fuerte al NaF/Fenofaleína. Transición clara y ondulada.</p>
	<p><b>B<sub>w4</sub></b></p>	<p>96/110-114 cm. Color en seco pardo amarillento 10 YR 5/6; y pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo, textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos y muy gruesos de débil desarrollo; consistencia firme y no plástica; muy pocos poros intersticiales finos; muy pocas raíces medianas. Reacción nula al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y al HCl y moderada al NaF/Fenofaleína. Transición clara y ondulada.</p>
	<p><b>C</b></p>	<p>114-120 cm. Color en seco amarillo pardo 10 YR 6/6; y pardo amarillento 10 YR 5/6 en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares, gruesos y muy gruesos de débil desarrollo; consistencia firme y no plástica; muy pocos poros intersticiales finos; raíces nulas. Reacción nula al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; reacción nula al HCl y débil al NaF/Fenofaleína.</p>

### Perfil 7

**Ejido:** San Pablo Izayoc, del monte Tláloc. **Municipio:** Texcoco.

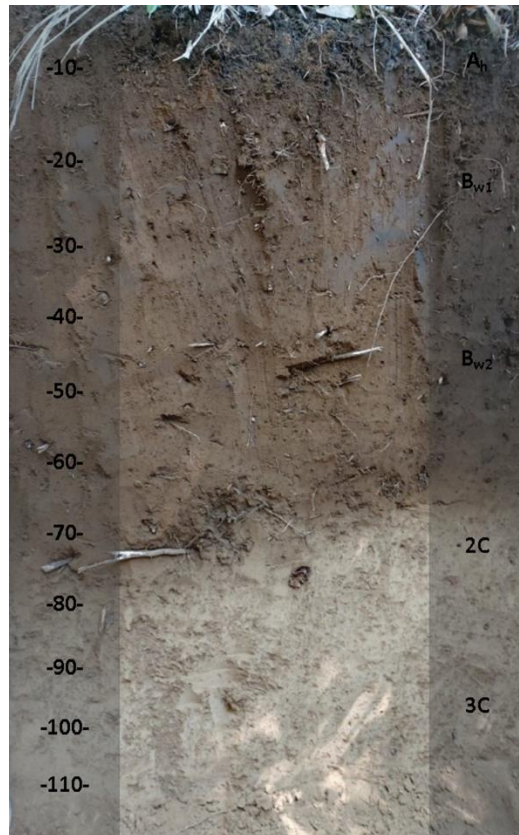
**Ubicación:** 19°26'46.3"N, 98°45'41.0"W. **Coordenadas UTM:** 525046,2150216

**Elevación:** 3096 msnm. **Orientación:** Oeste. **Pendiente:** Inclinado (5-10%). **Posición:** Ladera media. **Forma de la pendiente:** Cóncava-Convexa.

**Condición climática:** Soleado despejado. **Drenaje:** Bien drenado.

**Régimen de humedad del suelo:** Údico. **Régimen de temperatura del suelo:** Mésico.

**Epipedón (Soil Taxonomy):** Ócrico.



<b>A<sub>h</sub></b>	0-4/10 cm. Color en seco pardo oscuro 7.5 YR 3/3; pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en húmedo, textura franco limosa; estructura granular, gruesos y muy gruesos de fuerte desarrollo; muy friable y moderadamente plástico; abundantes poros intersticiales finos y muy finos, tubulares comunes medios y frecuentes dendríticos medios; numerosas raíces muy finas y medianas y abundantes finas. Reacción fuerte al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y plana.
<b>B<sub>w1</sub></b>	4/10-38 cm. Color en seco pardo amarillento 10 YR 5/4; y pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos de fuerte desarrollo; friable y moderadamente plástico; frecuentes poros intersticiales finos y muy finos, y comunes dendríticos finos y medios; raíces abundantes finas, y numerosas medianas. Reacción moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y muy fuerte al NaF/Fenofaleína; transición difusa y plana.
<b>B<sub>w2</sub></b>	38-65/72 cm. Color pardo amarillento en seco 10 YR 5/6; y amarillo pardo 10 YR 6/6 en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos de moderado desarrollo; consistencia friable y moderadamente plástica; poros intersticiales comunes finos y muy finos, muy pocos dendríticos finos y medios; numerosas raíces finas y medianas. Reacción ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y fuerte al NaF/Fenofaleína; transición difusa y ondulada.
<b>2C</b>	65/72-79 cm. Color pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en seco y en húmedo, textura franco limosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos y muy gruesos de moderado desarrollo; consistencia firme y ligeramente plástica; pocos poros intersticiales finos y muy finos; raíces frecuentes finas y medias. Reacción muy ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; reacción nula al HCl y moderada al NaF/Fenofaleína; transición abrupta y plana.
<b>3C</b>	79-120 cm. Color pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en seco; y pardo amarillento oscuro 10 YR 3/6 en seco y en húmedo, textura franca; estructura en bloques subangulares medios y gruesos y muy gruesos de moderado desarrollo; consistencia firme y ligeramente plástica; muy pocos poros intersticiales finos y muy finos; raíces medias comunes. Reacción muy ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , nula al HCl y débil al NaF/Fenofaleína.

## ANEXO B. Análisis estadísticos

### Ecuaciones de regresión y nivel de significancia.

Los análisis de regresión lineal múltiple se ejecutaron con el programa R versión 4.0.3. La prueba ANOVA para las ecuaciones de regresión lineal se realizó con el 95% de confianza ( $\alpha=0.05$ ) en todos los escenarios.

**Cuadro 9.** Ecuaciones de regresión de las variables por profundidad.

Variable Y	Profundidad (cm)	Ecuación de regresión
CO	0-10	$Y=12.854+0.245(S)-0.641(Cu)-21.985(V)-1.756(T)+11.514(D)$
	10-20	$Y=16.089+0.277(S)-0.653(Cu)-33.974(V)-1.98(T)+12.513(D)$
	20-30	$Y=3.528-0.059(S)+0.119(Cu)-0.096(V)-0.154(T)-1.96(D)$
Al+1/2Fe	0-10	$Y=9.183+0.201(S)-0.416(Cu)-21.939(V)-0.804(T)+3.929(D)$
	10-20	$Y=-3.34-0.089(S)+0.189(Cu)+14.836(V)+0.691(T)-6.253(D)$
	20-30	$Y=-4.705-0.427(S)+0.272(Cu)+1.061(V)+0.613(T)+0.174(D)$
DA	0-10	$Y=2.766+0.062(S)-0.129(Cu)-8.98(V)-0.215(T)+2.132(D)$
	10-20	$Y=-1.168-0.025(S)+0.077(Cu)+1.567(V)+0.302(T)-1.69(D)$
	20-30	$Y=0.208+0.0002(S)+0.013(Cu)-1.888(V)+0.117(T)+0.039(D)$
PO <sub>3</sub>	0-10	$Y=256.24+3.814(S)-8.536(Cu)-505.64(V)-20.169(T)+113.615(D)$
	10-20	$Y=14.96-1.801(S)+3.922(Cu)+196.513(V)+9.603(T)-103.525(D)$
	20-30	$Y=20.843+0.414(S)+0.073(Cu)+20.518(V)+6.038(T)-7.811(D)$
Profundidad		$Y=602.622-0.156(EI)+0.237(S)+4.836(Cu)$

**Variables X:** S: Pendiente(grados), Cu: Curvatura(grados), V: NDVI, T: Temperatura(°C), D: Drenaje(m<sup>día</sup><sup>-1</sup>).

**Cuadro 10.** Resultados de las pruebas ANOVA del modelo de regresión lineal múltiple.

Variable Y	Profundidad	R <sup>2</sup>	p-value	Pr(>F)				
				S	Cu	V	T	D
CO	0-10	0.72	0.778	0.883	0.587	0.650	0.596	0.492
	10-20	0.79	0.704	0.919	0.471	0.993	0.479	0.456
	20-30	0.34	0.974	0.858	0.703	0.994	0.852	0.761
Al+1/2Fe	0-10	0.50	0.927	0.880	0.564	0.809	0.759	0.903
	10-20	0.53	0.909	0.880	0.502	0.998	0.867	0.834
	20-30	1.00	0.041	0.028	0.027	0.043	0.031	0.220
DA	0-10	0.45	0.943	0.924	0.891	0.644	0.722	0.753
	10-20	0.48	0.932	0.998	0.806	0.673	0.651	0.775
	20-30	0.53	0.911	0.981	0.747	0.733	0.546	0.980
PO <sub>3</sub>	0-10	0.51	0.918	0.841	0.723	0.709	0.645	0.766
	10-20	0.56	0.894	0.614	0.690	0.932	0.662	0.752
	20-30	1.00	0.068	0.036	0.051	0.424	0.051	0.336
<b>Variable Y</b>		<b>R<sup>2</sup></b>	<b>p-value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>				



			<b>EI</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>
Profundidad	0.97	0.007	0.008	0.007	0.017

**Nota:** p-value de los coeficientes de determinación ( $\alpha=0.05$ )

No significativo.

Significativo.

Altamente significativo.

## **ANEXO C. Descripción de las secciones delgadas**

Las secciones delgadas fueron descritas con base en el Manual para la Descripción de Secciones Delgadas de Suelos [referencia 2, en capítulo 4]. La descripción e interpretación de algunos componentes y unidades de fábrica, fueron elaborados con apoyo del libro de Stoops [referencia 3, en capítulo 4] y el Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias [referencia 4, en capítulo 4].

Se designó una frecuencia porcentual tomando en cuenta los componentes de la microestructura apedal y/o pedal (según fue el caso), la porosidad y el material orgánico (grueso y fino). Puesto que los componentes minerales, el material fino amorfo y los pedregos, se localizan dentro de la micromasa, no se tomó en cuenta una frecuencia para estos.

Los elementos de las fracciones gruesas del material orgánico, se describen en orden de abundancia, por orden ascendente.

### **Perfil 1**

**Localización:** Ejido Tequexquihuac, monte Tlálóc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:**

**Número:** 1;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h</sub>)

#### **1. Microestructura.**

La estructura es completamente pedal compleja.

**A. Tipo.** Conforman el 30% de toda la sección. Dos tipos de agregados:

- 1) Migajosa; fuertemente desarrollada, no acomodada; rugosa; 0.05 a 0.2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica; 26% de los agregados; predomina en la parte superior de la sección.
- 2) Bloques subangulares; débilmente desarrollados, no acomodados; rugosos y subredondeados; 0.5 a >2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica; 4% de los agregados.

**B. Porosidad.** Poros de empaquetamiento compuesto; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; 40% del área total de la sección.

#### **2. Componentes básicos orgánicos.**

25% de la sección, entre la fracción gruesa y fina únicamente; distribución referida aleatoria entre los agregados e inclinada de los fragmentos de raíces gruesos.



**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de órganos y grado de preservación bueno.

(a) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos anaranjados muy redondeados; no opacos; birrefringentes amarillos; parénquima completa; birrefringencia blanca; 0.2 a 0.5 mm.

(b) Cortes transversales de tallos; tejidos epidérmicos amarillos; paredes visibles; no opacos; parénquima Birrefringente blanca; 0.2 a 0.5 mm.

(c) Fragmentos de raíces alargadas; pardas rojizas-anaranjadas; poco opacas; no birrefringentes; distribución referida inclinada con los agregados; 0.5 a 2 mm.

(d) Contornos de raíces; rojas pardas anaranjadas; birrefringencia fuerte amarilla; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación moderado.

Granos de polen de pasto; pardo rojizo; opacos; no birrefringentes; 0.05 a 0.2 mm.

**C. Material fino amorfo.** Presentes como impregnaciones en los agregados migajosos y masas compactas; negras; muy opacas; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 2.

(a) Cuarzo; incoloro; anhedral; subredondeado; 0.05 a 0.5 mm; límite prominente y claro.

(b) Plagioclasa; incoloro; anhedrales; maclas marcadas en XLP; 0.05mm a 0.2 mm; límite prominente y claro.

(c) Biotita; anhedral; laminar; pardo oscuro; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y abrupto.

### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 2:98. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

Fábrica-b indiferenciada.

### 5. Pedorrasgos.

**Texturales.** Hiporrevestimientos en los poros canal; rojos intensos pardos; 0.5 a 2 mm; impregnación fuerte; abundancia ocasional; límite distinto y difuso. El pedorrasgo se asocia a la oxidación del Fe, por la penetración de las raíces.

**Número:** 2;

**Profundidad:** 12-20 cm;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h</sub>)

### 1. Microestructura.

La estructura es 15% apedal y 85% pedal.

**A. Tipo.** Entre los granos de arena y los pedos constituyen el 55% de la sección.

1) Apedal. Microagregados entre granos; moderadamente ordenados; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida agrupada de los microagregados entre los poros; distribución relacionada enáulica; 12% de la sección.

2) Pedal. Bloques subangulares; moderadamente desarrollados, no acomodados; rugosos y subredondeados; 0.5 a 2 mm (8%) y >2 mm (60%); distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica y porfídica de espacio simple dentro de los agregados; 56% de la sección.

3) **Porosidad.** 25% del área total de la sección.

a) **Poros inter-agregados.** Poros de empaquetamiento compuesto; 0.5 a 2 mm; 15% de la porosidad.

b) **Poros intra-agregados.** Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 10% de la porosidad.

### 2. Componentes básicos orgánicos.

7% del área total de la sección, considerando la fracción gruesa y fina únicamente.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de órganos y grado de preservación moderado.

- (a) Raíces; tejidos epidérmicos pardos; alargadas; no opacas; birrefringentes blancas; parénquima completa; birrefringencia blanca; 0.2 a 0.5 mm.
  - (b) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos pardos amarillentos; no opacos; Birrefringentes amarillos; parénquima completa; birrefringencia blanca; 0.2 a 0.5 mm.
  - (c) Cortes transversales de tallos; tejidos epidérmicos pardos; no opacos; parénquima muy Birrefringente blanca en los contornos; 0.2 a 0.5 mm
  - (d) Fragmentos de raíces alargadas; pardas rojizas; opacas; no birrefringentes; 0.5 a 2 mm.
  - (e) Fragmentos de hojas carbonizadas; negras; muy opacas y no Birrefringentes; se observan poros intracelulares; 0.2 a 0.5 mm.
  - (f) Fragmentos de tejidos de corteza; rojizos muy pardos; 0.5 a 2 mm; opacos y no birrefringentes; se aprecian poros internos.
- B. **Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación moderado.

Se observan escasas esporas; contornos definidos opacos; 0.05 a 0.2 mm.

- C. **Material fino amorfo.** Masas irregulares entre los agregados; negros; muy opacos; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

3. **Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 1.

- (a) Plagioclasa; incolora; subhedrales; maclas apenas perceptibles en PPL; 0.05 mm a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (b) Cuarzo; incoloro; con inclusiones; anhedral; subangular; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (c) Biotita; anhedral; estriada; pleocroísmo fuerte pardo oscuro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; isotrópico; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 15:85.

Fábrica-b moteada. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

5. **Pedorrasgos.**

- 1) **Amorfos.** Nódulos típicos; redondeados; negros; opacos; isotrópicos; 0.5 a 2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y abrupto; abundancia baja; variabilidad baja, distribución básica y orientación aleatorias.
- 2) **De excrementos.** Hábito elipsoidal; rojos ligeramente opacos; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia frecuente; órgano-minerales; grado de coalescencia moderado; envejecimiento interno poroso; distribución básica agrupada y orientación aleatoria. Se identifican excrementos elipsoidales típicos de ácaros, dentro del material orgánico.

**Número:** 3;

**Profundidad:** 28-36 cm;

**Horizonte:** 2 (2B<sub>g</sub>)

1. **Microestructura.**

Estructura 95% apedal y 5% pedal.

- A. **Tipo.** Entre la estructura apedal y los peds conforman el 72% de la sección.

- 1) Apedal. Canales entre granos; pobremente ordenado; distribución básica y orientación aleatoria; distribución referida en bandas inclinadas en algunas zonas de la sección; distribución relacionada porfídica cerrada; 64% de la sección.
- 2) Pedal. Bloques subangulares; débilmente desarrollada; parcialmente acomodada; agregados subangulares rugosos; >2 mm; distribución básica y orientación aleatoria; distribución relacionada porfídica cerrada; 8% de la sección.

- B. **Porosidad.** 25% del área total de la sección.

- (a) Poros de empaquetamiento complejo; >2 mm; 7% de la porosidad.
- (b) Canales; 0.2 a 0.5 mm; 15% de la porosidad.
- (c) Fisuras; 0.2 a 0.5 mm; 3% de la porosidad.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

3% del área total de la sección, considerando solo la fracción gruesa.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación moderado.

- (a) Raíces alargadas y en cortes transversales; tejidos epidérmicos anaranjados; no opacos; Birrefringentes amarillos; parénquima incompleto; birrefringencia blanca; 0.2 a 0.5 mm.
- (b) Cortes transversales de tallos; tejidos epidérmicos hialinos; no opacos; parénquima muy Birrefringente blanca; 0.05 a 0.2 mm.
- (c) Fragmentos de raíces y corteza; pardos rojizos; muy opacos; no birrefringentes; disgregados; 0.5 a 2 mm.

B. **Fracción fina.** No está presente.

C. **Material fino amorfo.** Presente como masas densas; negros; muy opacos; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

3. **Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 1.

- (a) Cuarzo; incoloro; con inclusiones; anhedral; subredondeado; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; límite prominente y claro.
- (b) Plagioclasa; incolora; anhedrales; maclas apenas perceptibles en XLP; 0.2 mm a 0.5 mm; límite prominente y claro.
- (c) Anfíbol; prismático; verde oscuro; clivaje marcado; 0.2 mm a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 30:70. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio simple.

Fábrica-b indiferenciada.

5. **Pedorrasgos.**

- 1) **Texturales.** Hiporrevestimientos dentro de la micromasa; rojos pardos, ocre rojizos y pardos; 0.5 a >2 mm; impregnación moderada; abundancia muy abundante; límite desvanecido y difuso. Estos pedorrasgos se asocian a procesos de oxidación del Fe y Mn.
- 2) **De empobrecimiento.** Hiporrevestimientos en la micromasa, anaranjados ocre; amarillos en XLP; 0.5 a 2 mm; límite desvanecido y difuso; abundancia: abundante; variabilidad baja. En los Hiporrevestimientos de Fe, se presentan zonas adyacentes de empobrecimiento, en donde el Fe parece reducirse.

**Número:** 4;

**Profundidad:** 44-52 cm;

**Horizonte:** 3 (3C<sub>g</sub>)

1. **Microestructura.**

La estructura es completamente apedal.

A. **Tipo.** Grano compacto, no ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida en bandas en toda la sección; distribución relacionada porfídica cerrada.

B. **Porosidad.** Representa el 13% de la sección.

- (a) Poros de empaquetamiento simple; >2 mm; 9% de la porosidad.
- (b) Cavidades; >2 mm; 3% de la porosidad.
- (c) Canales; 0.5 a 2 mm; 1% de la porosidad.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

Representan el 0.1% de la sección, únicamente la fracción gruesa.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.

(a) Tallos; tejidos epidérmicos amarillos; paredes visibles; parénquima completa; birrefringente blanca; 0.2 a 0.5 mm; apenas dos organismos en toda la sección.

(b) Fragmentos de raíces; tejidos epidérmicos rojos muy pardos; opacos; residuos de parénquima, poco birrefringentes amarillos; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Fracción fina.** No están presentes.

**C. Material fino amorfo.** Escasa; presente como masas densas esféricas; negras; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

**3. Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica y orientación aleatorias; pobremente ordenados y grado de alteración 1.

(a) Cuarzo; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; límite prominente y abrupto.

(b) Plagioclasa; incolora; subhedral; maclas marcadas en XLP; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

(c) Biotita; subhedral; laminar; pleocroísmo fuerte pardo-verde oscuro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

(d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 97:3. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica cerrada.

Fábrica-b indiferenciada.

**5. Pedorrasgos.**

1) **Texturales.** Hiporrevestimientos; rojos ocre; 0.5 a <2 mm; impregnación débil; abundancia media; límite distinto y difuso. Se encuentran en la micromasa, impregnando los fragmentos de rocas y en zonas cercanas a los poros.

2) **De empobrecimiento.** Hiporrevestimientos en la micromasa, anaranjados ocre; amarillos en XLP; 0.5 a 2 mm; límite distinto y difuso; abundancia media; variabilidad baja. En los Hiporrevestimientos de Fe, se presentan zonas adyacentes de empobrecimiento, en donde el Fe parece reducirse.

## Perfil 2

**Localización:** Ejido Tequexquinahuac, monte Tláloc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:** 527834,2146426.

**Número:** 5;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h</sub>)

**1. Microestructura.**

La estructura es completamente pedal compleja.

**A. Tipo.** Conforman el 25% de toda la sección. Tres tipos de agregados:

1) Migajosa; moderadamente desarrollada, no acomodada; rugosa; 0.05 a 0.2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida agrupada de algunos migajones entre el material orgánico; distribución relacionada enáulica; 14% de los agregados.

2) Bloques subangulares; débilmente desarrollados, no acomodados; rugosos y subredondeados (9%) y redondeados (2%); >2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica; 11% de los agregados.

**B. Porosidad.** Poros de empaquetamiento compuesto; 0.5 a >2 mm; 57% de la sección.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

18% del área total de la sección, considerando únicamente la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de órganos y grado de preservación bueno.

(a) Cortes transversales de tallos de pasto; tejidos epidérmicos anaranjados pardos; poco opacos; birrefringentes amarillos; 0.05 a 0.2 mm.

(b) Raíces de pasto en cortes transversales; tejidos epidérmicos anaranjados muy redondeados; no opacos; birrefringentes amarillos; parénquima completa; birrefringencia blanca; 0.05 a 0.2 mm.

(c) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos rojos pardos; rugosos poco opacos; poco birrefringentes anaranjados; parénquima completa; birrefringencia blanca; 0.05 a 0.2 mm.

(d) Anteras completas; pardas ligeramente rojizas; poco opacas; contenidos birrefringentes blancos; 0.5 a 2 mm.

(e) Raíces, pardas rojizas oscuras; medianamente opacas; birrefringencia amarilla en los conductos; 0.5 a >2 mm; distribución referida inclinada con los agregados.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación bueno.

(a) Esporas; contorno anaranjado; poco pardo; no birrefringentes; <0.05 mm; pocas.

(b) Granos de polen de pasto dentro de su saco; saco muy pardo rojizo y granos globulares anaranjados rojizos; opacos; no Birrefringentes; 0.05 a 0.2 mm.

**C. Material fino amorfo.** Presente como impregnaciones en el mismo material orgánico grueso y en los agregados; pardo rojizo y negro; impregnación moderada; límite prominente y difuso.

### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y con grado de alteración 1. Son difíciles de distinguir hasta en el objetivo máximo.

(a) Cuarzo; incoloro; con inclusiones; anhedral; subredondeado; 0.05 a 0.2 mm y 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

(b) Piroxeno; incoloro; prismático y columnar, clivaje visible en XPL; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; poco interperizado.

### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 0:100. Patrón de distribución relacionada g/f enáulica.

Fábrica-b indiferenciada.

### 5. Pedorrasgos.

**Amorfos.** Nódulos pseudomórficos; pardos muy opacos a negros; isotrópicos; 0.5 a 2 mm; impregnación fuerte; pseudomorfosis completa; límite desvanecido y difuso; abundancia frecuente; variabilidad baja; distribución básica aleatoria. Se observan impregnaciones negras dentro de los agregados, características de los óxidos/hidróxidos de Mn.

**Número:** 6;

**Profundidad:** 27-35 cm;

**Horizonte:** 2 (C<sub>jj</sub>A<sub>h</sub>)

#### 1. Microestructura.

Estructura 96% apedal y 4% pedal.

**A. Tipo.** Entre los granos de arena y los pedos constituyen el 71% de la sección.

1) Apedal. Grano compacto; ordenamiento pobre; distribución básica aleatoria y orientación perpendicular; distribución referida en bandas irregulares; distribución relacionada porfídica cerrada. (67% de la sección).

2) Pedal. Bloques subangulares; débilmente desarrollada; no acomodada; agregados subredondeados rugosos; 0.2 a 0.5 mm; distribución básica y orientación aleatoria; distribución relacionada porfídica abierta dentro de los agregados. (4% de la sección).

**B. Porosidad.** Representa el 19% del área total de la sección.

(a) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; frecuencia de 12% de la porosidad.

(b) Canales; 0.5 mm; 7% de la porosidad total.



## 2. Componentes básicos orgánicos.

10% de la sección, entre la fracción gruesa y fina.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmento de órganos y grado de preservación moderado.

(a) Fragmentos de corteza y hoja carbonizados; negros y pardos muy oscuros; opacos no birrefringentes; algunos poseen impregnaciones rojizas tipo óxidos; 0.5 a 2 mm.

(b) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos amarillos; porosos; ligeramente birrefringentes amarillos; parénquima semicompleta; birrefringencia amarillenta; 0.2 a 0.5 mm.

B. **Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de fragmento de órganos y grado de preservación pobre.

Se observa una espora parda oscura; estructura incompleta; opaca y no birrefringente; 0.05 a 0.2 mm.

C. **Material fino amorfo.** Presente como masas irregulares entre la micromasa; pardas muy oscuras a negras; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

## 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y grado de alteración 3.

(a) Cuarzo; incoloro; algunas inclusiones; anhedral; subredondeado y subangular; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro.

(b) Plagioclasa; incoloro; anhedrales; subredondeado; maclas solo son distinguibles en XLP; 0.05 mm a 0.2 mm; límite prominente y claro.

(c) Biotita; subhedral; hábito laminar; pardo claro con pleocroísmo fuerte a pardo oscuro; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y abrupto; evidencia de intemperismo.

## 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 90:10. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica cerrada.

Fábrica-b indiferenciada.

## 5. Pedorrasgos.

### 1) Texturales.

(a) Hiporrevestimientos en poros canal; rojos intensos pardos; 0.5 a <2 mm; impregnación fuerte; abundancia ocasional; límite distinto y claro. El pedorrasgo está asociado a la oxidación del Fe, por la penetración de las raíces.

(b) Hiporrevestimientos en la micromasa; rojos pardos y negros; 0.5 a <2 mm; impregnación moderada a fuerte; abundancia media; límite distinto y difuso. Estos pedorrasgos impregnan zonas de la micromasa y revisten algunos minerales y granos de arena, su color se asocia a óxidos de Fe y Mn.

2) **De empobrecimiento.** Hiporrevestimientos de la micromasa, anaranjado ocre; amarillos en XLP; 0.5 a <2 mm; límite distinto y difuso; abundancia ocasional; variabilidad baja. Donde se ubican los Hiporrevestimientos de Fe, se presentan zonas adyacentes de empobrecimiento, en donde el Fe parece reducirse.

**Número:** 7;

**Profundidad:** 53-61 cm;

**Horizonte:** 3 (C<sub>ji</sub>)

## 1. Microestructura.

Estructura 97% apedal y 2% pedal.

A. **Tipo.** Entre los granos de arena y los peds constituyen el 87% de la sección.

1) Apedal. Grano compacto; ordenamiento pobre; distribución básica aleatoria y orientación perpendicular; distribución referida de los granos en bandas irregulares; distribución relacionada porfídica cerrada. (81% de la sección).

2) Pedal. Bloques subangulares; débilmente desarrollada; no acomodada; agregados redondeados rugosos; 0.2 a 0.5 mm; distribución básica y orientación aleatoria; distribución relacionada porfídica abierta dentro de los agregados. (6% de la sección).

B. **Porosidad.** Representa 9% del área total de la sección.

(a) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 1% de la porosidad.

(b) Canales; 0.2 a 0.5 mm y 2 mm; 8% de la porosidad total; distribución referida inclinada respecto a la microestructura apedal.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

4% de la sección, entre la fracción gruesa y fina.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmento de órganos y grado de preservación moderado.

(a) Fragmentos de raíces en canales; amarillas alargadas; parénquima hialino; birrefringente blanco amarillento; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm.

(b) Agujas de pino cortes transversales; individuales; tejidos epidérmicos rojos muy pardos; opacos y no birrefringentes; centros parenquimáticos incompletos; no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm; muy escasas.

(c) Fragmentos de agujas de pino en pajas; rojas muy pardas; tejidos epidérmicos porosos; opacos no birrefringentes; parénquimas mínimos, no birrefringentes; 0.5 a >2 mm.

B. **Fracción fina** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación moderado.

Se observa una espora entre la micromasa; globular; parda; paredes abruptas pardas oscuras; no birrefringente; 0.05 a 0.2 mm.

C. **Material fino amorfo.** Presente impregnaciones entre la micromasa; pardas muy oscuras; impregnación moderada; límite prominente y difuso.

3. **Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; pobremente ordenados y con un grado de alteración 3.

(a) Cuarzo; incoloro; subhedral; subangular; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; evidencias de intemperismo.

(b) Plagioclasa; incoloro; subhedral; prismáticas; maclas apenas perceptibles en XLP; 0.05 mm a 0.2 mm; límite prominente y abrupto.

(c) Biotita; subhedral; hábito laminar; pardo claro con pleocroísmo fuerte a pardo oscuro; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y claro; muy intemperizada.

(d) Piroxeno; pardo claro; anhedral; maclas marcadas; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y claro; muy intemperizado.

(E) Minerales de origen biológico: Se observan pocos fitolitos; columnares; hialinos; no opacos y no Birrefringentes; <0.05 mm.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 25:75. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

Fábrica-b indiferenciada.

5. **Pedorrasgos.**

**Texturales.** Hiporrestimientos en la micromasa; rojos anaranjados pardos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; abundancia ocasional; límite distinto y claro. El color de estos pedorrasgos se asocia a óxidos de Fe.

### Perfil 3

**Localización:** Ejido Nativitas, monte Tláloc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:** 526272,2147661.

**Número:** 8;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1(A<sub>H1</sub>)

1. **Microestructura.**

La estructura es completamente pedal.

**A. Tipo.** granular de moderada a fuertemente desarrollada, no acomodada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida agrupada de algunos agregados con el material orgánico; distribución relacionada enáulica; conforman el 15% del área total de la sección; tamaño 0.2 a 0.5 mm; rugosos; dominan los subredondeados, aunque también están presentes los redondeados.

**B. Porosidad.** Representa el 40% de toda la sección. Se compone de poros de empaquetamiento compuesto; >2 mm.

## 2. Componentes básicos orgánicos.

Representa el 45% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales presentan un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de órganos y un grado de preservación general moderado.

(a) Predominan los fragmentos de maderas de coníferas; color pardo rojizo; >2mm; poco opacas y birrefringencia amarilla-naranja; los radios medulares están bien marcados y contrastantes; se aprecian los poros intracelulares, como reflejo de la pérdida de contenido celular.

(b) Fragmentos de madera; color pardo amarillo; >2mm; no opacas y birrefringencia amarilla; se observan los radios medulares y los poros intracelulares; son el segundo componente más dominante.

(c) Fragmentos de madera de coníferas; cortes tangenciales; >2 mm; no opacas y birrefringencia amarilla-naranja; se aprecian estructuras celulares internas; abundantes.

(d) Agujas de pino completas y fragmentadas; >2 mm; no opacas y birrefringentes solo en la epidermis; tejidos parenquimáticos incompletos; abundantes.

(e) Fragmentos de raíces; 0.5 a 2 mm; contornos rojos muy pardos; algunos contienen flobafeno y poco contenido celular; opacos y birrefringentes amarillos; numerosas.

(f) Corte transversal de hojas de pino; 0.5 a 2 mm; tejidos epidérmicos rojizos pardos con flobafenos, estomas rosados en PPL y muy birrefringentes blancas en XLP; estructuras parenquimáticas completas.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y un grado de preservación moderado.

Escasas unidades de esporas; contornos pardos muy oscuros a negros; 0.05 a 0.2 mm.

**C. Material fino amorfo.** Muy escasa; dentro o entre los agregados granulares; impregnación fuerte; <0.05 mm.

## 3. Componentes básicos minerales.

No se aprecian minerales primarios en estos aumentos, la birrefringencia está dada por el material orgánico fresco.

## 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 2:98. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

Fábrica-b indiferenciada.

## 5. Pedorrasgos.

**De excrementos.** Hábito elipsoidal; pardos amarillentos; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia baja; órgano-minerales; coalescencia débil y grado de envejecimiento muy poroso; distribución referida agrupada respecto a la materia orgánica. Se identifican principalmente los excrementos de ácaros dentro del material vegetal ya hecho contorno.

**Número:** 9;

**Profundidad:** 16-23 cm;

**Horizonte:** 2(A<sub>h2</sub>)

## 1. Microestructura.

La estructura es pedal compleja.

**A. Tipo.** Constituye el 30% de toda la sección. Dos tipos de agregados:

1) Granular; moderadamente desarrollada, no acomodada; rugosa y redondeada; 0.5 a 2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida agrupada de algunos

agregados con el material orgánico; conforman el 23% de los agregados; distribución relacionada enáulica.

- 2) Bloques subangulares; moderadamente desarrollados, no acomodados; rugosos y subredondeados; >2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; frecuencia del 7% de los agregados; distribución relacionada enáulica.

**B. Porosidad.** Poros de empaquetamiento compuesto; >2 mm; representan el 45% de toda la sección.

## 2. Componentes básicos orgánicos.

Constituye el 25% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de órganos y un grado de preservación general moderado.

(a) Dominan los fragmentos de raíces bien preservadas; 0.2 a 0.5 y 0.5 a 2 mm; tejidos epidérmicos rojos anaranjados birrefringentes anaranjados; tejidos parenquimáticos no opacos y birrefringentes blancos.

(b) Abundan los residuos de agujas de pino; anaranjadas rojizas; 0.5 a 2 mm; opacas y no birrefringentes; tejido parenquimático no reconocible.

(c) Fragmentos de madera; color pardo amarillo; >2 mm; no opacas y birrefringencia amarilla; se observan sus radios medulares y poros intracelulares.

(d) Cortes transversales de hojas; >2 mm; tejidos epidérmicos naranjas rojizos, estomas muy birrefringentes blancos; estructuras parenquimáticas completas.

(e) Fragmentos de raíces incompletos; 0.2 a 0.5 mm; rojos muy pardos; no birrefringentes; se observan paredes celulares.

(f) Fragmentos de carbón; 0.2 a 0.5 mm; negros no birrefringentes; se aprecian poros intercelulares.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y un grado de preservación moderado. <1% del material orgánico.

(a) Muy pocas endosporas; rojas amarillentas; poco opacas y birrefringentes anaranjadas; 0.2 a 0.5 mm; órganos completos.

(b) Unidades de esporas; contornos pardos muy oscuros a negros; 0.05 a 0.2mm.

(c) Esclerocios de hongos; redondos; pardos muy oscuros; opacos y no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

**C. Material fino amorfo.** Se encuentra como incrustaciones de los bloques subangulares; 0.5 a 2 mm y >2 mm; opacos negros; en algunos se pueden percibir aún los poros intracelulares.

## 3. Componentes básicos minerales.

No se aprecian minerales primarios a estos aumentos, la birrefringencia está dada por el material orgánico fresco.

## 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 5:95. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

Fábrica-b indiferenciada.

## 5. Pedorrasgos.

**De excrementos.** Hábito elipsoidal; pardos rojizos; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia baja; órgano-minerales; coalescencia débil y grado de envejecimiento muy poroso; distribución referida agrupada respecto a la materia orgánica. Se identifican principalmente los excrementos de ácaros dentro del material vegetal.

**Número:** 10;

**Profundidad:** 35-43 cm;

**Horizonte:** 3(BA)

## 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, bien ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica, de microagregados y material orgánico fino entre poros intersticiales.

**B. Porosidad.** Forman el 12% de toda la sección.

1) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 3% de la porosidad.

2) Cavidades; de tamaño 0.2 a 0.5 mm; 4% de la porosidad.

3) Canales; 0.5 a 2 mm; 5% de la porosidad.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

5% de toda la sección; considerando solo la fracción gruesa y fina; distribución referida aleatoria entre los microagregados.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de órganos y un grado de preservación pobre.

(a) Tejidos de raíces incompletas; 0.2 a 0.5 mm; tejidos epidérmicos rojos anaranjados no birrefringentes; poco preservados.

(b) Fragmentos de carbón; 0.5 a 2 mm y >2 mm; negros no birrefringentes; se aprecian poros intercelulares.

(c) Raíces preservadas; 0.05 a 0.2 mm; tejido epidérmico pardo rojizo no birrefringente; contenido parenquimático completo, birrefringente blanco.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y un grado de preservación pobre.

Muy escasos esclerocios de hongos; irregulares; pardos muy oscuros a negros; muy opacos y no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

**C. Material fino amorfo.** Se encuentra entre la micromasa; tamaños 0.05 a 0.2 mm y hasta >2 mm; opacos negros; en algunos se pueden percibir los poros intracelulares y son más oscuros en los contornos.

3. **Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples; tienen una orientación aleatoria; grado de ordenamiento moderado y grado de alteración 2.

(a) Plagioclasa. Común en la micromasa; formas subhedrales; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto. Las maclas son débilmente perceptibles en LPP, solo se distinguen en XLP.

(b) Biotita. Común en la micromasa; subhedral y hábito laminar; color pardo claro con pleocroísmo fuerte a verde oscuro; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto. Los minerales se ven poco intemperizados.

(c) Cuarzo. Común en la micromasa; subhedral; incoloro y con pocas inclusiones; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

(d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 10:90. Patrón de distribución relacionada g/f enáulica.

Fábrica-b punteada-moteada.

5. **Pedorrasgos.**

1) **Amorfos.**

(a) Nódulos típicos; redondeados; pardos muy oscuros a negros; opacos; isotrópicos; <0.2 mm a 0.5 mm; impregnación fuerte; pseudomorfosis fuerte; límite distinto y claro; abundancia media; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.

(b) Nódulos típicos; irregulares; rojos anaranjados; ligeramente opacos; isotrópicos; <0.2 mm a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis fuerte; límite distinto y difuso; abundancia media; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.

2) **De excrementos.** Esféricos; pardo rojizos-anaranjados; rugosos; 0.5 a 2 mm; abundancia baja; órgano-minerales; coalescencia fuerte y grado de envejecimiento muy denso; distribución básica agrupada y orientación aleatoria. Se identifican excrementos de larvas de Babionidae.



**Número:** 11;  
**Profundidad:** 63-71 cm;  
**Horizonte:** 4(BC)

**1. Microestructura.**

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica: el espacio entre el material fino y los granos gruesos es muy cercano, pero no lo suficiente para formar una matriz densa; habiendo poros intersticiales.

**B. Porosidad.** 10% de toda la sección.

1) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 3% de la porosidad.

2) Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 4% de la porosidad.

3) Vesículas; 0.2 a 0.5 mm; 3% de la porosidad.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

4% de toda la sección; considerando solo la fracción gruesa y fina; distribución referida aleatoria dentro de la matriz.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y un grado de preservación pobre.

(a) Fragmentos de carbón; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; negras no birrefringentes; se aprecian poros intercelulares.

(b) Fragmentos de tejidos de corteza; 0.2 a 0.5 mm; tejidos epidérmicos rojos pardos no birrefringentes; se observan paredes celulares.

(c) Cortes de raíces; 0.2 a 0.5 mm; tejidos epidérmicos anaranjados y rojos poco opacos; contenido parenquimático casi completo y birrefringente.

**D. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y un grado de preservación pobre.

Muy escasos esclerocios de hongos; redondos; contornos muy oscuros a negros; opacos y no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Material fino amorfo.** Presente entre la micromasa; tamaños <0.05 y 0.05 a 0.2 mm; opacos negros.

**3. Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples; tienen una orientación aleatoria; pobremente ordenados y grado de alteración 3.

(a) Cuarzo. anhedral; incoloro y poco perceptible en PPL; <0.05 mm; límite prominente y abrupto; muy intemperizado.

(b) Piroxeno; subhedral y prismático; clivaje 90°; 0.05 mm; evidencias de intemperismo; los minerales son poco distinguibles aún con el objetivo máximo.

(c) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 10:90. Patrón de distribución relacionada g/f enáulica.

Fábrica-b punteada-moteada.

**5. Pedorrasgos.**

**1) Amorfos.**

(a) Nódulos pseudomórficos; rojos pardos muy oscuros; isotrópicos; 0.5 a 2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis fuerte; límite distinto y claro; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias. La forma de las impregnaciones sugiere presencia de óxidos de Fe y Mn.

(b) Nódulos típicos redondos; pardos anaranjados; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación débil; pseudomorfosis moderada; límite distinto y claro; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.

**2) De excrementos.** Elipsoidales; rojos-anaranjados; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia muy baja; órgano-minerales; coalescencia fuerte y grado de envejecimiento muy denso; distribución básica aleatoria y orientación aleatoria. Se identifican excrementos de larvas de Babionidae.

**Número:** 12;

**Profundidad:** 84-102 cm;

**Horizonte:** 5(C)

### 1. **Microestructura.**

La estructura es completamente pedal.

A. **Tipo.** Bloques subangulares; de moderado desarrollo y parcialmente acomodados; rugosos; subangulares; >2mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de los granos de arena con la masa basal; distribución relacionada enáulica entre los agregados; distribución relacionada porfídica de espacio simple dentro de los agregados. Constituyen el 70% del área total de la sección.

B. **Porosidad.** Conforman el 22% de la porosidad total en la sección.

#### 1) **Poros inter-agregados.**

(a) Poros de empaquetamiento compuesto; 0.5 a 2 mm y >2 mm; 12% de frecuencia.

(b) Canales; >2 mm; 3% de la porosidad total.

#### 2) **Poros intra-agregados.**

Cavidades; 0.5 a 2 mm; orientación aleatoria; irregulares; 7% de frecuencia.

### 2. **Componentes básicos orgánicos.**

8% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa y fina.

A. **Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y un grado de preservación moderado.

(a) Fragmentos de carbón de madera y hoja; 0.5 a 2 mm y >2 mm; negras no birrefringentes; se aprecian poros intracelulares incompletos y radios medulares de las cortezas.

(b) Fragmentos de órganos de raíces; 0.2 a 0.5 mm; tejidos epidérmicos gruesos rojos muy oscuros y opacos; contenido parenquimático incompleto y birrefringente.

(c) Fragmentos de tejidos de raíz y tallo; 0.2 a 0.5 mm; tejidos epidérmicos rojos pardos no birrefringentes; incompletos; se observan paredes celulares.

B. **Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y un grado de preservación pobre.

Una unidad de esclerocio de hongos; redonda; parda muy oscura; no se identifica el contenido medular; muy opaca y no birrefringente; 0.2 a 0.5 mm.

C. **Material fino amorfo.** Es el material más abundante de la materia orgánica; se encuentra como incrustaciones entre la masa basal; redondeado; impregnación fuerte.

### 3. **Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples y en fragmentos de rocas; orientación aleatoria; moderadamente ordenados y grado de alteración 2.

(a) Cuarzo. Es dominante en la micromasa y los fragmentos de rocas; subhedral; muy fracturado; con inclusiones; 0.5 a 2 mm; límite prominente y abrupto.

(b) Plagioclasa. Muy común en la micromasa y los fragmentos de rocas; anhedral y subhedral; maclas poco perceptibles en PPL; <0.05 y 0.05 a 0.2 mm límite prominente y abrupto.

(c) Olivino. Común en la micromasa y los fragmentos de rocas; prismático; con inclusiones; 0.05 a 0.2 mm; bien preservado.

(d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; isotrópico; 0.2 a 0.5 mm.

### 4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 20:80. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica espacio simple. Fábrica-b moteada.

### 5. **Pedorrasgos.**

#### 1) **Amorfos.**

- (a) Nódulos típicos; redondos; pardos rojizos; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y abrupto; abundancia muy baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.
- (b) Nódulos concéntricos irregulares; rojos pardos ocre; isotrópicos; 0.5 a <2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis débil; límite prominente y claro; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.
- 2) **De excrementos.** Esféricos; rojos anaranjados; poco opacos; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia muy baja; órgano-minerales; moderadamente coalescentes; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria. Están ubicados en los poros de empaquetamiento compuesto.

#### Perfil 4

**Localización:** Ejido San Pablo Izayoc, monte Tláloc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:** 526547, 2148749.

**Número:** 13;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1(A<sub>h1</sub>)

#### 1. Microestructura.

Estructura completamente pedal compleja.

**A. Tipo.** Forma el 28% de toda la sección. Dos tipos de agregados:

- 1) Granular; moderada a fuertemente desarrollada, no acomodada; rugosa y muy redondeada; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; distribución básica agrupada y orientación aleatoria; distribución relacionada enáulica; 20% de los agregados.
- 2) Bloques subangulares; moderadamente desarrollados, no acomodados; rugosos y redondeados; >2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica; 8% de los agregados.

**A. Porosidad.** Representa el 58% de toda la sección. Compuesta de poros de empaquetamiento compuesto; 0.5 a 2 mm y >2 mm.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

Conforma el 15% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa y fina; distribución referida aleatoria con los agregados e inclinada de algunas raíces.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y un grado de preservación bueno.

- (a) Agujas de pino; muy abundantes en la parte superior de la sección; alargadas y con distribución referida inclinada respecto a los agregados; tejidos epidérmicos rojizos y birrefringentes blancos; mesófilos y venas vasculares conservados no birrefringentes; 0.5 a 2 mm y >2 mm.
- (b) Raíces y hojas completas e incompletas; tejidos epidérmicos gruesos, rojos pardos, opacos y no birrefringentes; sin contenido celular; 0.2 a 0.5 mm; se distribuyen en toda la sección.
- (c) Raíces completas en cortes transversales; tejidos epidérmicos gruesos abruptos, rojos pardos y no birrefringente; tejido parenquimático completo, birrefringente blanco; 0.2 a 0.5 mm.
- (d) Fragmentos de hojas; naranjas no opacos; birrefringentes naranjas; poros intercelulares visibles; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Fracción fina.** Representa el 0.5% de la fracción orgánica total.

- (1) Pocas esporas; contornos naranjas abruptos; poco opacos y muy birrefringentes amarillos; 0.05 a 0.2mm; células individuales.
- (2) Esclerocios de hongos; redondos; cortezas muy gruesas pardas muy oscuras; contenido medular visible y preservado; opacos y no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

**C. Material fino amorfo.** Material muy abundante de la materia orgánica; presente como impregnaciones en los agregados; pardos rojizos muy opacos y negros; impregnación moderada; límites desvanecidos y difusos; también presentes entre los poros como material orgánico desintegrado.

### 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples; tienen una orientación aleatoria; moderadamente ordenados y grado de alteración 2.

- (a) Cuarzo; incoloro; anhedral; <0.05 mm; inmersos entre los agregados; límite prominente y claro.
- (b) Piroxeno; muy fragmentado e incompleto; clivaje 90° observable en PPL; <0.05 mm; límite prominente y claro.

### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 4:96. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta. Fábrica-b indiferenciada.

### 5. Pedorrasgos.

#### De excrementos.

- (a) Elipsoidales; rojos anaranjados; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia frecuente; orgánicos; grado de coalescencia débil; envejecimiento interno poroso; distribución básica aleatoria; distribución referida agrupada dentro del material orgánico. Se identifican excrementos elipsoidales de ácaros dentro de materiales orgánicos.
- (b) Esféricos; pardos opacos; rugosos; 0.5 a <2 mm; abundancia frecuente; órgano-minerales; coalescencia fuerte; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria. Se ubica entre los poros de empaquetamiento compuesto de forma humificada.

**Número:** 14;

**Profundidad:** 3-12 cm;

**Horizonte:** 1(A<sub>h1</sub>)

### 1. Microestructura.

Estructura 90% apedal y 10% pedal.

A. **Tipo.** Entre los granos de arena y los pedos constituyen el 55% de la sección.

- 1) Apedal. Cavidades; ordenamiento moderado; distribución básica y orientación aleatoria; distribución relacionada enáulica y quitónica parcial en algunos granos gruesos. (51% de la sección).
- 2) Pedal. Granular; fuertemente desarrollada; no acomodada; agregados redondos rugosos; 0.2 a 0.5 mm; distribución básica y orientación aleatoria; distribución referida agrupada con respecto a la microestructura apedal; distribución relacionada enáulica. (4% de la sección).

B. **Porosidad.** Representa el 37% de toda la sección.

- (a) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 31% de la porosidad total.
- (b) Cavidades; irregulares y discontinuas; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; 6% de la porosidad.

### 2. Componentes básicos orgánicos.

Conforma el 8% de toda la sección, tomando en cuenta solo la fracción gruesa y fina.

A. **Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de órganos y un grado de preservación moderado.

- (a) Fragmentos de raíces; tejido epidérmico amorfo grueso y abrupto; rojas muy pardas; opacas no birrefringentes; sin contenidos parenquimáticos; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm.
- (b) Fragmentos de hojas; poros intracelulares naranjas; ligeramente birrefringentes naranjas en algunas partes; 0.2 a 0.5 mm.
- (c) Fragmentos de hojas y corteza carbonizados; negros; opacos y no birrefringentes; se detectan poros intracelulares; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm.
- (d) Cortes transversales de raíces; tejidos epidérmicos rojos oscuros no birrefringentes; tejido parenquimático incompleto; no hialino y birrefringente amarillento; 0.2 a 0.5 mm.

B. **Fracción fina.** Material muy escaso. Esporas incompletas; células individuales; contornos naranjas rojizos pardos abruptos; opacos y birrefringentes amarillos; 0.05 a 0.2 mm.

C. **Material fino amorfo.** Material común inmerso entre los microagregados; negros redondeados; impregnación moderada; límites distintos, claros y difusos; tamaños heterogéneos en toda la sección.

### 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples; orientación aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 2.

- (a) Cuarzo; incoloro; anhedral y subredondeado; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; común en la micromasa y en los fragmentos de roca.
- (b) Plagioclasa; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; maclas distinguibles solo en XLP; presente en la micromasa y en los fragmentos de roca; rasgos de intemperismo.
- (c) Biotita; subhedral; hábito laminar marcado; pleocroísmo fuerte a verde oscuro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; anhedral; 0.2 a 0.5 mm.

### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 18:82. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica y enáulica.

Fábrica-b punteada-moteada.

### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en algunos granos de arena; pardos claros; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia media; distribución relacionada quitónica.
- 2) **Amorfos.** Nódulos pseudomórficos; pardos oscuros; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.
- 3) **De excrementos.** Esféricos; pardos rojizos oscuros; rugosos; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; órgano-minerales; moderada a fuertemente coalescentes; envejecimiento interno denso distribución básica aleatoria. Se identifican excrementos esféricos de larva Bibionidae.

**Número:** 15;

**Profundidad:** 26-33 cm;

**Horizonte:** 3(B<sub>w1</sub>)

### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, moderadamente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de los granos gruesos con el material fino; distribución relacionada porfídica de espacio doble y quitónica en algunos granos gruesos.

**B. Porosidad.** Poros Cavidad; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm. 5% de la sección.

### 2. Componentes básicos orgánicos.

4% de toda la sección, tomando en cuenta solo la fracción gruesa.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y un grado de preservación pobre.

(a) Fragmentos de carbón; son los más comunes del material orgánico; negros no birrefringentes; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; los poros intracelulares no son tan distinguibles.

(b) Fragmentos de raíces sin contenido celular; rojos pardos; tejidos epidérmicos gruesos y abruptos; no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

(c) Cortes de tallos; tejidos epidérmicos gruesos; rojos pardos; poco tejido parenquimático, birrefringente blanco amarillento; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo.** Material incrustado en la micromasa; negros irregulares; impregnación fuerte; límites prominentes y abruptos.

### 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples; distribución básica aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 3.

Se identifica únicamente cuarzo; subhedral; 0.5 a 2 mm y >2 mm; límite prominente y abrupto; rasgos de intemperismo.



#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 20:80. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de doble espacio. Fábrica-b indiferenciada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en algunos granos de arena; pardos claros; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia ocasional; distribución relacionada quitónica.
- 2) **De excrementos.**
  - (a) Elipsoidales; rojos anaranjados; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia baja; orgánicos; grado de coalescencia fuerte; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria; distribución referida agrupada dentro del material orgánico. Se identifican excrementos elipsoidales de ácaros dentro de materiales orgánicos.
  - (b) Esféricos; pardos rojizos oscuros; rugosos; 0.5 a 2 mm; abundancia baja; órgano-minerales; fuertemente coalescentes; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria. Se identifican excrementos esféricos de larva Bibionidae.

**Número:** 16;

**Profundidad:** 49-57 cm;

**Horizonte:** 4(B<sub>w2</sub>)

#### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

- A. Tipo.** Cavidades, pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida agrupada de algunos microagregados con el material orgánico; distribución relacionada quitónica de los granos gruesos recubiertos y porfídica de espacio simple entre los mismos.
- B. Porosidad.** Representa el 8% de toda la sección.
  - (a) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 2% de la porosidad total.
  - (b) Cavidades; discontinuas; 0.5 a 2 mm; 5% de la porosidad.
  - (c) Fisuras; 0.2 a 0.5 mm; 1% de la porosidad.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

Representa menos del 2% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa y fina.

- A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.
  - (a) Fragmentos de raíces; tejidos epidérmicos gruesos; rojos parduzcos; se notan paredes celulares; opacos no birrefringentes; >2 mm. En algunos fragmentos solo se ven los contornos y el poro que han desarrollado.
  - (b) Fragmentos de tallos; tejidos epidérmicos gruesos; rojos muy oscuros; opacos no birrefringentes; poco tejido parenquimático en algunos; ligera birrefringencia blanca; 0.5 a 2 mm. Preservación moderada.
- B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de fragmento de órganos y grado de preservación pobre.
  - (a) Esclerocio de hongos; irregular; contenido medular no reconocible; muy opaco y no birrefringente; 0.2 a 0.5 mm. Se encuentra inmerso entre los granos y el material fino.
  - (b) Una semilla; tejidos epidérmicos rojos parduzcos; opacos no birrefringentes; parénquima poco conservado; poco birrefringente blanco; 0.2 a 0.5 mm.
- C. Material fino amorfo.** Poco abundante; disperso entre la micromasa; negra y parda rojiza; impregnación fuerte; límites prominentes y abruptos.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 2.

- (a) Cuarzo; incoloro; subhedral; 0.5 a 2 mm y >2 mm; límite prominente y abrupto; muy común en la micromasa y en los fragmentos de roca.

- (b) Plagioclasa; incoloro; subhedral; 0.5 a 2 mm; límite prominente y abrupto; maclas distinguibles solo en XLP; presente en la micromasa recubierta y en los fragmentos de roca.
- (c) Piroxeno; incoloro; prismático; clivaje identificable en PPL; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 26:74. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica y porfídica de espacio simple.

Fábrica-b moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y algunos minerales; pardos claros amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia muy abundante; distribución relacionada quitónica.
- 2) **De excrementos.** Esféricos; rojos parduzcos; rugosos; >2 mm; abundancia baja; órgano-minerales; fuertemente coalescentes; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria. Se identifican excrementos esféricos de larva Bibionidae.
- 3) **Complejos.** Se identifica un nódulo pseudomórfico; rojizo anaranjado y pardo oscuro; de impregnación moderada; límite prominente y abrupto; impregnando un grano de cuarzo y ambos a su vez, siendo revestidos por material limoso amarillo, de forma completa.

**Número:** 17;

**Profundidad:** 67-75 cm;

**Horizonte:** 4(B<sub>w2</sub>)

#### 1. Microestructura.

La estructura es 85% apedal y 15% pedal.

A. **Tipo.** Entre la estructura apedal y los peds constituyen el 80% de la sección.

- 1) Apedal. Cavidades; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; pobremente ordenada; distribución básica aleatoria; distribución relacionada porfídica de espacio doble; 58% de la microestructura.
- 2) Pedal. Bloques subangulares pobremente desarrollados y parcialmente acomodados; rugosos; subredondeados; 0.5 a 2 mm y >2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria entre otras unidades de fábrica; distribución relacionada porfídica de espacio doble dentro de los agregados; conforman el 22% de la microestructura.

A. **Porosidad.** 31% de la sección.

- 1) **Poros inter-agregados.** Poros de empaquetamiento compuesto; >2 mm; frecuencia 28%.
- 2) **Poros intra-agregados.** Cavidades; 0.5 a 2 mm; 2% de la porosidad total.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

4% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa; distribución referida aleatoria en toda la matriz.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.

- (a) Fragmentos de madera y corteza carbonizados; son los más comunes del material orgánico grueso; negros no birrefringentes; 0.5 a 2 mm y >2 mm; se observan los poros intracelulares en algunos fragmentos, mientras que otros son más densos.
- (b) Contornos de raíces; rojos oscuros; opacos y no birrefringentes; sin tejido parenquimático; 0.2 a 0.5 mm.
- (c) Cortes de raíces; tejidos epidérmicos pardos rojizos, birrefringentes anaranjados; con tejidos parenquimáticos incompletos, birrefringentes blancos; 0.2 a 0.5 mm.

B. **Fracción fina.** No es reconocible.

C. **Material fino amorfo.** inmerso como incrustaciones e impregnaciones de la masa basal; negra y parda; impregnación fuerte en el material negro y moderada en el pardo; límites prominentes y claros.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 3.

- (a) Cuarzo; es el más común en la masa basal y los fragmentos de rocas; incoloro; subhedral y subredondeado; 0.5 a >2 mm; límite prominente y claro.
- (b) Plagioclasa; incolora; anhedral y redondeada; 0.2 a 2 mm; maclas apenas visibles en XLP; presente en la masa basal y en los fragmentos de roca. límite prominente y claro. En la masa basal aparece muy intemperizada y revestida de material fino.
- (c) Piroxeno; incoloro; prismático; clivaje identificable en PPL; 0.5 a 2mm; límite prominente y abrupto; poco intemperizado.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 22:78. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio doble. Fábrica-b indiferenciada.

#### 5. Pedorrasgos.

##### 1) Texturales.

- (a) Revestimientos limosos en los granos de arena y algunos minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia ocasional; distribución relacionada quitónica.
  - (b) Revestimiento tipo arcilloso; pardo muy claro; completo; birrefringente blanco; abundancia rara; distribución relacionada quitónica. Se encontró un solo material vegetal amorfo revestido completamente por arcilla. El material vegetal es cuasi amorfo, rojo muy pardo. El revestimiento es pardo claro en PPL, birrefringente blanco en XPL, y amarillo muy tenue con compensador, desvanecido y claro respecto al material que reviste.
- 2) **De excrementos.** Esféricos; rojos-anaranjados pardos; rugosos; 0.5 a >2 mm; abundancia baja; órgano-minerales; fuertemente coalescentes; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria. Se identifican excrementos esféricos de larva Bibionidae.

**Número:** 18;

**Profundidad:** 84-92 cm;

**Horizonte:** 5(2C)

#### 1. Microestructura.

Estructura completamente apedal.

- A. Tipo.** Cavidades; pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de los granos de arena en la matriz; distribución relacionada porfídica de espacio doble.
- B. Porosidad.** Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 5% de toda la sección.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

Representa menos del 1% de toda la sección, tomando en cuenta solo la fracción gruesa.

- A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.
  - (a) Fragmentos de raíces; tejidos epidérmicos gruesos; pardos rojizos; no birrefringentes; sin contenido parenquimático; algunos solo presentan contornos incompletos; 0.5 a >2 mm.
  - (b) Fragmentos corteza; pardos oscuros amarillentos, birrefringentes amarillos; 0.5 a 2 mm; se aprecian las fibras en LPP y XLP.
- B. Fracción fina.** No están presentes.
- C. Material fino amorfo.** Incrustaciones entre la micromasa; negros; redondeados; fuertemente impregnados; límite prominente y abrupto.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica aleatoria; pobremente ordenados y con un grado de alteración 2.

- (a) Cuarzo; subhedral y subredondeado; 0.2 y 0.5 mm y 0.5 a >2 mm; límite prominente y claro.
- (b) Biotita; subhedral; estriada; parda a parda muy oscura en pleocroísmo; 0.2 a 0.5 mm; rasgos de intemperismo; límite prominente y abrupto.

(c) Plagioclasa; incoloro; anhedral; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; intemperizada.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 30:70. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio doble. Fábrica-b indiferenciada.

5. **Pedrorrasgos.**

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en algunos granos de arena y algunos minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia rara; distribución relacionada quitónica.
- 2) **De excrementos.** Esféricos; rojos pardos; rugosos; 0.5 a >2 mm; abundancia baja; órgano-minerales; fuertemente coalescentes; envejecimiento interno denso y poroso; distribución básica aleatoria. Se identifican muy pocos excrementos esféricos de larva Bibionidae.

**Número:** 19;

**Profundidad:** 122-130 cm;

**Horizonte:** 6 (3C)

1. **Microestructura.**

Estructura completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de los granos de arena con otras unidades; distribución relacionada porfídica de espacio doble.

**B. Porosidad.** Poros Cavidad; 0.2 a 0.5 mm; 10% de la sección.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

Comprenden <1% de la sección, considerando solo la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre y contornos.

Fragmentos de tejidos de raíz; tejidos epidérmicos gruesos; rojos anaranjados; opacos y no birrefringentes; se diferencian paredes celulares; incompletos; 0.5 a >2 mm.

**B. Fracción fina.** Se identifica una unidad de endospora; esférica; roja amarillenta; poco opaca y no birrefringente; 0.05 a 0.2 mm; conservada pero no fresca.

**C. Material fino amorfo.** Incrustaciones negras en la micromasa; impregnación fuerte; 0.05 mm; límites prominentes y abruptos.

3. **Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples; distribución básica aleatoria; pobremente ordenados y con un grado de alteración 2.

(a) Cuarzo; muy abundante; subhedral y subredondeado; 0.5 a >2 mm; límite prominente y abrupto.

(b) Plagioclasa; incoloro; subhedral y angular; maclas solo distinguibles en XLP; 0.5 a >2 mm; límite prominente y claro.

(c) Anfíbol; pardo claro a muy oscuro (pleocroísmo); subhedral; clivaje marcado; algunas inclusiones; límite prominente y abrupto; poco intemperizado.

(d) Vidrio volcánico; pardo claro; isotrópico; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 30:70. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio doble. Fábrica-b indiferenciada.

5. **Pedrorrasgos.**

**Texturales.** Revestimientos limosos en pocos granos de arena; pardos; incompletos e irregulares; no birrefringentes; abundancia rara; distribución relacionada quitónica.

**Perfil 5**

**Localización:** Ejido San Miguel Tlaixpan, monte Tlálóc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:** 525918, 2148192.

**Número:** 20;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1(A<sub>h</sub>)

### 1. **Microestructura.**

La estructura es completamente pedal.

**A. Tipo.** Bloques subangulares moderadamente desarrollados y parcialmente acomodados; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enéulica; conforman el 53% del área total de la sección; de tamaño 0.5 a 2 mm; rugosos; subangulares (20%) y subredondeados (40%).

**B. Porosidad.** Conforman el 40% restante de la sección.

#### 1) **Poros inter-agregados.**

(a) Poros de empaquetamiento compuesto (25%) de tamaño 0.5 a 2 mm.

(b) Poros cámara; de 0.2 a 0.5 mm; distribución básica agrupada; forman el 5% de la porosidad.

#### 2) **Poros intra-agregados.**

Poros cavidad; 0.2 a 0.5 mm; orientación aleatoria; irregulares; forman el 10% de la porosidad total.

### 2. **Componentes básicos orgánicos.**

7% del área total de la sección, considerando la fracción gruesa y fina; distribución referida aleatoria dentro de los agregados.

(a) **Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de órganos y un grado de preservación moderado.

(b) Dominan los residuos vegetales de raíces y tallos; pardos rojizos; poco opacos y algunos birrefringentes; tejidos lignificados epidérmicos; de 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; paredes celulares completas fácilmente reconocibles.

(c) Fragmentos de raíces en cortes transversales; contornos amarillentos y rojizos; poco opacos; 0.2 a 0.5 mm; tejidos parenquimáticos amarillos birrefringentes; contenido celular reconocible.

(d) Fragmentos de hojas carbonizadas; pardas muy oscuras a negras; muy opacas y no birrefringentes; 0.05 a 0.2 mm; poros intracelulares; escasos.

**A. Fracción fina.** Representa menos del 1% de la fracción orgánica total.

(a) Compuesta de escasas endosporas; pardas rojizas; opacas y no birrefringentes; 0.05 a 0.2 mm; completas; poros celulares visibles.

(b) Esclerocios de hongos; redondos; corteza parda muy oscura; opaca y no birrefringente; 0.05 a 0.2 mm.

**B. Material fino amorfo.** Se encuentra integrado a la micromasa; presente como impregnaciones pardas muy oscuras; irregulares y aleatorias; isotrópicas.

### 3. **Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples; tienen una orientación aleatoria y distribución referida aleatoria respecto a los agregados; moderadamente ordenados, grado de alteración 1.

(a) Cuarzo. Es el mineral simple más dominante. Formas anhedrales y subhedrales; <0.05 mm; incoloro y con inclusiones comunes; límite con la micromasa prominente y abrupto.

(b) Plagioclasa. Es el segundo mineral más dominante. Formas anhedrales y subhedrales; <0.05 mm. Las maclas solo son distinguibles en luz polarizada cruzada. límite con la micromasa prominente y abrupto.

(c) Olivino. Subhedral; <0.05 mm; verde-pardo con inclusiones. límite con la micromasa prominente y abrupto.

### 4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 15:85. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

Fábrica-b indiferenciada. El material fino ocurre como agregados isotrópicos.

### 5. **Pedorrasgos.**

1) **Amorfos.** Nódulos típicos e irregulares; pardos muy rojizos; opacos; isotrópicos; <0.05 mm y 0.05 a 2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis fuerte; límite distinto y claro;

abundancia muy baja (<5%); variabilidad baja, los nódulos son similares; distribución básica y orientación aleatorias.

- 2) **De excrementos.** Presentes dentro de los agregados entre los poros cámara; hábito elipsoidal; pardos rojizos; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia baja (5-15%); órgano-minerales; grado de coalescencia moderado; envejecimiento interno denso; distribución básica agrupada y orientación aleatoria.

**Número:** 21;

**Profundidad:** 14-23 cm;

**Horizonte:** 1(A<sub>h</sub>)

### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de las arenas entre los microagregados; distribución relacionada enáulica, de los granos de arena con los microagregados y quitónica, en algunas arenas rodeadas parcialmente de material fino. 58% de la micromasa.

**B. Porosidad.** Representan el 40% de la sección. Poros cavidades irregulares inter e intra-agregados, tamaños 0.2 a 0.5 mm (30%) y 0.5 a 2 mm (10%).

### 2. Componentes básicos orgánicos.

2% del área total de la sección, considerando solo la fracción gruesa.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y un grado de preservación pobre, ya que la mayoría no es birrefringente.

(a) Dominan los fragmentos de raíces y tallos; alargados; rojos amarillentos; ligeramente opacos y no birrefringentes; tejidos con flobafenos; de 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; paredes celulares reconocibles.

(b) Fragmentos de raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos rojos amarillentos translucidos; 0.5 mm; tejidos parenquimáticos; birrefringentes; toda la estructura está bien preservada.

(c) Fragmentos de carbón; pardos muy oscuros a negros; muy opacos y no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm; poros intracelulares reconocibles.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo.** Está presente en la micromasa, como impregnaciones pardas muy oscuras; irregulares y aleatorias; isotrópicas.

### 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples; tienen una distribución referida y orientación aleatoria; tienen un grado de ordenamiento moderado y grado de alteración 2.

(a) Cuarzo. Es el mineral simple más dominante. Formas primordialmente anhedrales; 0.05 a 0.2 mm; incoloro y con algunas inclusiones; límite con la micromasa prominente y abrupto.

(b) Plagioclasa. Mineral simple igualmente dominante. Formas anhedrales y subhedrales; 0.05mm a 0.2 mm. Las maclas solo son distinguibles en luz polarizada cruzada, pero no tan conservadas; límite con la micromasa prominente y abrupto.

(c) Olivino. Escaso; hábito prismático; 0.2 mm; algunas inclusiones; birrefringencia amarilla; límite con la micromasa prominente y abrupto.

### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 25:75. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica.

Fábrica-b punteada-moteada.

### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y algunos minerales; pardos claros amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia rara; distribución relacionada quitónica.



- 2) **De excrementos.** Hábito esférico y elipsoidal; pardos oscuros y rojizos; rugosos; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; abundancia baja; órgano-mineral; grado de coalescencia moderado; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria y orientación aleatoria.

**Número:** 22;

**Profundidad:** 24-33 cm;

**Horizonte:** 2(BA)

1. **Microestructura.**

La estructura es completamente apedal

**A. Tipo.** Cavidades, pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada quitónica: los granos de arena, minerales y fragmentos de roca, son revestidos por material fino. 90% de la micromasa.

**B. Porosidad.** Representan el 8% de la sección. Poros cavidades irregulares inter e intra-agregados, 0.05 a 0.2 mm.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

<2% del área total de la sección, considerando únicamente la fracción gruesa.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y fragmentos de órganos y un grado de preservación moderado.

(a) Fragmentos de raíces completos e incompletos; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; tejidos epidérmicos rojizos; no opacos; tejido parenquimático, birrefringente y completo.

(b) Fragmentos de tejidos de raíces; rojizos muy pardos; incompletos; 0.2 a 0.5 mm; contornos no birrefringentes.

(c) Fragmentos de carbón; negros; muy opacas y no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm; poros intracelulares reconocibles.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo.** Es el material más dominante de todas las fracciones orgánicas; está impregnado en la micromasa de forma aleatoria e irregular.

3. **Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples y en fragmentos de rocas; tienen una orientación aleatoria y distribución referida aleatoria entre la masa basal; un grado de ordenamiento moderado y grado de alteración 1.

(a) Cuarzo. Es el mineral simple más común. Formas anhedrales y subhedrales angulares; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite con la micromasa prominente y abrupto.

(b) Olivino. Menos común hábito prismático bien definido; 0.2 a 0.5 mm; verde y pardo con inclusiones; límite con la micromasa prominente y abrupto.

4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 60:40. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica.

Fábrica-b punteada-moteada.

5. **Pedorrasgos.**

**Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia: abundante; distribución relacionada quitónica.

**Número:** 23;

**Profundidad:** 53-62 cm;

**Horizonte:** 3(B<sub>w1</sub>)

1. **Microestructura.**

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, moderadamente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada quitónica, de los granos gruesos cubiertos por materiales finos. 90% de la micromasa.

**B. Porosidad.** Poros de empaquetamiento complejo, dominan los menores a 0.05 mm y en menor medida los tamaños 0.2 a 2 mm. Conforman el 10% del área total de la sección.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

1% del área total de la sección.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y un grado de preservación pobre.

(a) Abundan los restos de carbón vegetal; negros; opacos y no birrefringentes; 0.5 a 2 mm.

(b) Fragmentos de tejidos de hoja y corteza; rojizos muy pardos; 0.2 a 0.5 mm; muy opacos y no birrefringentes; casi amorfos, pero se aprecian algunos poros internos.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo.** Presente como formas redondas entre la micromasa y los granos de arena; 0.05 mm.

**3. Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples y en fragmentos de rocas; tienen una orientación aleatoria y distribución referida aleatoria; un grado de ordenamiento pobre y grado de alteración 3.

(a) Cuarzo. Abundante tanto en la micromasa como en los fragmentos de roca. Formas anhedrales; 0.2 a 0.5 mm y 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y abrupto.

(b) Piroxeno. Común tanto en la micromasa como en los fragmentos de roca; hábito prismático; colores pardos claros; pleocroísmo poco perceptible; 0.05 mm; límite prominente y abrupto.

(c) Feldespato. Más presente en los fragmentos de rocas que en la micromasa. Formas anhedrales; 0.05 a 0.2 mm; muy intemperizados. Límite prominente y abrupto.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 70:30. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica y enáulica.

Fábrica-b moteada.

**5. Pedorrasgos.**

1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia muy abundante; distribución relacionada quitónica.

2) **Amorfos.** Nódulos típicos e irregulares; rojos pardos; opacos; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y claro; abundancia muy baja (<5%); variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias. Los nódulos se sobrepone al material fino.

**Número:** 24;

**Profundidad:** 94-102 cm;

**Horizonte:** 4(B<sub>w2</sub>)

**1. Microestructura.**

La estructura es completamente apedal.

**C. Tipo.** Cavidades, moderadamente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada quitónica, de los granos gruesos cubiertos por materiales finos.

**A. Porosidad.** Representa el 55% de la sección.

(a) Poros de empaquetamiento complejo tamaño 0.5 a 2 mm (20%) y 0.2 a 0.5 mm (25%).

(b) Poros cavidad (10%), tamaño 0.2 a 0.5 y 0.5 a 2 mm.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

<1% de toda la sección.

**A. Fracción gruesa.** Los residuos vegetales tienen un grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de tejidos y un grado de preservación pobre y de contornos.

(a) Los fragmentos de tejidos epidérmicos son los más comunes; alargados y rojos parduzcos desvanecidos; 0.2 a 0.5 mm; no birrefringentes; incompletos y sin contenido celular.

(b) Fragmentos de raíz en cortes transversales; de hoja y corteza; tejidos epidérmicos anaranjados y muy poco tejido parenquimático amarillo; 0.5 a 2 mm; ligeramente opacos y moderadamente birrefringentes.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo.** Presente como impregnaciones fuertes entre los granos de arena; 0.05 a 0.2 mm.

**3. Componentes básicos minerales.**

Presentes como granos minerales simples y en fragmentos de rocas; orientación aleatoria y distribución referida aleatoria respecto a los granos; mayormente subhedrales; pobremente ordenados y grado de alteración 3.

(a) Cuarzo. Abundante en la micromasa y en los fragmentos de roca. Formas anhedrales y subhedrales angulares; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto. Los minerales de la micromasa están muy disgregados.

(b) Piroxeno. Común tanto en la micromasa como en los fragmentos de roca; hábito prismático muy definido; color pardo claro; clivaje de 90° perceptible en PPL y XPL; 0.05 mm; límite prominente y abrupto. Los minerales se ven poco intemperizados.

(c) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 78:22. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica y enáulica.

Fábrica-b moteada.

**5. Pedorrasgos.**

**Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y los minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia muy abundante; distribución relacionada quitónica.

## Perfil 6

**Localización:** Ejido San Pablo Izayoc, monte Tláloc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:** 525843,2149394.

**Número:** 25;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h1</sub>)

**1. Microestructura.**

La estructura es pedal compleja.

**A. Tipo.** Constituye el 45% de toda la sección. Dos tipos de agregados:

1) Granular; moderadamente desarrollada, no acomodada; rugosa y redondeada; 0.2 a 0.5mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica; representan el 2% de los agregados.

2) Bloques subangulares; moderadamente desarrollados, no acomodados; rugosos y subredondeados; 0.5 a >2 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica y porfídica de espacio doble de la fracción gruesa dentro de los agregados; representan el 43% de los agregados.

**B. Porosidad.** 25% total de la sección.

**1) Poros inter-agregados.**

Poros de empaquetamiento compuesto; 0.5 a 2 mm; 23% de la porosidad total.

**2) Poros intra-agregados**

**a)** Canales; 0.2 a 0.5 mm; 1% de la porosidad total.

**b)** Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 1% de la porosidad total.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

30% del área total de la sección; considerando únicamente la fracción gruesa y fina; distribución referida aleatoria entre los agregados e inclinada de las raíces y agujas de pino.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos predominantemente y grado de preservación bueno.

- (a) Agujas de pino completas en secciones transversales; envueltas e individuales; tejidos epidérmicos naranjas rojizos; ligeramente opacos y no birrefringentes; centros parenquimáticos conservados; birrefringentes blancos; 0.2 a 0.5 mm; son las más dominantes.
- (b) Agujas de pino completas en pajas; rojas oscuras amarillentas; tejidos epidérmicos opacos no birrefringentes; parénquimas completos, poco birrefringentes amarillos; orientación inclinada respecto a los agregados; 0.5 a >2 mm; segundas más dominantes.
- (c) Agujas de pino cubiertas de haces vasculares; rojos muy oscuros no birrefringentes; agujas birrefringentes blancas; distribución referida concéntrica; 0.5 a 2 mm.
- (d) Tallos; meristemos completos pardos claros muy birrefringentes blancos; estomas visibles rojos oscuros y poco birrefringentes; >2 mm; orientación inclinada respecto a los demás materiales orgánicos.
- (e) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos gruesos completos; rojos pardos; opacos y poco birrefringentes anaranjados; tejidos internos completos; birrefringentes blancos; 0.5 a 2 mm.
- (f) Fragmentos de corteza; anaranjados rojizos; contornos pardos opacos; no birrefringentes; tejidos visibles y completos; >2 mm.
- (g) Fragmentos de hojas y corteza carbonizados; negros opacos no birrefringentes; poros intracelulares visibles; 0.5 a >2 mm.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y grado de preservación moderado.

Semillas de pino; irregular; contornos rojos opacos; contenido celular incompleto, birrefringente blanco; 0.05 a 0.2 mm.

**C. Material fino amorfo.** Presente como incrustaciones e impregnaciones en los agregados; negros opacos; impregnación fuerte en las incrustaciones, límites prominentes y abruptos.

### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples; distribución básica aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 2.

- (a) Cuarzo; incoloro con inclusiones; subhedral y angular; 0.05 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (b) Plagioclasa; incolora; subhedral y angular; maclas apenas distinguibles en PPL; 0.05 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; rasgos de intemperismo.

### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 4:96. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio abierto. Fábrica-b indiferenciada.

### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Amorfos.** Nódulos pseudomórficos; pardos muy opacos a negros; isotrópicos; 0.5 a 2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite desvanecido y difuso; abundancia frecuente; variabilidad baja; distribución básica aleatoria. Se observan impregnaciones dentro de los agregados, característicos de los óxidos/hidróxidos de Mn.
- 2) **De excrementos.** Hábito elipsoidal; pardos anaranjados; poco rugosos; 0.05 a 0.2 mm; abundancia frecuente; órgano-minerales; fuertemente coalescentes; envejecimiento interno poroso; distribución referida agrupada respecto a la materia orgánica. Se identifican principalmente los excrementos de ácaros.

**Número:** 26;

**Profundidad:** 0-9 cm;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h1</sub>)

### 1. Microestructura.

La estructura es pedal compleja.

**A. Tipo.** Constituye el 55% de toda la sección. Dos tipos de agregados:

- 1) Granular; moderadamente desarrollada, no acomodada; rugosa y redondeada; 0.2 a 0.5 mm; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida agrupada respecto a los bloques subangulares; distribución relacionada enáulica; representan el 3% de los agregados.
- 2) Bloques subangulares; moderadamente desarrollados, parcialmente acomodados; rugosos y subredondeados; 0.2 a 0.5 mm (15%) y 0.5 a >2 mm (37%); distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica y porfídica de espacio doble de la fracción gruesa dentro de los agregados.

**B. Porosidad.** 25% total de la sección.

**1) Poros inter-agregados.**

Poros de empaquetamiento compuesto; 0.2 a 0.5 y 0.5 a 2 mm; 21% de la porosidad total.

**2) Poros intra-agregados**

Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 4% de la porosidad total.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

20% del área total de la sección, considerando únicamente la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos y fragmentos de órganos y grado de preservación moderado.

- (a) Agujas de pino en pajas; rojas pardas amarillentas; tejidos epidérmicos opacos no birrefringentes; parénquimas completos, no birrefringentes; 0.5 a >2 mm; muy dominantes.
- (b) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos gruesos; rojos pardos; opacos y no birrefringentes; sin tejidos internos; 0.5 a 2 mm.
- (c) Agujas de pino cortes transversales; individuales; tejidos epidérmicos naranjas rojizos; poco opacos y no birrefringentes; centros parenquimáticos pequeños; poco birrefringentes blancos; 0.2 a 0.5 mm.
- (d) Fragmentos de tejidos epidérmicos; rojos pardos; opacos y no birrefringentes; 0.5 a >2 mm.
- (e) Fragmentos de hojas carbonizados; negros opacos no birrefringentes; poros intracelulares visibles; 0.5 a >2 mm.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos grado de preservación bueno.

- (a) Granos de polen; hialinos; paredes porosas; ligeramente birrefringentes en los contornos; 0.2 a 0.5 mm; muy abundantes.
- (b) Esclerocio de hongo; redondo; pardo oscuro; contenido medular incompleto; opaco y no birrefringente; 0.2 a 0.5 mm.

**C. Material fino amorfo.** Incrustaciones entre los agregados; negros opacos; impregnación fuerte, límites prominentes y abruptos.

**3. Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples; distribución básica aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 2.

- (a) Plagioclasa; incolora; subhedral y columnar; maclas distinguibles solo en XPL; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro.
- (b) Cuarzo; incoloro; subhedral y subredondeado; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (c) Piroxeno; prismático; con inclusiones; clivaje 90° distinguible; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y claro.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; isotrópico; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 7:93. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio abierto. Fábrica-b indiferenciada.

**5. Pedorrasgos.**

**1) Amorfos.**

- (a) Nódulos típicos; redondeados; rojos oscuros; opacos; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis fuerte; límite prominente y difuso; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica aleatoria.

- (b) Nódulos pseudomórficos; negros; isotrópicos; 0.5 a >2 mm; impregnación fuerte; pseudomorfosis fuerte; límite desvanecido y difuso; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica aleatoria. Se observan impregnaciones dentro de los agregados, característicos de los óxidos/hidróxidos de Mn.
- 2) **De excrementos.** Basilo-cilíndricos; pardos; rugosos; 0.05 a 0.2 mm; abundancia baja; órgano-minerales; grado de coalescencia moderado; envejecimiento interno poroso; distribución básica aleatoria. Se identifican excretas de enquitreídos en los poros de empaquetamiento compuesto, así como organismos de enquitreídos dentro de los agregados.

**Número:** 27;

**Profundidad:** 27-35 cm;

**Horizonte:** 3 (B<sub>w1</sub>)

### 1. Microestructura.

La estructura es 93% apedal y 7% pedal.

A. **Tipo.** Entre los granos de arena y los pedos constituyen el 77% de la sección.

- 1) Apedal. Cavidades; pobremente ordenado; distribución básica y orientación aleatoria; distribución referida aleatoria de los granos gruesos; distribución relacionada quitónica de los granos revestidos y porfídica de espacio simple en algunas zonas. (67% de la sección).
- 2) Pedal. Bloques subangulares; débilmente desarrollada; parcialmente acomodada; agregados subredondeados rugosos; 0.5 a >2 mm; distribución básica y orientación aleatoria; distribución relacionada porfídica de espacio simple dentro de los agregados. (10% de la sección).

B. **Porosidad.** Representa el 15% de la sección.

- (a) De empaquetamiento complejo; 0.5 a >2 mm; frecuencia 10%.
- (b) Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; frecuencia 3%.
- (c) Fisuras; 0.2 a 0.5 mm; frecuencia 1.9%.
- (d) Canales; 0.5 a 2 mm; frecuencia 0.1%.

### 2. Componentes básicos orgánicos.

8% de toda la sección, tomando en cuenta solo la fracción gruesa y fina.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento a nivel de fragmentos de órganos y grado de preservación moderado.

- (a) Fragmentos de tallos; tejidos epidérmicos gruesos; rojos pardos; opacos y no birrefringentes; mínimos tejidos internos, ligeramente birrefringentes; 0.5 a 2 mm.
- (b) Agujas de pino cubiertas de haces vasculares; estomas rojas, parénquimas birrefringentes; agujas envueltas birrefringentes blancas amarillentos; 0.5 a 2 mm.
- (c) Tejidos epidérmicos fragmentados; rojos pardos; muy opacos; no birrefringentes; las paredes celulares parecen disgregarse; 0.5 a >2 mm.
- (d) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos gruesos; negros; opacos y no birrefringentes; tejidos parenquimáticos moderadamente conservados; birrefringentes blancos; 0.5 a 2 mm.
- (e) Fragmentos de carbón; negros opacos no birrefringentes; poros intracelulares apenas visibles; 0.2 a >2 mm.

B. **Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento a nivel de órganos completos grado de preservación moderado.

Granos de polen; hialinos; paredes porosas; ligeramente birrefringentes en los contornos; 0.2 a 0.5 mm; pocos.

C. **Material fino amorfo.** Incrustaciones en la micromasa en toda la sección; negros opacos; impregnación fuerte, límites prominentes y abruptos.

### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 3.



- (a) Plagioclasa; incolora; anhedral y subredondeada; maclas distinguibles solo en XPL; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y claro; algunas están revestidas de material fino.
- (b) Cuarzo; incoloro; subhedral y anhedral; 0.05 a 0.5 mm; límite prominente y claro.
- (c) Piroxeno; subhedral; clivaje 90° distinguible; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y claro; rasgos de intemperismo.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 13:87. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica y enáulica.

Fábrica-b punteada-moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Amorfos.** Nódulos concéntricos; rojos parduzcos; opacos; isotrópicos; 0.5 a 2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.
- 2) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia abundante; distribución relacionada quitónica.

**Número:** 28;

**Profundidad:** 60-68 cm;

**Horizonte:** 4 ( $B_{w2}/B_{w1}$ )

#### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

- A. **Tipo.** Cavidades, moderadamente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de los granos de arena; distribución relacionada distribución relacionada quitónica de los granos completamente revestidos y porfídica de espacio simple en algunas zonas de la matriz.
- B. **Porosidad.** 7% del área total de la sección.
  - 1) Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 5% de la porosidad.
  - 2) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 2% de la porosidad.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

<1% de toda la sección, considerando únicamente la fracción gruesa.

- A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.
  - (a) Fragmentos de raíces; tejidos epidérmicos pardos rojizos; opacos y ligeramente birrefringentes amarillos; sin contenido parenquimático; 0.2 a 0.5 mm.
  - (b) Cortes de raíces incompletas; tejidos epidérmicos anaranjados poco opacos; parénquima incompleto; birrefringente blanca; 0.5 a 2 mm. Evidencias de excrementos al interior.
- B. **Fracción fina.** No está presente.
- C. **Material fino amorfo.** Inmerso en los poros de empaquetamiento complejo; negros opacos; impregnación fuerte, límites prominentes y abruptos.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 1.

- (a) Cuarzo; incoloro; subhedral y subredondeado; 0.2 a 2 mm; límite prominente y claro; abundantes en la micromasa y los fragmentos de rocas.
- (b) Plagioclasa; incolora; subhedral y euhedral; maclas distinguibles en PPL; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestida de material fino; comunes en la micromasa y los fragmentos de rocas; sin rasgos de intemperismo.
- (c) Piroxeno; subhedral y rectangular; clivaje 90° distinguible; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestido de material fino.

- (d) Biotita. Anhedral; pardo claro con pleocroísmo fuerte a verde oscuro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; ligeramente revestido de material fino.
- (e) Vidrio volcánico; incoloro; con inclusiones; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 40:60. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica.

Fábrica-b punteada-moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Amorfos.** Nódulos concéntricos y nucleados; redondeados; pardos claros y oscuros; poco opacos; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación débil; pseudomorfosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias. Las impregnaciones muestran características de óxidos de Fe.
- 2) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y minerales; pardos claros amarillentos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia muy abundante; distribución relacionada quitónica.

**Número:** 29;

**Profundidad:** 61-69 cm;

**Horizonte:** 4 ( $B_{w2}/B_{w1}$ ) Crotovina

#### 1. Microestructura.

La estructura es 97% apedal y 3% pedal.

A. **Tipo.** Entre los granos de arena y los pedos constituyen el 86% de la sección.

- 1) Apedal. Cavidades; pobremente ordenado; distribución básica y orientación aleatoria; distribución referida aleatoria de los granos de arena; distribución relacionada quitónica. (82% de la sección).
- 2) Pedal. Bloques subangulares; moderadamente desarrollados; no acomodados; agregados subredondeados rugosos; 0.5 a >2 mm; distribución básica y orientación aleatoria distribución relacionada porfídica de espacio simple dentro de los agregados. (4% de la sección).

B. **Porosidad.** Forma el 12% de la sección.

- 1) Poros de empaquetamiento complejo, 0.2 a 0.5 mm; frecuencia de 9%.
- 2) Cavidades; 0.5 a 2 mm; 3% de la porosidad.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

Conforman el 2% de toda la sección, considerando solo la fracción gruesa.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.

- (a) Fragmentos de hojas y corteza carbonizados; negros; muy opacos y no birrefringentes; 0.5 a 2mm; poros intracelulares apenas reconocibles.
- (b) Fragmentos de corteza; tejidos epidérmicos anaranjados rojizos; poco opacos y no birrefringentes; rugosos y fibrosos; 0.5 a >2 mm.
- (c) Tejidos epidérmicos fragmentados; rojos muy pardos; opacos y no birrefringentes; sin contenidos parenquimáticos; 0.5 a >2 mm.
- (d) Raíz en corte transversal; tejidos epidérmicos gruesos; rojos muy oscuros; opacos y no birrefringentes; tejidos parenquimáticos conservados; birrefringentes blancos; 0.5 a 2 mm. Sólo se encuentra un elemento.

B. **Fracción fina.** No está presente.

C. **Material fino amorfo.** Abundante en los poros de empaquetamiento complejo, material orgánico grueso no reconocible, redondeado e irregular; impregnación moderada; límite prominente y abrupto.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Presentes como granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica y orientación aleatorias; pobremente ordenados y con un grado de alteración 2.

- (a) Cuarzo; incoloro; subhedral y subangular; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestidos por material fino.
- (b) Plagioclasa; incolora; anhedral y subredondeadas; maclas apenas distinguibles en XPL; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestida de material fino.
- (c) Biotita; subhedral, columnar; pardo claro pardo-verdoso muy oscuro; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.
- (d) Piroxeno; subhedral muy redondeado; clivaje 90° distinguible; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestido de material fino.
- (e) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; isotrópico; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 36:64. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta y enáulica. Fábrica-b moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y minerales; pardos oscuros; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia muy abundante; distribución relacionada quitónica.
- 2) **Amorfos.** Nódulos pseudomórficos; rojos muy pardos y pardos; isotrópicos; 0.5 a 2mm; impregnación fuerte; pseudomorfosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia frecuente; variabilidad baja; distribución básica aleatoria. La forma de las impregnaciones sugiere la presencia de óxidos de Fe y Mn.

**Número:** 30;

**Profundidad:** 90-98 cm;

**Horizonte:** 5 (B<sub>w3</sub>)

#### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Grano pelicular, pobremente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de la fracción gruesa; distribución relacionada quitónica y porfídica en algunas zonas donde los granos gruesos están en una masa fina densa.

**B. Porosidad.** Conforman el 23% del área total de la sección.

(a) Poros de empaquetamiento complejo; >2 mm; 18% de la porosidad total.

(b) Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 5% de la porosidad total.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

<1% de la sección, considerando solo la fracción gruesa.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.

Fragmentos de carbón; escasos; negros; muy opacos y no birrefringentes; 0.05 a 0.2 mm; poros intracelulares apenas reconocibles.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo.** Poco en los poros de empaquetamiento complejo, negro muy opaco y pardo rojizo, redondeado e irregular; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto; revestida de material fino.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica y orientación aleatorias; pobremente ordenados y con un grado de alteración 3.

(a) Cuarzo; incoloro con inclusiones; subhedral y subangular; 0.2 a 0.5 y 0.5 a 2mm; límite prominente y abrupto; revestidos por material fino.

(b) Plagioclasa; incolora; subhedral; maclas incompletas y apenas distinguibles en XPL; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestida de material fino; muy intemperizada.

- (c) Biotita; subhedral, columnar; pardo claro pardo-verdoso muy oscuro; estrías ligeramente perceptibles; 0.05 a 0.2 mm; límite prominente y abrupto.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; isotrópico; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 46:54. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica.

Fábrica-b indiferenciada.

**5. Pedorrasgos.**

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y minerales; pardos oscuros; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia abundante; distribución relacionada quitónica.
- 2) **Amorfos.** Nódulos típicos; redondeados; pardos; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y abrupto; abundancia muy baja; variabilidad baja; distribución básica aleatoria.
- 3) **De excrementos.** Hábito elipsoidal; rojos oscuros; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia muy baja; órgano-minerales; grado de coalescencia fuerte; envejecimiento interno denso; distribución básica aleatoria.

**Número:** 31;

**Profundidad:** 110-118 cm;

**Horizonte:** 6 y 7 (B<sub>w4</sub> y C)

**1. Microestructura.**

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Grano pelicular, no ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de la fracción gruesa; distribución relacionada quitónica y gefúrica, ya que la fracción gruesa se conecta entre sí con el material fino en algunos puntos.

**B. Porosidad.** Representa el 26% del área total de la sección.

(a) Poros de empaquetamiento complejo; >2 mm; 20% de la porosidad total.

(b) Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 6% de la porosidad total.

**2. Componentes básicos orgánicos.**

**A. Fracción gruesa.** No está presente.

**B. Fracción fina.** No está presente.

**C. Material fino amorfo;** inmerso entre la micromasa; negro y muy opaco; irregular; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

**3. Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; distribución básica y orientación aleatorias; pobremente ordenados y con un grado de alteración 2.

(a) Plagioclasa; incolora; anhedral y subredondeada; maclas solo distinguibles en XPL; 0.2 a 0.5mm; límite prominente y claro; revestida de material fino.

(b) Cuarzo; incoloro; anhedral y muy irregular; 0.2 a 0.5 y 0.5 a 2 mm; límite prominente y claro; revestidos por material fino.

(c) Piroxeno; prismático; clivaje claro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto.

(d) Biotita; subhedral y subangular; color pardo claro con pleocroísmo fuerte a pardo oscuro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestida de material fino.

(e) Vidrio volcánico; pardo claro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

**4. Masa basal.**

Límite g/f de 50  $\mu$ m; relación 70:30. Patrón de distribución relacionada g/f quitónica.

Fábrica-b punteada-moteada.

**5. Pedorrasgos.**

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y los minerales; pardos; completos e irregulares; no birrefringentes; abundancia muy abundante; distribución relacionada quitónica.

- 2) **Amorfos.** Nódulos concéntricos; pardos anaranjados y rojizos; opacos; isotrópicos; 0.05 a 0.2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica aleatoria.

### Perfil 7

**Localización:** Ejido San Pablo Izayoc, monte Tláloc, Texcoco, estado de México.

**Coordenadas UTM:** 525046,2150216.

**Número:** 32;

**Profundidad:** Superficial;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h</sub>)

#### 1. Microestructura.

La estructura es completamente pedal.

A. **Tipo.** Bloques subangulares moderadamente desarrollados; no acomodados; rugosos; subredondeados y subangulares; 0.5 a 2 mm (5%) y >2 mm (25%); distribución básica y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica; representan el 30% del área total de la sección.

B. **Porosidad.** Conforman el 35% del área de la sección.

1) **Poros inter-agregados.** Poros de empaquetamiento compuesto; >2 mm; 28% de la sección.

2) **Poros intra-agregados.** Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 7% de la sección.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

25% de toda la sección; considerando solo la fracción gruesa y fina; distribución referida aleatoria entre los agregados e inclinada de las raíces y tallos.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de órganos y grado de preservación bueno.

(a) Hojas de coníferas longitudinales; entre los poros y dentro de los agregados; anaranjadas pardas; parénquimas completos; ligeramente birrefringentes; 0.5 a >2 mm; distribución referida inclinada respecto a los agregados.

(b) Fragmentos de hojas de coníferas; entre los poros; negros, opacos y no birrefringentes; parénquimas incompletos; no birrefringentes; 0.5 a >2 mm.

(c) Fragmentos de tallos; tejidos epidérmicos pardos rojizos; paredes celulares evidentes; poco contenido parenquimático; birrefringente blanco; 0.5 a 2 mm.

(d) Raíces de secciones transversales; tejidos epidérmicos pardos muy oscuros; muy opacos; tejido parenquimático pardo; birrefringente naranja; 0.2 a 0.5 mm.

(e) Fragmentos de hojas; contornos pardos suaves; tejidos parenquimáticos disgregados, no birrefringentes; 2 mm.

B. **Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación moderado.

Granos de polen; paredes celulares muy gruesas; pardas rojizas; citoplasma birrefringente blanco; 0.2 a 0.5 mm; escasos.

C. **Material fino amorfo.** Escasas incrustaciones en los agregados; negras; irregulares; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

#### 3. Componentes básicos minerales.

No son perceptibles al máximo objetivo.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 2:98. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.

Fábrica-b indiferenciada.

#### 5. Pedorrasgos.

1) **Amorfos.** Nódulos pseudomórficos; pardos muy oscuros; opacos; isotrópicos; 0.5 a 2 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia

frecuente; variabilidad baja; distribución básica aleatoria. Las impregnaciones en estos rasgos son características de los óxidos/hidróxidos de Mn.

- 2) **De excrementos.** Esféricos; rojos anaranjados; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia muy baja; orgánicos; grado de coalescencia débil; envejecimiento interno muy poroso; distribución básica agrupada dentro del material vegetal.

**Número:** 33;

**Profundidad:** 0-8 cm;

**Horizonte:** 1 (A<sub>h</sub>)

### 1. **Microestructura.**

La estructura es completamente pedal.

- A. **Tipo.** Bloques subangulares moderada a fuertemente desarrollados; no acomodados; rugosos; subredondeados; 0.5 a 2 mm (20%) y >2 mm (35%); distribución básica y referida y orientación aleatorias; distribución relacionada enáulica y porfídica abierta de la fracción gruesa dentro de los agregados; representan el 55% del área total de la sección.

- B. **Porosidad.** Conforman el 32% del área de la sección.

#### 1) **Poros inter-agregados.**

- (a) Poros de empaquetamiento compuesto; 0.5 a 2 mm; 22% de la porosidad.

- (b) Cámaras; 0.2 a 0.5 mm; 6% de la porosidad.

- (c) Canales; 0.05 a 0.2 mm; 2% de la porosidad.

#### 2) **Poros intra-agregados.**

Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 2% de los poros.

### 2. **Componentes básicos orgánicos.**

13% de la sección, tomando en cuenta solo la fracción gruesa y fina.

- A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de órganos y grado de preservación moderado.

- (a) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos pardos rojizos muy opacos; tejido parenquimático completo amarillento; birrefringente naranja; 0.5 a <2 mm.

- (b) Hojas de coníferas longitudinales; entre los poros y dentro de los agregados; pardas rojizas; parénquimas incompletos; birrefringencia puntual; 0.5 a >2 mm.

- (c) Fragmentos de corteza; pardas rojizas; poros intracelulares visibles; no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

- (d) Fragmentos de tejidos epidérmicos; pardos rojizos; tejidos no reconocibles; no birrefringente; 0.2 a 0.5 mm.

- B. **Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación bueno.

Granos de polen; paredes celulares amarillas difusas; núcleos y citoplasma muy birrefringentes blancos; 0.2 a 0.5 mm.

- C. **Material fino amorfo.** Se encuentra inmerso dentro de los bloques subangulares; negros muy opacos; irregulares; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

### 3. **Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y grado de alteración 2.

- (a) Plagioclasa; incolora; subhedral; maclas distinguibles en XPL; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro.

- (b) Cuarzo; incoloro; subhedral; muy redondeado; 0.2 a 0.5 y 0.5 a 2 mm; límite prominente y abrupto.

- (c) Piroxeno; prismático; clivaje distinguishible; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; límite prominente y abrupto; algunos revestidos de material fino.

### 4. **Masa basal.**

Límite g/f de 50 µm; relación 6:94. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica abierta.



Fábrica-b punteada-moteada.

5. **Pedorrasgos.**

- 1) **Amorfos.** Nódulos pseudomórficos; pardos muy oscuros; opacos; isotrópicos; 0.5 a 2mm; impregnación moderada; pseudomorfofosis moderada; límite distinto y difuso; abundancia frecuente; variabilidad baja; distribución básica aleatoria. Las impregnaciones en estos rasgos son características de los óxidos/hidróxidos de Mn.
- 2) **De excrementos.** Esféricos; negros y pardos rojizos; rugosos; 0.2 a 0.5 mm; abundancia frecuente; órgano-minerales; grado de coalescencia moderado; envejecimiento interno poroso y denso; distribución básica agrupada dentro del material orgánico. Se identifican incluso organismos de enquitréidos.

**Número:** 34;

**Profundidad:** 18-26 cm;

**Horizonte:** 2 (B<sub>w1</sub>)

1. **Microestructura.**

La estructura es 91% apedal y 9% pedal.

A. **Tipo.** Entre los granos de arena y los peds constituyen el 80% de la sección.

- 1) Apedal. Cavidades; moderadamente ordenado; distribución básica y orientación aleatoria; distribución referida aleatoria de la fracción gruesa con la micromasa; distribución relacionada porfídica de espacio simple. (71% de la sección).
- 2) Pedal. Bloques subangulares; moderadamente desarrollados; parcialmente acomodados; rugosos; redondeados de 0.5 a 2 mm (8%) y subredondeados >2 mm (1%); distribución básica y orientación aleatoria; distribución relacionada porfídica de espacio simple dentro de los agregados. (9% de la sección).

B. **Porosidad.** 19% del área total de la sección.

1) **Poros inter-agregados y en la micromasa.**

- (a) Poros de empaquetamiento complejo; 0.5 a 2 mm; frecuencia 10%.
- (b) Fisuras; 0.05 a 0.2 mm; frecuencia de 2%.
- (c) Cámara; 0.2 a 0.5 mm; 1% de la porosidad.

2) **Poros intra-agregados**

Cavidades; 0.2 a 0.5 mm; 6% de la porosidad.

2. **Componentes básicos orgánicos.**

1% del área total de la sección, considerando únicamente la fracción gruesa.

A. **Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación moderado.

- (a) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos pardos muy rojizos gruesos; poco opacos; tejido parenquimático casi completo; Birrefringente amarillo; 0.2 a 0.5 mm.
- (b) Fragmentos de carbón; irregulares; negros; se observan algunos poros intracelulares; revestidos de material fino; 0.2 a 0.5 mm.
- (c) Fragmentos de tejido epidérmico; rojo oscuro; opaco; no Birrefringente; disgregado; se notan las divisiones de las paredes celulares; 0.05 a 0.2 mm.

B. **Fracción fina.** No está presente.

C. **Material fino amorfo.** Se encuentra incrustado entre la micromasa; negros muy opacos; irregulares y redondeados; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

3. **Componentes básicos minerales.**

Granos minerales simples; distribución básica y orientación aleatorias; moderadamente ordenados y grado de alteración 2.

- (a) Plagioclasa; incolora; subhedral, subredondeadas; maclas visibles en XPL; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; revestidas por material limoso.
- (b) Cuarzo; incoloro; anhedral; redondeados y alargados; 0.2 a 2 mm; límite prominente y claro; revestidos por material limoso.

- (c) Piroxeno; prismático; pardo claro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; revestido de material fino.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; isotrópico; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 12:88. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio doble. Fábrica-b moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

##### 1) Texturales.

- (a) Revestimientos limosos en algunos granos de arena; pardos; completos e irregulares; no Birrefringentes; abundancia ocasional; distribución relacionada quitónica.
- (b) Hiporevestimientos en la micromasa; pardos rojizos ocre; opacos; no Birrefringentes; 0.5 a <2 mm; impregnación moderada; abundancia rara; distribución relacionada porfídica de espacio simple. El pedorrasgo dentro de la masa basal, indica oxidación interna del Fe.

**Número:** 35;

**Profundidad:** 43-51 cm;

**Horizonte:** 3 (B<sub>w2</sub>)

#### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, moderadamente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de la fracción gruesa entre la fina; distribución relacionada porfídica de espacio simple y quitónica.

**B. Porosidad.** Representa el 13% de la sección.

- (a) Poros de empaquetamiento complejo; 0.2 a 0.5 mm; 8% de la porosidad.
- (b) Fisuras; 0.05 a 0.2 mm; 3% de la porosidad total.
- (c) Canales; 0.5 a 2 mm; 2% de la porosidad.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

<0.5% del área total de la sección, tomando en cuenta solo la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación moderado.

- (a) Raíces en secciones transversales; tejidos epidérmicos naranjas rojizos; paredes celulares muy visibles; tejido parenquimático poco Birrefringente blanco; 0.2 a 0.5 mm.
- (b) Fragmentos de carbón; negros; muy opacos; se observan poros intracelulares; 0.2 a 0.5 mm.
- (c) Fragmentos de tejido epidérmico; rojos anaranjados; poco opaco; no Birrefringentes; disgregado; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación moderado.

Se observa una sola estructura redondeada tipo espora; ligeramente Birrefringente amarilla; 0.05 a 0.2 mm.

**C. Material fino amorfo.** Se encuentra entre la micromasa; negro muy opaco; redondeado y puntual; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples y en fragmentos de rocas; orientación aleatoria; pobremente ordenados y con un grado de alteración 3.

- (a) Cuarzo; incoloro y con inclusiones; subhedral; 0.2 a 0.5 mm y 0.5 a 2 mm; límite prominente y claro; revestidos por material limoso; evidencias de intemperismo.
- (b) Plagioclasa; incolora; subhedral, rectangular; maclas visibles solo en XPL; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y claro; revestidas irregularmente por material limoso.
- (c) Piroxeno; prismático; incoloro; 0.2 a 0.5 mm; límite prominente y abrupto; revestido de material fino; evidencias de intemperismo.
- (d) Vidrio volcánico; incoloro; subhedral; 0.2 a 0.5 mm.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 20:80. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio simple y quitónica.

Fábrica-b moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena y los minerales; pardos amarillentos; completos e irregulares; no Birrefringentes; abundancia: abundante; distribución relacionada quitónica.

**Número:** 36;

**Profundidad:** 93-100 cm;

**Horizonte:** 5 (3C)

#### 1. Microestructura.

La estructura es completamente apedal.

**A. Tipo.** Cavidades, moderadamente ordenada; distribución básica y orientación aleatorias; distribución referida aleatoria de la fracción gruesa en la matriz; distribución relacionada porfídica de espacio simple.

**B. Porosidad.** Cavidades; 0.5 a 2 mm; 30% de la sección.

#### 2. Componentes básicos orgánicos.

<0.1% del área de la sección, entre la fracción gruesa y fina.

**A. Fracción gruesa.** Grado de desmenuzamiento de fragmentos de tejidos y grado de preservación pobre.

(a) Raíces en cortes transversales; tejidos epidérmicos gruesos; rojizos; tejido parenquimático incompleto; poco Birrefringente amarillento; 0.2 a 0.5 mm.

(b) Fragmentos de raíces; solo tejidos epidérmicos; pardos rojizos; opacos y no birrefringentes; 0.5 a 2 mm.

(c) Fragmentos de carbón; negros; muy opacos; poros intracelulares apenas visibles; 0.2 a 0.5 mm.

(d) Fragmentos de tejido epidérmico de raíces; pardos rojizos; opacos; no birrefringentes; 0.2 a 0.5 mm.

**B. Fracción fina.** Grado de desmenuzamiento de órganos completos y grado de preservación moderada.

Se observa un solo endosporo; poroso; esporas rojizas; no birrefringentes y poco opacas; 0.05 a 0.2 mm.

**C. Material fino amorfo.** Incrustaciones en la micromasa; negras muy opacas; redondeadas e irregulares; impregnación fuerte; límite prominente y abrupto.

#### 3. Componentes básicos minerales.

Granos minerales simples; orientación aleatoria; moderadamente ordenados y con un grado de alteración 2.

(a) Cuarzo; incoloro; con inclusiones; subhedral; subangular y subredondeado; diferentes tamaños: 0.05 a 0.2 mm hasta 2 mm; límite prominente y claro; revestidos por material limoso; evidencias de intemperismo.

(b) Plagioclasa; incolora; subhedral, redondeada; maclas apenas visibles en XPL; 0.05 a 0.2 mm y 0.2 a 0.5mm; límite prominente y claro; revestidas por material limoso; evidencias de intemperismo.

(c) Biotita; alargada estriada; verde claro a verde oscuro (fuerte intemperismo); 0.2 a 0.5 mm.

#### 4. Masa basal.

Límite g/f de 50 µm; relación 55:45. Patrón de distribución relacionada g/f porfídica de espacio simple.

Fábrica-b moteada.

#### 5. Pedorrasgos.

- 1) **Texturales.** Revestimientos limosos en los granos de arena; pardos; completos; no Birrefringentes; abundancia media; distribución relacionada quitónica.
- 2) **Amorfos.** Nódulos típicos; redondeados; pardos oscuros y rojizos; isotrópicos; 0.2 a 0.5 mm; impregnación moderada; pseudomorfosis fuerte; límite prominente y claro; abundancia baja; variabilidad baja; distribución básica y orientación aleatorias.