

Petrografía y distribución de óxidos de Fe, Al y Si en fragipanes blancos de origen volcánico

Petrography and distribution of Fe, Al and Si oxides in white fragipans of volcanic origin

Otilio Acevedo-Sandoval*, Judith Prieto Méndez*, Gilberto Vela-Correa**, Erique Ortiz-Hernández***, Francisco Prieto-García****

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar la petrografía y distribución de óxidos de hierro (Fe), aluminio (Al) y silicio (Si) en tres perfiles de suelos de origen volcánico con horizontes endurecidos (fragipán), situados en la región noroeste del Estado de México. En el proceso analítico se utilizaron técnicas químicas selectivas para extraer Fe, Al y Si. El fragipán blanco se clasifica petrográficamente como una toba dacítica poco soldada y alterada. Los perfiles muestran de un incipiente a un moderado grado de alteración de minerales primarios que contienen Fe y Al, dadas las condiciones climáticas de la región. Los componentes alofano (<1,45 %), ferrihidrita (<0,37 %) y óxidos de hierro cristalino (<0,46 %) se presentan en una baja concentración. Escasos contenidos de Al_d (<0,11 %) y Si lábil (<0,08 %) en los perfiles indican presencia de aluminosilicatos cristalinos. Bajas relaciones de Al_p/Al_o (0,03-0,65) y Fe_p/Fe_o (0,06-3,00) son evidencia de que la mayor parte del Al y Fe están unidos a compuestos inorgánicos pobremente cristalinos. Relaciones bajas de Fe_p/Fe_d (0,08-4,50) y Al_p/Al_d (0,03-0,65) indican una limitada asociación de Fe y Al con compuestos orgánicos. La relación arcilla/ Fe_d (29,3-1 803,5) revela la emigración de arcilla y óxidos de Fe del horizonte superior al fragipán. El Si, Al y Fe en el fragipán forman parte de la estructura de los silicatos e indican un mínimo grado de cristalinidad de Fe y Al pedogenético. Valores relativamente altos (0,35-0,85) de la relación $Si_d/(Si_d+Al_d)$ en el fragipán indican aumento en la dureza.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the petrology and distribution of oxides of iron (Fe), aluminum (Al) and silicon (Si) in three soil profiles of hardened volcanic horizons (fragipán) in the northwest of the State of Mexico. In the analytical process, selective chemical techniques were used to remove Fe, Al and Si. Fragipán is petrographically classified as a white dacitic and welded little altered tuff. Allophane (<1,45 %), ferrihydrite (<0,37 %) and crystalline iron oxides components are present in low concentration. Low contents of Al_d (<0,11 %) and labile Si (<0,08 %) in the profiles indicate the presence of crystalline aluminosilicates. Low Al_p/Al_o (0,03-0,65) and Fe_p/Fe_o (0,06-3,00) (0,08-4,50) ratios are evidence that most of Al and Fe are bound to poorly crystalline inorganic compounds. Low Fe_p/Fe_d (0,08-4,50) and Al_p/Al_d (0,03-0,65) ratios indicate a limited association of Fe and Al with organic compounds. Observed Clay/ Fe_d (29,3-1 803,5) ratio reveals a migration of clay and Fe oxides above the fragipán horizon. Si, Al and Fe in the fragipán are included in the silicate structure, being that indicative of a minimum crystallinity degree of Fe and Al pedogenetic. Relatively high (0,35-0,85) ratios of $Si_d/(Si_d+Al_d)$ in fragipán indicate an increase in the hardness.

Recibido: 26 de enero de 2012

Aceptado: 3 de julio de 2012

Palabras clave:

Fragipanes; alofano; ferrihidritas; aluminosilicatos; toba dacítica.

Keywords:

Fragipanes; allophane; ferrihydrite; aluminosilicates; dacitic tuff.

INTRODUCCIÓN

Los tepetates tipo fragipán son horizontes duros de origen volcánico que reciben esta denominación por presentar características similares a las de los fragipanes [1]. Éstos se presentan en varias regiones de México -especialmente en la Mesa Central-, donde tuvo lugar la mayoría de las emisiones volcánicas piroclásticas durante el período Oligoceno-Mioceno [2]. Los

*Instituto de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Km 4,5, Carretera Pachuca-Tulancingo, C. P. 42184, Hidalgo, México. Correo electrónico: acevedo@uaeh.edu.mx

**Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Hacienda Xalpa n. 1100, Coyoacán, C. P. 4960, Distrito Federal, México. Tel. 01 55 5483 7000.

***Área académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Km 4,5, Carretera Pachuca-Tulancingo, C. P. 42184, Hidalgo, México.

****Área académica de Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Km 4,5, Carretera Pachuca-Tulancingo, C. P. 42184, Hidalgo, México. Correo electrónico: prietog@uaeh.edu.mx

fragipanes constituyen una limitante en el desarrollo de las plantas (al limitar la penetración de las raíces) y en el uso del suelo; dichos horizontes reducen el paso del agua al subsuelo y provocan el drenaje lateral, que conlleva la pérdida de componentes minerales del suelo y la erosión del mismo [3-5]. El fragipán es un horizonte subsuperficial franco con bajo contenido de materia orgánica (<3,5), con densidad aparente más alta que los horizontes suprayacentes, que parece cementado cuando está seco (pero friable y/o plástico después de humedecerlo), de estructura poliédrica muy gruesa y de consistencia frágil. Un fragipán típicamente tiene características redoximórficas [6-8]: se forma a partir de materiales de origen volcánico que experimentan procesos diagenéticos y pedogenéticos muy específicos (carbonatos secundarios) [3].

El origen de estas capas endurecidas es muy discutido en la actualidad [9-15], planteándose varias hipótesis: (a) el endurecimiento de materiales piroclásticos al momento de su depósito (volcanogénico); (b) procesos pedológicos con aporte de agentes cementantes, tales como la sílice, que favorecen la cementación y dureza de horizontes subsuperficiales; (c) la combinación de ambos procesos aumenta la dureza del material. Diversos factores contribuyen al endurecimiento de horizontes: la compactación mecánica [16], el depósito de geles de silicio y aluminio (producto de la disolución de minerales primarios como feldespatos, o de materiales que presentan un pseudo-ordenamiento estructural como el vidrio volcánico [17, 18]), oxihidróxidos de hierro y aluminio, así como la materia orgánica y óxidos de manganeso [19].

Los procesos de formación de los horizontes endurecidos son de gran importancia, ya que permiten establecer los patrones o los modelos que siguen los agentes cementantes en el endurecimiento de éstos. Karathanasis [20] menciona que los agentes de unión en el fragipán son fases precipitadas de aluminosilicatos amorfos sobre la superficie de partículas de minerales desde una solución sobresaturada; esta composición depende de la disolución del Al y el Si que es controlado por el pH de la solución. Los horizontes endurecidos están constituidos principalmente por materiales pirogénicos: vidrio volcánico, cuarzo, piroxeno, micas, plagioclasas, feldespatos alcalinos y óxidos de hierro, además de minerales autigénicos como la halosita, la caolinita, la monmorillonita, el alofano, los óxidos hidratados de hierro y los sesquióxidos de aluminio y silicio [1, 10, 12, 21].

Acevedo-Sandoval y colaboradores [13] concluyen que la solubilidad de los óxidos de Fe, Al y Si varía en las capas endurecidas como consecuencia de procesos

de origen edáfico. Duncan y Franzmeier [15] indican que valores mayores de 0,5 de la relación $Si_d / (Si_d + Al_d)$ son indicadores de la dureza de los horizontes. El presente estudio tiene como objetivo determinar la petrografía y la distribución de óxidos de Fe, Al y Si en tres perfiles de suelos de origen volcánico correspondientes a la región noroeste del Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y caracterización del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio Nicolás Romero, Estado de México, entre los 19° 33' y 19° 45' de latitud N y 99° 10' y 99° 23' de longitud O, a una altura promedio de 2 400 m s. n. m. (figura 1). Esta zona se ubica dentro de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana del Cenozoico, la cual se ha desarrollado en un ambiente geotectónico de arco continental [1, 5-7] (aunque esto es un tema de debate y discusión en la actualidad [7]).

Los perfiles estudiados se ubican en la Formación Tarango (Plioceno-Pleistoceno), la cual está constituida por depósitos de cenizas volcánicas, pómez, lavas y tobas de naturaleza dacítica [22, 23]. Geomorfológicamente, la zona se caracteriza por lomeríos con pendientes convexas que varían entre 6° y 20°. Los suelos muestran cierto grado de erosión, principalmente en aquellas zonas sujetas a actividad antropogénica. El uso actual es de pastizales, aunque la mayoría de ellos se encuentran abandonados. El clima en la región es de tipo Cb(w0)(w)(i), el cual se define como templado, siendo el más seco de los de tipo subhúmedo. Se caracteriza por un régimen de lluvias de verano, con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5 % del total anual y una pequeña oscilación termal (con una precipitación anual de 620,6 mm y una temperatura media anual de 15,7 °C) [24].

La selección de los sitios de muestreo se realizó a partir de un estudio previo de fotointerpretación. Se utilizaron fotografías aéreas verticales, pancromáticas, blanco y negro, escala 1:75 000 y 1:30 000 y material cartográfico de apoyo [25]. Los sitios se localizan al norte del municipio de Nicolás Romero, Estado de México (figuras 2, 3 y 4). Esta fase se complementó con recorridos por la zona. Se seleccionaron tres perfiles tipo que se caracterizaron por presentar una capa endurecida, subsuperficial de color blanco (2.5Y8/0) a gris rosado (7.5Y7/2). Los perfiles de suelo se clasificaron como Vitrandic udorthents (perfil 1 y 3) y Lithic ustorthents (perfil 2) [12, 26], incluidos en el grupo de los Entisoles (que son suelos jóvenes sin desarrollo del perfil). Al no incluir este orden horizontes de diagnóstico, el perfil AC es el más característico del orden [26].

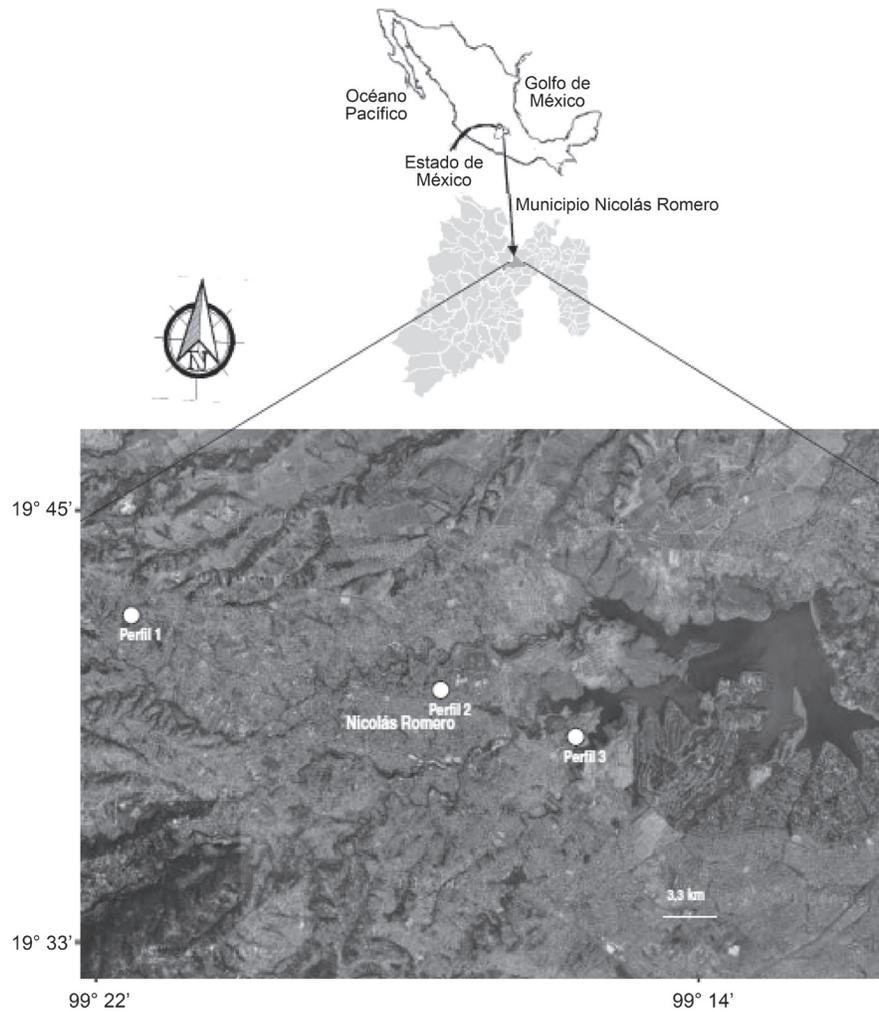


Figura 1. Ubicación de los tres perfiles estudiados en el municipio de Nicolás Romero, Estado de México (vista aérea tomada a 145 km de altura). Escala 1 cm = 3,3 km.

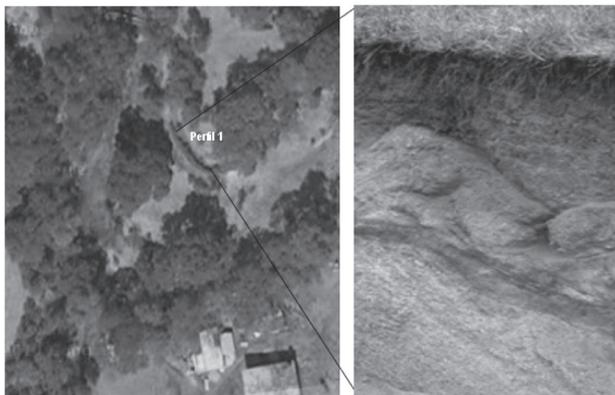


Figura 2. Perfil 1, Vitrandic Udorthents: sitio conocido como "La Y griega", próximo a colonia Morelos (vista aérea tomada a 2 850 m altura); 19° 38' 05" N y 99° 21' 41" O.



Figura 3. Perfil 2, Lithic ustorthens: cerca de Avenida de la Constitución, próximo a la colonia Guadalupe (vista aérea tomada a 2 900 m de altura); 19° 37' 24" N y 99° 18' 48" O.

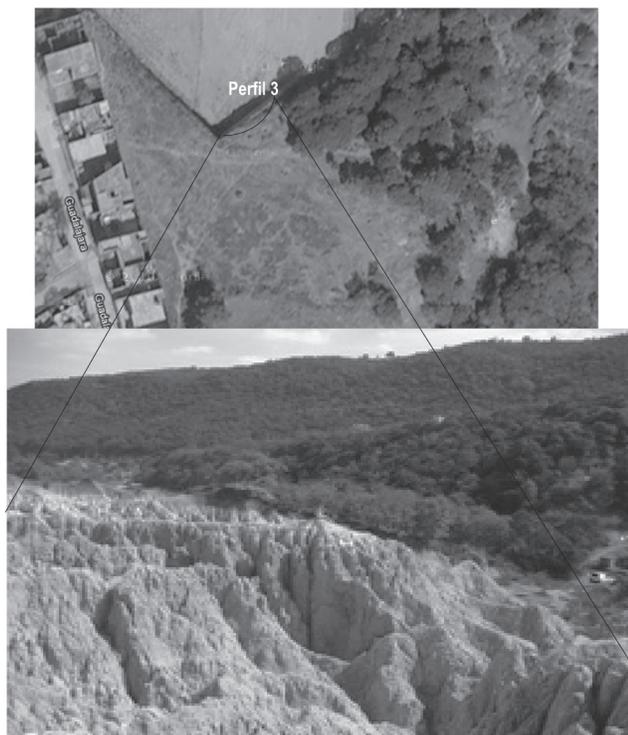


Figura 4. Perfil 3, Vitrandic Udorthents: próximo a Loma de la Cruz (vista aérea tomada a 2 900 m de altura); 19° 36' 52" N y 99° 16' 39" O.

Propiedades físicas y químicas de suelos

Se tomaron muestras de cada horizonte y capa endurecida identificada en campo. Las muestras se secaron al aire, a la sombra y se tamizaron (malla 10). Las variables analizadas fueron: densidad aparente, densidad real, porcentaje del espacio poroso total, distribución del tamaño de partículas por el método de la pipeta, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico total, cationes intercambiables, nitrógeno total y fósforo disponible [27]. Las determinaciones físicas y químicas se realizaron siguiendo los procedimientos recomendados en la literatura [28-30].

La extracción química selectiva de Fe, Al y Si para determinar la naturaleza de los materiales de rango corto (activos) y cristalinos (libres) se realizó con los siguientes métodos: extracción de Fe, Al y Si lábil (llevado a cabo con ditionito-citrato-bicarbonato, Fe_d , Al_d , y Si_d) [30], extracción de óxidos amorfos y óxidos hidratados (que se efectuó con oxalato ácido de amonio, Fe_o , Al_o y Si_o) [31] y extracción de Fe y Al presente en complejos orgánicos (hecho con pirofosfato de sodio, Fe_p y Al_p) [30]. Los análisis antes mencionados se realizaron por triplicado. El contenido de alofano fue estimado aplicando la fórmula $(Al_o - Al_p)/Si_o$ [33]. El análisis químico total de Fe, Al y Si se efectuó me-

dante fusión alcalina de muestras de suelo (0,2 g) a 950 °C, empleando 0,7 g de metaborato de litio como fundente. El fundido se disolvió posteriormente en ácido nítrico concentrado [34]. El Fe, Al y Si presentes en las respectivas soluciones se determinaron por espectrometría de emisión en Plasma de Inducción Acoplada (ICP, por sus siglas en inglés) marca Perkin Elmer 3000, modelo Lamda 2S. Por otra parte, se colectaron muestras inalteradas de la capa endurecida y se procedió a la preparación de láminas delgadas [35] para su descripción petrográfica.

Parámetros elementales

Durante el presente estudio se consideraron los siguientes parámetros elementales para caracterizar el proceso de formación de los fragipanes: (a) una relación $Al_p/Al_o > 0,6$ es representativa de aluminio que forma parte de compuestos cristalinos; (b) una relación $Al_p/Al_o < 0,6$ indica aluminio asociado a compuestos inorgánicos amorfos; (c) la relación Al_p/Al_d representa un índice de asociación del Al con la materia orgánica; (d) la relación $Al_o - Al_p$ es representativa del contenido de Al no cristalino inorgánico; (e) la relación $(Al_o - Al_p)/Si_o$ es un indicador del contenido de alofano [33]; (f) el parámetro $Fe_o \cdot 1,7$ es un indicador de óxidos amorfos de hierro [35]; (g) los parámetros $Fe_d - Fe_o$ son representativos de los óxidos cristalinos de hierro (goetita, hematita); (h) los parámetros $Fe_t - Fe_d$ son indicadores de los óxidos de hierro cristalinos; (i) la relación $Si_d/(Si_d + Al_d)$ es un indicador de dureza en horizontes [16]; (j) la relación Arcilla/ Fe_d es representativa de la migración de arcillas de los horizontes superiores a inferiores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Petrografía y patrón de alteración de minerales

La descripción petrográfica general de las capas endurecidas indica una textura porfirítica que incluye un 15 % de los siguientes constituyentes: (a) fragmentos subangulosos de cristales de plagioclasa zonada (oligoclasa-andesina) con exsoluciones vermiformes de clorita; (b) fragmentos subangulosos y cristales subedrales de feldespato potásico (sanidino) con inclusiones aciculares de apatito -algunos de ellos con bordes de clorita o albita-; (c) cristales prismáticos subedrales y fragmentos subangulares de clinopiroxeno (diópsido) -generalmente sin alteración, aunque algunos cristales están reemplazados por actinolita acicular y magnetita y otros por hidromica-; (d) fragmentos subredondeados de toba vítrea soldada con fragmentos de vidrio deformados y aplastados (tipo *flame*) y fragmentos de pumicitas con alteración parcial del vidrio a sericita -algunos de ellos mostrando intensa oxidación.

El agregado contiene además fragmentos subredondeados de rocas con textura hialoofítica formadas de fenocristales subedrales de plagioclasa, sanidina, clinopiroxeno y magnetita embebidos en una matriz vítrea. Otros fragmentos subangulares son de rocas microlíticas y microlíticas porfídicas formadas de plagioclasas, sanidina y vidrio volcánico intersticial. Se presentan también cristales anedrales de cuarzo, cristales tabulares de biotita alterada a clorita y cristales de magnetita de grano fino que ocurre en diseminaciones. Los fragmentos de cristales y roca están incluidos en una matriz vítrea silícica desvitrificada poco soldada, alterada parcialmente a clorita, albita, cuarzo microcristalino y minerales arcillosos, producto de la disolución, hidrólisis y oxidación del vidrio volcánico [36]. El protolito de la capa endurecida se clasifica petrográficamente como una toba dacítica poco soldada y alterada.

Análisis de las variables físicas y químicas

Los tres perfiles de suelo presentan un epipedon ócrico de textura franco arcillo arenosa (perfiles 1 y 3) y arcillosa (perfil 2). Subyaciendo a este horizonte, se encuentra un horizonte Cx de textura franco arenosa en los perfiles 2 y 3, mientras que en el perfil 1 existe una franco arcillosa. La densidad aparente de los horizontes y capas endurecidas de los perfiles estudiados varían de 0,99 Mg/m³ a 1,91 Mg/m³; las capas endurecidas de los perfiles 1 y 3 muestran densi-

dades aparentes de 1,17 Mg/m³ o menores debido a la cantidad de pómez vesicular que se encuentra en abundancia y distribuido a través de la toba. El perfil 2, a profundidades mayores de 43 cm, presenta densidades aparentes mayores de 1,58; esta situación se atribuye a un proceso de consolidación y compactación de los minerales por presiones mecánicas [16] o cementación química [38]. Payton [39] concluye que la densidad aparente alta en fragipanes del noroeste de Inglaterra se debe al relleno de los poros por limos y arcillas iluviadas. No obstante, Constantini y Damiani [40] señalan que la densidad aparente de los fragipanes no está relacionada con el contenido de minerales arcillosos. La densidad real de todos los perfiles se considera congruente con la naturaleza del material parental y puede indicar, por sus valores (tabla 1), predominio de minerales ligeros (lo cual manifestaría la presencia de haloisita y otros minerales ricos en sílice) [12]. Los tres perfiles bajo estudio se caracterizan por su tendencia a la alcalinización con la profundidad, debido a procesos geológicos o pedológicos (o ambos). Los contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo son bajos en todos los horizontes [41, 42]. El complejo de intercambio está dominado por calcio y magnesio, mientras que la capacidad de intercambio catiónico resulta de media a muy alta. Este incremento se debe a la presencia de sílice en forma de gel o como protoópalo [43, 44].

Tabla 1.
Propiedades físicas y químicas de los perfiles estudiados.

Horiz.	Prof. cm	Densidad Mg/m ³		Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH (1:2,5)	Mat. org. (%)	CIC cmol+kg ⁻¹	Bases intercambiables cmol+kg ⁻¹				N %	P disp. ppm
		Apar.	Real							Na	K	Ca	Mg		
Perfil 1 Vitrandic Udorthents															
A ₁₁	0-20	1,91	2,35	28,63	18,11	53,26	7,40	1,66	17,3	9,00	0,14	9,00	9,00	0,13	0,10
A ₁₂	20-32	1,65	2,18	30,30	29,28	40,42	7,50	0,49	21,8	11,50	0,15	7,00	11,50	0,10	0,05
AC	32-50	1,25	1,75	23,36	27,40	49,24	8,30	0,28	28,9	19,50	0,24	19,50	19,50	0,03	0,05
C _x	50-100	1,17	1,91	36,07	40,58	23,35	9,00	0,14	61,9	20,50	0,19	4,50	20,50	0,01	0,05
Perfil 2 Lithic Ustorthens															
A ₁₁	0-17	1,14	2,25	34,30	25,07	40,63	7,40	3,19	30,8	0,20	1,28	27,50	2,00	0,25	0,05
A ₁₂	17-31	1,66	2,13	29,64	16,74	53,62	8,20	2,77	22,9	0,20	0,07	36,00	1,00	0,21	0,05
AC	31-43	1,83	1,90	24,79	31,50	43,71	8,20	1,94	29,8	0,22	0,44	32,50	2,00	0,08	0,05
C _x	43-133	1,58	2,11	8,03	33,39	58,58	8,20	0,14	22,1	0,35	0,96	21,00	9,50	0,01	0,05
Perfil 3 Vitrandic Udorthents															
A ₁₁	0-8	1,03	2,06	24,29	28,27	47,44	7,40	2,85	19,5	0,24	0,32	12,50	5,50	0,15	0,10
A ₁₂	8-19	1,07	2,20	28,87	28,62	42,51	7,80	1,94	21,9	0,26	0,24	14,50	5,00	0,08	0,05
AC	19-40	1,21	2,19	15,60	30,17	54,23	8,00	0,90	25,1	0,74	0,19	9,50	7,50	0,04	0,05
C _x	40-130	0,99	2,23	10,64	9,60	79,76	8,20	0,21	7,7	0,91	0,15	7,50	1,50	0,01	0,05

Horiz.: Horizonte
Prof.: Profundidad
Apar.: Aparente
Mat.: Materia
org.: Orgánica
Disp.: Disponible

La composición química total de los fragipanes (tabla 2) indica que éstos son materiales piroclásticos de naturaleza félsica [43]. Los óxidos de sílice, aluminio y sodio predominan en los tres perfiles. El contenido de sodio se debe a la presencia a la plagioclasa (principalmente andesina y albita), lo que se

ha confirmado con el estudio petrográfico. Las relativamente altas relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ y $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ revelan que el material parental presenta un bajo grado de intemperización, debido a las condiciones climáticas que predominan en la región de estudio.

Tabla 2.

Composición química total (%) de los perfiles estudiados.

Horizonte	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Total
Perfil 1 Vitrandic Udorthents													
A ₁₁	65,99	2,29	13,81	2,10	0,52	2,21	1,12	8,98	2,69	0,11	1,46	5,18	99,82
A ₁₂	65,97	2,78	13,60	2,25	0,52	1,66	2,17	7,50	2,69	0,11	2,12	4,92	99,25
AC	75,56	2,20	8,03	1,33	0,17	1,33	2,09	5,09	2,65	0,25	5,56	6,01	98,70
C _x	80,91	1,15	3,89	0,50	0,21	1,72	1,38	3,35	2,41	0,11	4,95	6,52	95,63
Perfil 2 Lithic Ustorthents													
A ₁₁	61,74	2,37	15,23	1,91	0,62	1,96	1,92	8,57	3,13	0,41	2,48	8,97	97,86
A ₁₂	59,09	2,42	15,13	2,10	0,61	2,85	2,20	9,11	3,13	0,55	2,35	16,50	97,19
AC	56,28	1,71	14,67	1,83	0,72	4,81	1,77	7,96	2,89	0,33	3,66	12,05	92,97
C _x	63,41	1,76	14,62	1,23	0,52	2,46	1,81	8,04	2,89	0,32	3,85	7,65	97,06
Perfil 3 Vitrandic Udorthents													
A ₁₁	62,3	3,14	15,29	2,75	0,73	2,15	2,52	7,5	2,89	0,09	2	7,21	99,36
A ₁₂	62,55	3,16	15,14	3,25	0,53	2,11	2,39	8,04	2,65	0,14	2,15	6,7	99,96
AC	64,78	2,59	14,51	2,43	0,55	1,89	2,25	8,04	2,89	0,21	2,09	5,04	99,94
C _x	61,91	2,86	14,58	2,28	0,72	2,6	3,7	8,04	2,89	0,37	1,68	3,42	99,95

Extracción Selectiva de Fe, Al y Si

Los resultados de la extracción selectiva y de la disolución total de Al, Fe y Si se muestran en el tabla 3. La solubilidad de cada uno de estos elementos, determinada a partir de los diferentes procesos de extracción, permite reconocer diferencias entre los horizontes superficiales y el fragipán, así como el grado de alteración del material.

Perfil 1 Vitrandic Udorthents

El perfil 1, localizado a 2 480 m s. n. m., ha sido clasificado como uno de tipo Vitrandic Udorthents [12]. Su contenido de Fe -extraído con oxalato (Fe_o)- es bajo (<0,22), lo cual es indicativo de una pequeña cantidad de óxidos de Fe amorfos en el perfil (tabla 3). El porcentaje de Fe amorfo en el horizonte superior es del 13,75 % y en el fragipán del 3,30 % del Fe total (tabla 3). Acevedo-Sandoval y colaboradores [12] reportan que en los horizontes superiores de Inceptisoles y Alfisoles del Estado de México predominan los óxidos de Fe amorfos.

Multiplicando Fe_o por 1,7 se estima semi-cuantitativamente el contenido de ferrihidrita presente en el suelo [42, 43]. En este perfil varía de 23,12 % a 5,49 % del Fe total con respecto a la profundidad. El Fe presente como goetita y hematita (óxidos de hierro

cristalinos) se estimó a partir de la diferencia de Fe_d y Fe_o [43]. Los valores de estos parámetros son bajos en el perfil, lo cual coincide con una alta relación Fe_o/Fe_d [47]. La relación Fe_d/Fe_t varió entre 0,08 a 0,02 con el incremento de la profundidad. Estos valores indican poca variación en el grado de alteración de los minerales primarios [48].

La cantidad de Fe lábil, extraído con ditionito (Fe_d), corresponde únicamente a <8,1 % del Fe total, presentándose en forma no cristalina en A₁₁, A₁₂, AC y C_x. Estos niveles pueden estar relacionados a la poca formación de hierro pedogénico. Karathanasis [20] indica que porcentajes bajos de óxidos de Fe lábil juegan un papel importante en los procesos de cementación en los fragipanes. En general, el porcentaje de extracción de Fe con oxalato y ditionito disminuye en el fragipán con la profundidad. Los resultados de la disolución en ditionito-citrato-bicarbonato sugieren una mínima presencia de óxidos de hierro cristalinos. Los bajos contenidos de óxidos de hierro se deben principalmente a la poca alteración de la toba dacítica, como resultado de las condiciones climáticas de la zona de estudio.

En el horizonte A₁₂ del Vitrandic Udorthents, los óxidos de hierro cristalino representan el 2,58 % del hierro total. Esto puede significar que en el perfil predominan las formas no cristalinas de hierro. La

relación Fe_o/Fe_d es relativamente alta (tabla 4), lo que puede asociarse a una baja proporción de óxidos de Fe cristalinos.

El pirofosfato de sodio extrae el Fe y el Al presente en el suelo como parte de complejos orgánicos [29]. El porcentaje de complejos órgano-metálicos en el horizonte superior para Fe_p es del 8,12 % y de Al_p del 1,91 % del total de Fe y Al, respectivamente. Por su parte, en el fragipán es del 9,89 % para Fe_p y 4,24 % para Al_p . Estas observaciones pueden indicar procesos de eluviación e iluviación en el perfil y concuerda con lo observado en la relación Arcilla/ Fe_d , la cual se incrementa moderadamente con la profundidad del suelo [49]. Un valor $>0,98$ en la relación Fe_p/Fe_d indica una fuerte asociación de Fe con compuestos orgánicos. El incremento observado en el fragipán se debe posiblemente a la migración de la arcilla con los óxidos de hierro y la materia orgánica de los horizontes superiores a inferiores [47]. Parfitt y Childs [46] reportan que el pirofosfato extrae principalmente ferrihidrita y goetita asociada con la materia orgánica por peptización.

La mayor parte del hierro en el perfil forma parte de la estructura de los silicatos y filosilicatos (Fe_t-Fe_d) al representar el 91,8 %, 95,4 %, 97,4 % y 97,8 % del Fe total en los horizontes A_{11} , A_{12} , AC y C_x respectivamente [48].

Las relaciones Al_d/Al_t y Al_o/Al_d son empleadas como índices geoquímicos. Por ejemplo, valores bajos de Al_d/Al_t denotan un escaso grado de alteración de minerales primarios que contienen aluminio. Una relación Al_o/Al_d mayor a 2,83 indica un escaso grado de cristalinidad de Al pedogénico presente en el perfil. El Al (III) es no reducible por ditionito; el aluminio detectado por este extractante es principalmente de la sustitución del aluminio por óxidos de hierro [50]. Relaciones relativamente bajas de Al_p/Al_o son evidencia de que la mayor parte del Al está unido a compuestos amorfos o pobremente cristalinos. Por otra parte, valores relativamente bajos de Al_p/Al_o y Fe_p/Fe_o indican que Al y Fe no se presentan como complejos organometálicos, mientras que los parámetros Al_p y Al_o tienden a disminuir con la profundidad (tabla 4).

La relación $(Al_o-Al_p)/Si_o$ es un indicador de la cantidad de Al que se encuentra unido a minerales primarios y secundarios, donde el Al_d y el Si lábil forman aluminosilicatos [16]. El contenido de alofano en el perfil es relativamente bajo y coincide con los porcentajes de Si extraído por oxalato y la relación $Al_o/(Al_o+Si_o)$. Por otra parte, el incremento de la relación $Si_d/(Si_d+Al_d)$ con la profundidad se relaciona con el aumento en la dureza del fragipán [13]. Dubroeuq y colaboradores [51] mencionan que las condiciones ambientales regulan los contenidos de Si y Al en la

solución del suelo. Estas condiciones determinan la formación de componentes no cristalinos o minerales de arcilla o de ambos.

Perfil 2 Lithic Ustorthens

El perfil 2, localizado a una altitud de 2 450 m s. n. m., ha sido clasificado como uno de tipo Lithic Ustorthents [12]. En este perfil, el Fe_d varió de 22,89 % a 5,97 % del Fe total (tabla 3). La cantidad de óxidos de hierro amorfos (Fe_o) y cristalinos (goetita y hematita), obtenidos a partir de la diferencia de Fe_d y Fe_o [44], es relativamente baja a través del perfil. Este fenómeno posiblemente está relacionado a un bajo potencial reductor-oxidante del suelo [32], o a una aireación limitada junto con temperatura y/o humedad adecuadas [52]. Esta limitación en óxidos de hierro se refleja también en los valores de la relación Fe_p/Fe_o (tabla 4). El porcentaje de óxidos de Fe cristalinos varió entre 11,44 % y 3,73 % del Fe total en relación a la profundidad. Por otra parte, los porcentajes 77,10 %, 85,20 %, 89,16 % y 94,03 % del Fe total observados respectivamente en los horizontes A_{11} , A_{12} , AC y C_x corresponden a una asociación a la estructura de silicatos (Fe_t-Fe_d). El mayor porcentaje ha sido observado en el fragipán, el cual coincide con valores relativamente bajos de Fe_o/Fe_d .

Una relación Fe_p/Fe_d , $<0,36$ indica una limitada asociación de Fe con compuestos orgánicos. Los valores observados en la relación arcilla/ Fe_d revelan una ligera migración de arcilla y óxidos de Fe, disminuyendo ésta en el fragipán.

El Al en forma lábil representa el 1,36 % del Al total del suelo en el horizonte superior. Éste disminuye con la profundidad y se precipita como mineral de fase trihidróxido $Al(OH)_3$ o un análogo de pobre ordenamiento (alofano) [53].

En el fragipán, los parámetros Al_p y Al_o tienden a disminuir con la profundidad (tabla 3). Por otra parte, y hablando del horizonte superior, el Al activo se encuentra asociado al carbono orgánico [54]. La baja relación Al_p/Al_o establece que la mayor parte del Al activo se encuentra unido a compuestos inorgánicos pobremente cristalinos. Los bajos contenidos de alofano (18 % del total de Al del suelo) en el horizonte superficial se deben probablemente al contenido de humus que inhibe su formación [55].

La diferencia de Al_t-Al_d muestra que el 98 % del Al total se presenta en los silicatos primarios y filosilicatos. Los valores relativamente altos de la relación $Si_d/(Si_d+Al_d)$ en el fragipán permiten afirmar que su endurecimiento se debe principalmente al Si lábil, que es eluviado del horizonte superior unido con arcillas y, en especial, con óxidos de Fe que causan la cementación [16].

Tabla 3.

Extracción selectiva y total de Fe, Al y Si en la fracción arcilla.

Horizonte	Profundidad cm	Ditionito-Citrato- Bicarbonato (%)			Oxalato ácido de amonio (%)			Pirofosfato de sodio (%)			Total (%)		
		Al _d	Fe _d	Si _d	Al _o	Fe _o	Si _o	Al _p	Fe _p	Si _p	Al _t	Fe _t	Si _t
Perfil 1 Vitrandic Udorthents													
A ₁₁	0 - 20	0,04	0,13	0,06	0,46	0,22	0,26	0,15	0,13	0,17	7,84	1,60	31,79
A ₁₂	20 - 32	0,03	0,10	0,05	0,09	0,05	0,26	0,04	0,03	0,26	7,20	1,94	30,84
AC	32 - 50	0,02	0,04	0,07	0,20	0,06	0,26	0,13	0,06	0,58	4,25	1,54	35,32
C _x	50 - 100	0,01	0,02	0,06	0,10	0,03	0,23	0,01	0,09	0,16	2,36	0,91	39,45
Perfil 2 Lithic Ustorthents													
A ₁₁	0 - 17	0,11	0,38	0,07	0,48	0,19	0,29	0,13	0,08	0,19	8,06	1,66	28,86
A ₁₂	17 - 31	0,11	0,25	0,06	0,45	0,11	0,28	0,09	0,05	0,24	8,01	1,69	27,63
AC	31 - 43	0,06	0,13	0,07	0,25	0,07	0,29	0,05	0,01	0,24	7,24	1,20	25,84
C _x	43 - 133	0,04	0,08	0,07	0,25	0,03	0,30	0,03	0,03	0,14	7,71	1,34	30,80
Perfil 3 Vitrandic Udorthents													
A ₁₁	0 - 8	0,10	0,61	0,08	0,35	0,17	0,29	0,04	0,01	0,16	8,09	2,20	29,13
A ₁₂	8 - 19	0,07	0,56	0,07	0,24	0,10	0,32	0,01	0,03	0,11	8,33	2,21	29,24
AC	19 - 40	0,06	0,53	0,07	0,35	0,18	0,28	0,01	0,03	0,13	8,21	1,81	30,29
C _x	40 - 130	0,01	0,07	0,06	0,28	0,19	0,28	0,04	0,06	0,14	7,86	1,95	29,13

Al_d, Fe_d y Si_d = Aluminio, hierro y silicio extraídos por ditionito citrato bicarbonato [31].

Al_o, Fe_o y Si_o = Aluminio, hierro y silicio extraídos por oxalato ácido de amonio [32].

Al_p, Fe_p y Si_p = Aluminio, hierro y silicio extraídos por pirofosfato de sodio [32].

Al_t, Fe_t y Si_t = Aluminio, hierro y silicio total [34].

Tabla 4.

Relaciones entre Fe, Al y Si.

Horizonte	Óxidos de Fe	Óxidos de Fe	Alofano (%)	Fe _t - Fe _d	Fe _o / Fe _d	Fe _p / Fe _o	Fe _p / Fe _d	Si _d / (Al _d +Si _d)	Al _o / Al _d	(Al _o - Al _d)/ Si _o	Al _o / (Al _o +Si _o)	Al _p / Al _o	Al _t -Al _d	Arcilla/ Fe _d
	amorfos	cristalinos												
Perfil 1														
A ₁₁	0,37	0,00	1,30	1,47	1,66	0,59	0,98	0,60	12,41	1,19	0,64	0,33	7,80	215,4
A ₁₂	0,09	0,05	0,00	1,85	0,51	0,60	0,31	0,60	2,83	0,19	0,26	0,44	7,17	309,4
AC	0,10	0,00	0,00	1,50	1,43	1,00	1,43	0,82	12,59	0,27	0,43	0,65	4,24	556,6
C _x	0,05	0,00	0,00	0,89	1,50	3,00	4,50	0,85	9,45	0,39	0,30	0,10	2,35	1 803,5
Perfil 2														
A ₁₁	0,32	0,19	1,45	1,28	0,50	0,42	0,21	0,39	4,32	1,21	0,62	0,27	7,95	90,8
A ₁₂	0,19	0,14	1,40	1,44	0,44	0,45	0,20	0,35	4,25	1,29	0,62	0,20	7,90	117,7
AC	0,12	0,06	0,00	1,07	0,56	0,14	0,08	0,53	4,29	0,69	0,46	0,20	7,18	196,9
C _x	0,05	0,05	0,00	1,26	0,36	1,00	0,36	0,62	6,25	0,73	0,45	0,12	7,67	95,7
Perfil 3														
A ₁₁	0,29	0,44	1,45	1,59	0,28	0,06	0,02	0,47	3,67	1,07	0,55	0,11	8,00	39,9
A ₁₂	0,17	0,46	0,00	1,65	0,18	0,30	0,05	0,50	3,49	0,72	0,43	0,04	8,26	51,6
AC	0,31	0,35	1,40	1,28	0,34	0,17	0,06	0,55	6,01	1,21	0,56	0,03	8,15	29,3
C _x	0,32	0,00	0,00	1,88	2,72	0,32	0,86	0,85	26,45	0,86	0,50	0,14	7,85	152,1

Al_d, Fe_d y Si_d = Aluminio, hierro y silicio extraídos por ditionito citrato bicarbonato [31].

Al_o, Fe_o y Si_o = Aluminio, hierro y silicio extraídos por oxalato ácido de amonio [32].

Al_p, Fe_p y Si_p = Aluminio, hierro y silicio extraídos por pirofosfato de sodio [32].

Al_t, Fe_t y Si_t = Aluminio, hierro y silicio total [34].

Perfil 3 Vitrandic Udorthents

El perfil 3, localizado a 2 300 m s. n. m., ha sido clasificado como uno de tipo Vitrandic Udorthents [12]. El contenido de Fe extraído con oxalato varió de 7,72 % a 9,74 % del Fe total, mientras que el porcentaje de Fe amorfo aumenta ligeramente con respecto de la profundidad. El contenido de Fe lábil (Fe_d) es de 27,72 %, 25,34 % y 29,28 % del Fe total en los horizontes A_{11} , A_{12} y AC respectivamente (presentándose en forma no cristalina). En contraste, en el horizonte C_x se presenta en una concentración relativamente baja (3,59 % del Fe total). La cantidad de ferrihidrita varió entre 13,18 %, en el horizonte superior y el 16,41 % en el fragipán. La cantidad de óxidos cristalinos de Fe disminuyó con la profundidad (tabla 4), mientras que el alofano representa el 17,92 % del Al total del suelo en el horizonte superior. La relación Fe_o/Fe_d se incrementó con la profundidad, lo que indica una disminución de óxidos amorfos de Fe en el fragipán. Por otra parte, gran parte del hierro de los horizontes A_{11} , A_{12} , AC y C_x forma parte de la estructura de silicatos ($Fe_t-Fe_d = 70,7\% - 96,4\%$ del Fe total). Una relación $Fe_p/Fe_d < 0,32$ puede relacionarse a una escasa asociación del Fe con compuestos orgánicos, lo cual se correlaciona con valores bajos de Fe_p/Fe_o y Al_p/Al_o .

El Al extraído con pirofosfato indica que la mayor parte está unida a compuestos inorgánicos pobremente cristalinos. Los valores relativamente bajos de Al_d/Al_t denotan un escaso grado de alteración de minerales primarios que contienen aluminio. La presencia de Al_d se da por la sustitución de Fe por Al. Finalmente, una relación $Si_d/(Si_d+Al_d) > 0,5$ es un indicador de la consolidación del fragipán [16].

CONCLUSIONES

El fragipán blanco bajo estudio se clasifica petrográficamente como una toba dacítica poco soldada y alterada. Está constituido por fragmentos piroclásticos que incluyen plagioclasa (andesina), feldespato potásico (sanidina), clinopiroxeno, magnetita, cuarzo y minerales arcillosos. La distribución vertical y la variación de formas de hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de Fe, Al y Si en los tres perfiles pueden interpretarse como producto de un escaso grado alteración de los minerales primarios y de la pedogénesis de estos suelos. Los perfiles de suelo se caracterizan por su bajo contenido de alofano (1,30 %-1,45 %), óxidos de Fe amorfos (<0,37 %) y de óxidos de Fe (<0,46 %) y Al cristalino (<0,60 %). Los escasos contenidos de Al_d y Si lábil en los perfiles indican la presencia de aluminosilicatos cristalinos. Las bajas relaciones de Al_p/Al_o y Fe_p/Fe_o son evidencia de que la mayor parte de Al

y Fe se encuentran unidos a compuestos inorgánicos pobremente cristalinos. El Si, Al y Fe en el fragipán forman parte de la estructura de silicatos. El estudio también indica un mínimo grado de cristalinidad de Fe y Al pedogenético. La redistribución y acumulación de los productos de alteración (minerales arcillosos), óxidos e hidróxidos de Fe y Al, y geles de sílice contribuyen a la consolidación del fragipán.

REFERENCIAS

- [1] Hidalgo, C., Quantin, P. y Elsass, F. (1997). Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México. *Suelos Volcánicos Endurecidos. III Simposio Internacional*: pp. 65-72.
- [2] Dubroeuq, D., Quantin, P. y Zebrowski, C. (1989). Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7: pp. 3-12.
- [3] Nimlos, J. J. (1989). The density and strength of Mexican Tepetate (Duric materials). *Soil Sci* 147(1): pp. 23-27.
- [4] Covalada, S., Pajares, S., Gallardo, J. F., Padilla, J., Báez, A. and Etchevers, J. D. (2009). Effect of different agricultural management systems on chemical fertility in cultivated tepetates of the Mexican Transvolcanic Belt. *Agricult Ecosyst Environ* 129(4): pp. 422-427.
- [5] Verma, S. P. (2009). Continental rift setting for Central Part of the Mexican Volcanic Belt: A statistical approach. *Open Geol J* 3: pp. 8-29.
- [6] Verma, S. P., Verma, S. K., Pandarinath, K. and Rivera-Gómez, M. A. (2011). Evaluation of recent tectonmagmatic discrimination diagrams and their application to the origin of basic magmas in Southern Mexico and Central America. *Pure Applied Geophys* 168(8-9): pp. 1501-1525.
- [7] Ajmone-Marsan, F., Pagliai, M. and Pini, R. (1994). Identification and properties of fragipan soils in the piemonte region of Italy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: pp. 891-900.
- [8] Soil Survey Staff. (1994). *Claves para Taxonomía de Suelos*. Publicación especial 3. Ortiz-Solorio, Carlos A., Gutierrez Castorena, M. y Garcia Rodriguez, J. L. (traductores). 1.ª edición. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS). Chapingo, México.
- [9] Zebrowski, C. (1992). Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra* 10(Número especial): pp. 1-4.
- [10] Quantin, P. (1992). L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique Latine: Processus géologiques et pédologiques. *Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra* 10(Número especial): pp. 24-33.
- [11] Flores, R. D., Alcalá M., J. R., González V., A. and Gama C., J. E. (1996). Duripans in subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Rev. Mex. Cien. Geol.* 13: pp. 228-239.
- [12] Acevedo-Sandoval, O. A., y Flores-Román, D. (2000). Genesis of white fragipans of volcanic origin. Universidad Nacional Autónoma de México. *Rev. Mex. de Cien. Geol.* 17(2): 152-162.

- [13] Acevedo-Sandoval, O. A., Cruz-Sánchez, M. y Cruz-Chávez, E. (2002). Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. *Agrociencia* 35: PP. 401-409.
- [14] Gama, J., Solleiro, E., Flores, D., Sedov, S., Cabadas, H. y Díaz, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso de Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* LIX(1): pp. 133-145.
- [15] Báez, A., González, M. C., Etchevers, J. D., Prat, C. e Hidalgo, C. (2010). Glomalina y secuestro de Carbono en tepetates cultivados. *Agrociencia* 44(5): pp. 517-529.
- [16] Duncan, M. M. y Franzmeier, D. P. (1999). Role of free silicon, aluminum and iron in fragipan formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: pp. 923-929.
- [17] Flach, K. W., Nettleton, W. D. and Chadwick, O. A. (1992). The criteria of duripans in the U.S. Soil Taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra* 10 (Número especial): 178-182.
- [18] Quantin, P., Arias, A., Etchevers, J., Ferrera, R., Oleshko, K., Navarro, A., Werner, G. y Zebrowski, C. (1993). Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura (informe científico final del proyecto TS2-A 212-C CEE/ORSTOM). *Terra* 11: pp. 3-69.
- [19] Farmer, V. C., Fraser, A. R., Robertson, L. and Sleeman, J. R. (1984). Protoimogolite allophone in podzol concretions in Australia. Possible relationship to aluminous ferrallitic (lateritic) cementation. *J. Soil Sci.* 35: pp. 333-340.
- [20] Karathanasis, A. D. (1987). Thermodynamic evaluation of amorphous aluminosilicate binding agents in fragipans of Western Kentucky. *Soil Sci. Am. J.* 51: pp. 819-824
- [21] Ortega, G. F., Mitre S., L. M., Roldán Q., J., Aranda G., J., Morán Z., D. J., Alanís A., S. y Nieto S., A. (1992). *Carta Geológica de la República Mexicana*. Escala 1:2 000 000, con texto explicativo. 5.ª edición. Consejo de Recursos Minerales Instituto de Geología. U. N. A. M. México, D. F.
- [22] Secretaría del Medio Ambiente (2002). *Diagnóstico Geológico y Geohidrológico preliminar de la Microcuenca del Río Magdalena*. Gobierno del Distrito Federal. México.
- [23] Bravo, V. M., Ortiz, E. y Cabral, M. A. (2009). Gliptodontes (Xenarthra, Glyptodontidae) del Pleistoceno Tardío (Rancholabreano) de Hidalgo, Centro de México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 61(2): pp. 267-276.
- [24] García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana)*. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico, D. F.
- [25] Van Zuidam, R. A. (1979). *Terrain analysis and classification using aerial photographs a geomorphological approach: Enschede, Netherlands*. International Training Center.
- [26] United States Department of Agriculture-National Resources Conservation Service (USDA-NRSC). (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 4.0*. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- [27] Olsen, R. S. and Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. Methods microbiological properties. *Agronomy Monograph* 9: pp. 403-430.
- [28] Van Reeuwijk, L. P. (editor). (1995). *Procedimientos para análisis de suelos*. Gutiérrez C. Ma. del C., Tavárez, E. A. y Ortiz, C. A. (traductores). Especialidad de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp: 3-31; 37-108.
- [29] Sparks, D. L. (1996). *Methods of Soil Analysis Chemical Methods*. Number 5, part 3. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wis.
- [30] Mehra, O. P. and Jackson, M. L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: pp. 317-327.
- [31] Smith, B. F. L. (1994). Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. In M. J. Wilson (Ed.) *Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods*. pp. 333-357. Chapman and Hall. London, UK.
- [32] Parfitt, R. L. (1990). Allophane in New Zealand, a review. *Australian Journal of Soil Research* 28: pp. 343-360
- [33] Verbeek, A. A., Mitchell, M. C. and Ure, A. M. (1982). The analysis of small samples of rock and soil by atomic absorption and emission spectrometry after lithium metaborate fusion/nitric acid dissolution procedure. *Anal Chim Acta* 135(2): pp. 215-228.
- [34] Murphy, C. P. (1986). *Thin section preparation of soils and sediments*. AB Academic Publishers. Herts, England.
- [35] Childs, C. W., Matsue, N. and Yoshinaga, N. (1991). Ferrihydrite in volcanic ash soil of Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37: pp. 299-311.
- [36] Ezzaim, A., Turpault, M. P. and Ranger, J. (1999). Quantification of weathering processes in an acid brown soil developed from tuff (Beaujolais, France). Part I. Formation of weathered rid. *Geoderma* 7: pp. 137-154.
- [37] Yong, R. N., Mohamed, M. O. and Wand, B. W. (1992). Influence of amorphous and iron hydroxide on interparticle action and soil surface properties. *Can. Geotech J.* 29: pp. 803-818.
- [38] Payton, R. W. (1993). Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the milfield plain, north-east England. II. Post Devonian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *Journal of Soil Science* 44: pp. 703-723.
- [39] Constantini, E. A. and Damiani, D. (2004). Clay minerals and the development of Quaternary soils in central Italy. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21(1): pp. 144-159.
- [40] Vazquez-Alarcon, A. y N. Bautista-Aroche. (1993). *Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua*. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- [41] Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X. y Aguilar-Santelises, A. (2000). *Curso de interpretación de análisis de suelo, agua, planta y ECP (savia), con la finalidad de determinar los programas de fertilización*. Instituto de Capacitación para la productividad agrícola. México.
- [42] Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R. A. (1993). *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*. Elsevier.
- [43] Parfitt, R. L. and Saigusa, M. (1985). Allophane and humus-aluminium in spodosols and andepts formed from the some volcanic ash beds in New Zealand. *Soil Science* 139: pp. 149-155.

- [44] Childs, C. W. (1985). *Towards understanding soil mineralogy. II. Notes on ferrihydrite*. N. Z. Soil Bureau Laboratory Report CM7. DSIR, New Zealand.
- [45] Parfitt, R. L. and Childs, C. W. (1988). Estimation of forms of Fe and Al: a review and analysis of contrasting soils by dissolution and Mossbaver methods. *Australian J. Soil Research* 26: pp. 121-144.
- [46] Prasetyo, B. H. and Gilkes, R. J. (1994). Properties of iron oxides from red soils derived from volcanic tuff in west Java. *Aust. J. Soil Res.* 32: pp. 781-794.
- [47] Malucelli, F., Terribile, F. and Colombo, C. (1999). Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of Sao Miguel (Azores). *Geoderma* 88: pp. 73-98.
- [48] Juo, A. S. R., Moormann, F. R. and Maduakor, H. O. (1974). Forms and pedogenetic distribution of extractable iron and aluminum in selected soils of Nigeria. *Geoderma* 11: pp. 167-179.
- [49] Ussiri, D. A. N. and Johnson, C. E. (2004). Sorption of organic carbon fractions by spodosol mineral horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: pp. 253-262
- [50] Dubroeuq, D., Geissert, D. and Quantin, P. (1998). Weathering and soil forming processes under semi-arid conditions in two Mexican volcanic ash soils. *Geoderma* 86: pp. 99-122.
- [51] Acevedo-Sandoval, O. A., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M. y Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de los óxidos de hierro en los suelos. *Revista Terra Latinoamericana* 22: pp. 485-497.
- [52] Acevedo-Sandoval O. A., Prieto-García, F. y Gordillo-Martínez, A. (2008). Identificar las fracciones de aluminio en un Andosol del estado de Hidalgo, México. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 21(3-4): pp. 125-132.
- [53] Zysset, M., Blaster, P., Luster, J. y Gehring, A. U. (1999). Aluminum control in different horizons of a podzol. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 63: pp. 1106-1115.
- [54] Dahlgren, R., Shoji, S. and Nanzyo, M. (1993). Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In M. Nanzyo S. Shoji and R. A. Dahlgren (Ed.) *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. Elsevier Science Publishers B.V. The Netherlands: pp. 101-143.