

MORFOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SUELOS DE XOCHIMILCO

Morphology and Geochemistry of Xochimilco Soils

Brenda Karina Guevara Olivar^{‡1}, Héctor Manuel Ortega Escobar¹, Ramiro Ríos Gómez²,
Eloy Solano² y Juan Manuel Vanegas Rico¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (omguevaraolivar@gmail.com)

² Unidad de Investigación en Sistemática Vegetal y Suelo, Fac. de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México, D. F., México

RESUMEN

La zona chinampera de Xochimilco pertenece al área natural protegida ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco por decreto de la UNESCO. En esta zona se desarrolla la agricultura, la cual es afectada por los altos índices de salinidad, lo que reduce la productividad de las chinampas y propicia su abandono y deterioro ecológico. Para contribuir a su recuperación y conservación, se evaluaron las características físico-químicas de los suelos con relación a la naturaleza del material parental y magnitud de acumulación, obteniendo un perfil de suelo a una profundidad de 300 cm, y con evaluaciones cada 10 cm. Los resultados indicaron la presencia de un acuñamiento a 110 cm de profundidad, el cual corresponde a una capa de ceniza semicompacta e hidrófoba, la cual actúa como una fase semiaislante durante la lixiviación y eluviación de sales. El dinamismo de las propiedades físico-químicas esta alterado por tal acuñamiento dado que, interfiere la lixiviación de sales y lleva a aumentar su concentración en los horizontes superiores como parte del ascenso capilar y desecación, así mismo, la combinación de las propiedades físicas del suelo y el material parental, provocan la disminución de la conductividad hidráulica y el aumento de la concentración salina en el perfil.

Palabras clave: lixiviación de sales; sodicidad; pleistoceno; sierra Chichinautzin; periodo glacial.

SUMMARY

The chinampa area of Xochimilco is part of the protected area shared by the ejidos Xochimilco and San Gregorio Atlapulco by decree of UNESCO. Agriculture is carried out in this area. However, high levels of salinity reduce chinampa productivity and encourage

neglect and ecological deterioration. To contribute to recovery and maintenance of the area, the physical-chemical characteristics of the soil were assessed, relative to the nature and magnitude of accumulation of the parent material. A soil profile to the depth of 300 cm was obtained, and characteristics were evaluated every 10 cm. Results indicated the presence of wedging at 110 cm, corresponding to a layer of semi-compact and hydrophobic ash. This ash is a semi-insulating phase during leaching and salt eluviation. The dynamism of the physical-chemical properties is altered by wedging since it interferes in salt leaching and leads to increased salt concentrations in the upper horizons because of capillary rise and drying. Moreover, the combination of physical properties of the soil and the parent material causes a decrease in hydraulic conductivity and increases salt concentration in the profile.

Index word: salt leaching; sodicity; pleistocene; sierra Chichinautzin; glacial period.

INTRODUCCIÓN

Evidencias geológicas, como la edad de formación volcánica, sugieren que la cuenca del valle de México drenaba hacia el océano pacífico, cerrándose por la erupción basáltica de la sierra de Chichinautzin hace 600 000 años (Santoyo *et al.*, 2005). Las fracturas ocurridas en ese mismo periodo permitieron el flujo de emisiones del Grupo Chichinautzin de dirección suroeste a noreste, las cuales se intensificaron y formaron depósitos lacustres por el desplazamiento de basaltos de olivino, piroxenos y andesitas basálticas; y en menor cantidad, piroxena y andesitas de hornablenda (Mooser, 1956), así mismo, abanicos aluviales (Formación Tarango) integrados por arena con intercalaciones de lahares pumíticos, que se

originaron en la región. También, algunos sedimentos clásticos y piroclásticos se agruparon como depósitos lacustres, formando una altiplanicie extendida desde Zumpango hasta Chalco, y de Texcoco al Cerro de Chapultepec; de tal manera que, la composición de estos materiales corresponde a arcillas bentónicas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, diatomeas, ostrácodos e interstratificaciones de ceniza y pómez (Bryan, 1948). Mientras que durante el terciario superior se formaron los volcanes de las Sierras de las Cruces y de Río Frío, estableciéndose una red de desagüe hacia el sur de la cuenca (Mosser, 1975).

El azolve de la cuenca experimentó largas interrupciones durante los periodos de intensa sequía, en los que el nivel del lago bajó; además, ocurrieron violentas etapas de actividad volcánica que cubrieron toda la cuenca con mantos de arenas volcánicas, las cuales formaron costras duras (Mosser, 1956). Se estima que la velocidad de deposición de estos sedimentos fue del orden de un metro por cada cuatro mil años (Santoyo *et al.*, 2005). Esta sucesión de eventos formó una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda, separados por lentes duros de limos y arcillas arenosas, además de costras secas y arenas basálticas y pumíticas (Mosser, 1956; Santoyo *et al.*, 2005).

Todos estos materiales geológicos tienen en su composición calcio, magnesio, sodio y potasio en diferentes proporciones, que por procesos de intemperismo fueron liberados, formando los principales iones solubles responsables de la salinización (Ramos *et al.*, 2011). Por tanto, la velocidad de intemperismo de estos materiales depende de la presencia de los minerales ácidos o básicos que los forman, los minerales ácidos (cuarzo, feldespato, hornblenda y mica) son más resistentes al intemperismo que los minerales básicos como el olivino, piroxeno y plagioclasa cálcica (Lizcano *et al.*, 2006). De la alteración de estos minerales se pueden obtener composiciones elementales ricas en Si, Na, Ca y Al; que en climas húmedos, los tres primeros elementos son disueltos y removidos de las capas superficiales del perfil, mientras que el Al tiende a ser removido (Ziegler *et al.*, 2003).

Se considera que la evolución de estos suelos de origen ígneo hacia suelos con alto rendimiento agrícola, se debió a fuertes translocaciones de arcillas que se desarrollaron en condiciones de estabilidad durante largos periodos de tiempo (Ritter *et al.*, 2002; Tarbuck

et al., 2005), lo cual ocurrió cuando se formaron los grandes lagos de la cuenca, que aunque de carácter somero, mantuvieron corrientes suaves e intermitentes como consecuencia de la glaciación e interglaciación (Mosser, 1975; Tricart, 1985).

En la porción sureste de la cuenca de México, donde se ubica la actual zona chinampera de Xochimilco, se formaron suelos arcillosos debido al proceso de acumulación y alteración física y química de materiales aluviales y cenizas volcánicas en el ambiente lacustre, donde existían abundantes colonias de microorganismos y vegetación acuática (Targulian y Krasilnikov, 2007). El aumento de la concentración de sales en el suelo, provocó que la fracción orgánica se dispersara y coadyudara en altos valores de sodio intercambiable (XNa) en los horizontes. Actualmente, la salinidad resultante de estos procesos físicos y químicos ocasionan estrés fisiológico para las plantas (Rozema y Schat, 2013), lo que disminuye la capacidad agrícola de las chinampas. Dicho efecto se estima en la reducción del 85% de la superficie productiva (DGCORENADER, 2006), lo que sugiere un enfoque sobre el entendimiento de los procesos de salinización de la zona con fines de su manejo. Por ello, el presente trabajo tuvo por objetivo caracterizar las propiedades físicas y concentración iónica en el perfil de suelo para entender el mecanismo de fluctuación haloquímica como posible amenaza al proceso productivo de la chinampa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El sitio de estudio se ubicó en una parcela de la zona chinampera de Xochimilco (UTM 490989E y 2130569N, y con altitud de 2240 m), la cual pertenece a la Delegación Xochimilco, Distrito Federal, México. Su selección se realizó durante la época de estiaje con el propósito de identificar los sitios con mayor afectación por salinidad (Ramos *et al.*, 2011; Coras *et al.*, 2014). En ese sitio se tomaron muestras de suelo mediante perforación con barrena hasta una profundidad de 300 cm, recolectando una muestra cada 10 cm (Siebe *et al.*, 1996) (IUSS, 2006), las cuales se trasladaron en bolsas de polietileno para su estudio en el Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

Análisis Físicoquímicos

El material se manejó en condiciones de invernadero y se procesaron 100 g de cada muestra para evaluar su humedad relativa, mientras que el resto se secó a temperatura ambiente para su posterior análisis. Las muestras secas se tamizaron a través de una luz de malla de 2 mm y se trasladaron al laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados para obtener el extracto de saturación y posteriormente, realizarles los análisis químicos referentes a salinidad (Allison *et al.*, 1973), la densidad real se determinó por el método del picnómetro y densidad aparente, mediante pesada volumétrica (Chapman y Pratt, 1973). La conductividad eléctrica se determinó mediante medición directa con un conductímetro (Hanna Instruments modelo HI 255), mientras que el pH se determinó en el extracto de saturación con un potenciómetro (Hanna Instruments modelo pH 210). La concentración de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} se analizó mediante titulación colorimétrica y la cuantificación de los cationes Na^+ y K^+ por flamometría con un fotómetro de flama con autocalibración (Instrumentation Laboratory 643). Mientras que la concentración de SO_4^{2-} se determinó mediante turbidimetría (Hach Ratio/XR -43900/XR). El residuo seco evaporado (RSE) y residuo seco calcinado (RSC) se analizaron mediante la técnica de evaporación y calcinación con una placa de calentamiento (Sybron modelo Thermolyne Type 2200 plate) y mufla (ISB modelo Lindberg) métodos 2540D y 2540E (APHA, 1989).

Los datos de los análisis químicos obtenidos se compararon con los propuestos por Allison *et al.* (1973). Posteriormente, se realizó una prueba de correlación simple de Pearson Statistix 8.1 (Analytical Software, USA), para conocer la relación entre los valores físicoquímicos y el gradiente de profundidad del suelo. Los datos obtenidos se analizaron con el paquete estadístico señalado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Edafogénesis de la Zona Lacustre de Xochimilco

Los sedimentos analizados en las muestras de suelo de las barrenaciones corresponden a una mezcla de materiales ígneos, arcillas y diatomitas poco intemperizadas, productos de diferentes procesos de deposición que corresponden a materiales alterados

con evolución hidromórfica de carácter gléico (5GY 5/1). Composición similar a la que reportaron Reyes y García (2004), que se considera de naturaleza autóctona (Ortega *et al.*, 1997; Díaz *et al.*, 1998), donde los rasgos hidromórficos se distinguen por estar dispuestos en cintas o lenguas (Krasilnikov *et al.*, 2013). Los análisis físicos y químicos del suelo sugieren que la composición de estos materiales es similar a sedimentos aluviales y lacustres recientes con la estratificación volcánica del Cuaternario. De acuerdo con Mooser (1956), grandes volúmenes de agua fluyeron en los periodos de glaciación e interglaciación durante el Pleistoceno-Holoceno, ello transportó sedimentos intemperizados mezclados con material piroclástico como ceniza, toba y material basáltico alcalino. Como consecuencia, la hidrólisis probablemente provocó el intemperismo de materiales primarios como Anfíboles y Piroxenos que aunado a condiciones de anaerobiosis, produjo reacciones de óxido-reducción de las sales de hierro y manganeso formando concreciones, la mayoría de las veces (Ortega y Velázquez, 2000). Los registros de actividad humana sobre estos sedimentos datan del periodo Cuaternario (Mooser, 1975); aunque se presume que las chinampas remontan su origen a 1100 y hasta 2000 años de antigüedad (Rojas, 1983).

Los análisis de los sedimentos de la chinampa permiten inferir que el material basáltico alcalino y tobas evolucionaron en halogenuros como la halita, albita y plagioclasa como minerales secundarios derivados de feldespatos, como lo indican Edmunds *et al.* (2002). Por otra parte, la actividad agrícola intensa, probablemente favoreció el desarrollo de una capa orgánica de aproximadamente 50 cm de espesor, de acuerdo con Krasilnikov *et al.* (2013) se trata de un Antrosol Sáfico Terrico con textura migajón arcillosa, parda, con poca arena fina, grumos de carbonato de calcio y restos de material vegetal en proceso de humificación.

La correlación positiva entre la humedad y el gradiente de profundidad ($r = 0.83$, $P = 0.04$) sugiere un incremento del drenaje en los primeros 50 cm (Cuadro 1). Así mismo, existe estrecha relación ($r = 0.9225$, $P = 0.7809$) entre el contenido de humedad, la densidad real y la densidad aparente de los sedimentos a una profundidad de 50 a 110 cm, donde éstas últimas incrementaron cuantitativamente con la profundidad hasta en un 60%, aunque estos valores no se correlacionaron entre sí ($r = -0.18$, $P = 0.7$), debido a que dichos sedimentos poseen diferentes propiedades

Cuadro 1. Análisis de correlación entre profundidad y valores de densidad aparente, densidad real y porcentaje de humedad en un espesor de 0 a 50 cm.

		Profundidad	DR	H
		cm		%
DR	r	-0.1407		
	p	0.7903		
HR	r	-0.8334	-0.3159	
	p	0.0393	0.542	
DA	r	-0.3093	-0.9429	-0.1801
	p	0.5508	0.0048	0.7323

Correlación de Pearson. r = valor de correlación; p = valor de significancia; DR = densidad real; H = porcentaje de humedad; HR = humedad relativa; DA = densidad aparente..

de hidratación y compresibilidad (Bryan, 1948) (Figura 1).

De 50 a 110 cm de profundidad, la proporción de arena aumenta conformando una clase textural migajón arenosa, indicativo de transporte y acumulación de material aluvial con poca energía, mezclado con

material pumítico migajón arcillo arenoso, gris claro y poco compacto (Edmunds *et al.*, 2002; Santoyo *et al.*, 2005). Observaciones de campo mostraron que para el perfil tipo, el manto freático estuvo presente a 90 cm de profundidad, seguido de una capa de 20 cm de arena fina, negra y compacta, cuya fuerza de adhesión disminuye a los 110 cm de profundidad. Mooser (1975), describe a esta capa de sedimento como un acuñamiento de ceniza o toba volcánica consolidada, depositada durante el último evento volcánico ocurrido en la cuenca. El análisis de concentración iónica mostró que la presencia de éste acuñamiento, limita la lixiviación de sales y percolación de agua hacia los horizontes más profundos, ya que tiene una densidad aparente mayor en comparación con los sedimentos aluviales y lacustres, sin embargo, a profundidades mayores después del acuñamiento, la concentración iónica se redistribuye a lo largo del perfil conformando un gradiente de concentración hacia los 300 cm de profundidad, lo que demuestra que la capa hidrófoba no es impermeable en su totalidad. Cabe señalar que estos sedimentos altamente hidratados (mayor de 100%), se caracterizan por partículas arcillosas lacustres de color gris y pardo verdoso formadas como

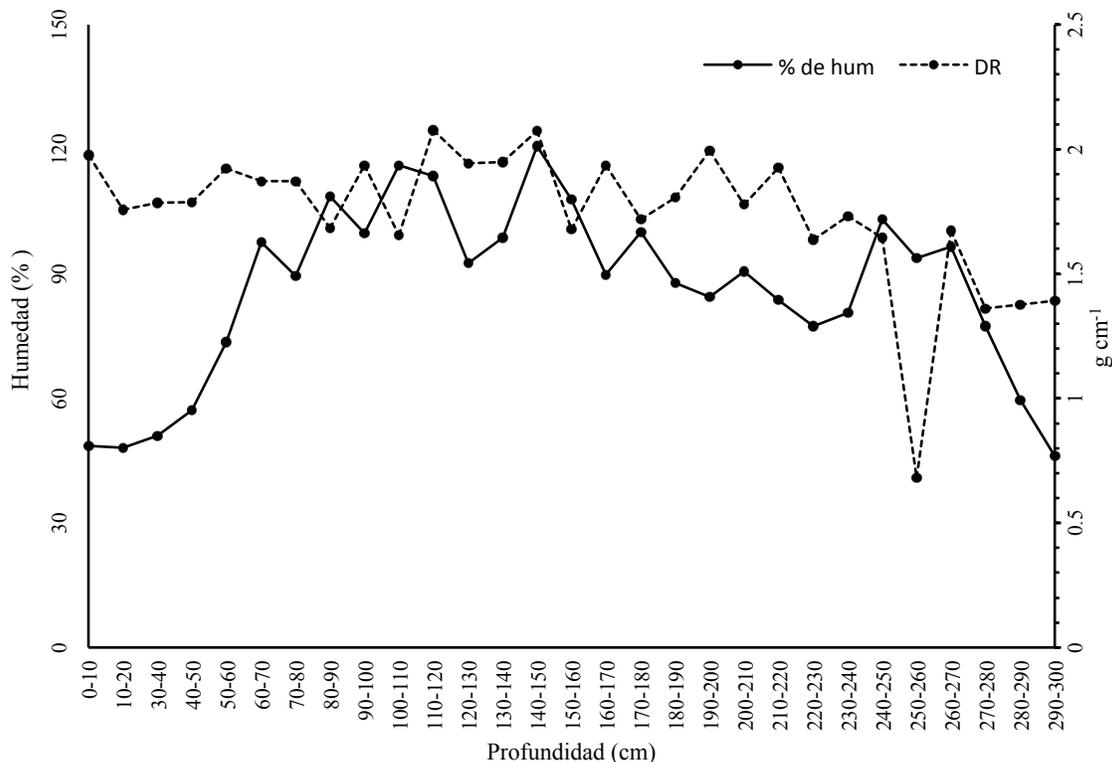


Figura 1. Variación de la densidad real (DR) y el porcentaje de humedad en el perfil de suelo, realizado en el Distrito de Riego, Xochimilco, Distrito Federal.

parte de la policromía a causa de la oxido-reducción de las sales de hierro y manganeso (Bryan, 1948) y la anaerobiosis (Díaz, 2006), estos moteados presentan intercalaciones con vetas de arena volcánica, negra y fina poco intemperizada (Ramos *et al.*, 2011).

De 240 a 300 cm de profundidad, los materiales forman parte de un mismo acuñaamiento. Bryan (1948) describe estos materiales como arcillas bentoníticas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, diatomeas, ostrácodos e interstratificaciones de ceniza y arenas pumíticas, con una antigüedad de 48 000 a 46 000 años, correspondiente al Pleistoceno tardío-Holoceno (Figura 2). El origen de estos depósitos está íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la cuenca, causado por la intensa actividad volcánica que formó la Sierra Chichinautzin.

Salinización y Sodificación del Suelo

El análisis de pH del extracto de saturación de las muestras denota el carácter alcalino del suelo (7.69-8.44) debido a la presencia de iones CO_3^{2-} . La distribución vertical de este ión, se relaciona con la presencia de los principales minerales que conforman

la cuenca, entre los anfíboles, feldespatos y piroxenos, mismos que producen alta basicidad en las soluciones intemperizantes (Ortega y Velázquez, 2000). Estos minerales primarios promueven el intemperismo, con la subsecuente formación de micas, ilitas, vermiculitas y montmorillonitas, arcillas ricas en Si y Mg (Porta *et al.*, 2003).

La proporción de los iones en el perfil (Figura 3) presentó la siguiente secuencia $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, cuya concentración disminuye al aumentar la profundidad hasta llegar a los 110 cm, en este punto, la inflexión de la curva se vuelve positiva hasta los 150 cm, lo mismo ocurre a una profundidad de entre 210 y 240 cm. La distribución de las sales en la estratigrafía del perfil, mostró que la concentración de cationes se encuentra altamente relacionada con la densidad aparente y real de los materiales acuñaados. En este caso, la ceniza volcánica hidrófoba constituye el principal factor de interferencia durante la eluviación y lixiviación de las sales, sobre todo cuando se altera el nivel del manto freático. La ceniza volcánica es un material constituido, en su mayoría, por minerales como alófanos, y haloisita derivados de la meteorización de las cenizas volcánicas, en particular del vidrio volcánico;

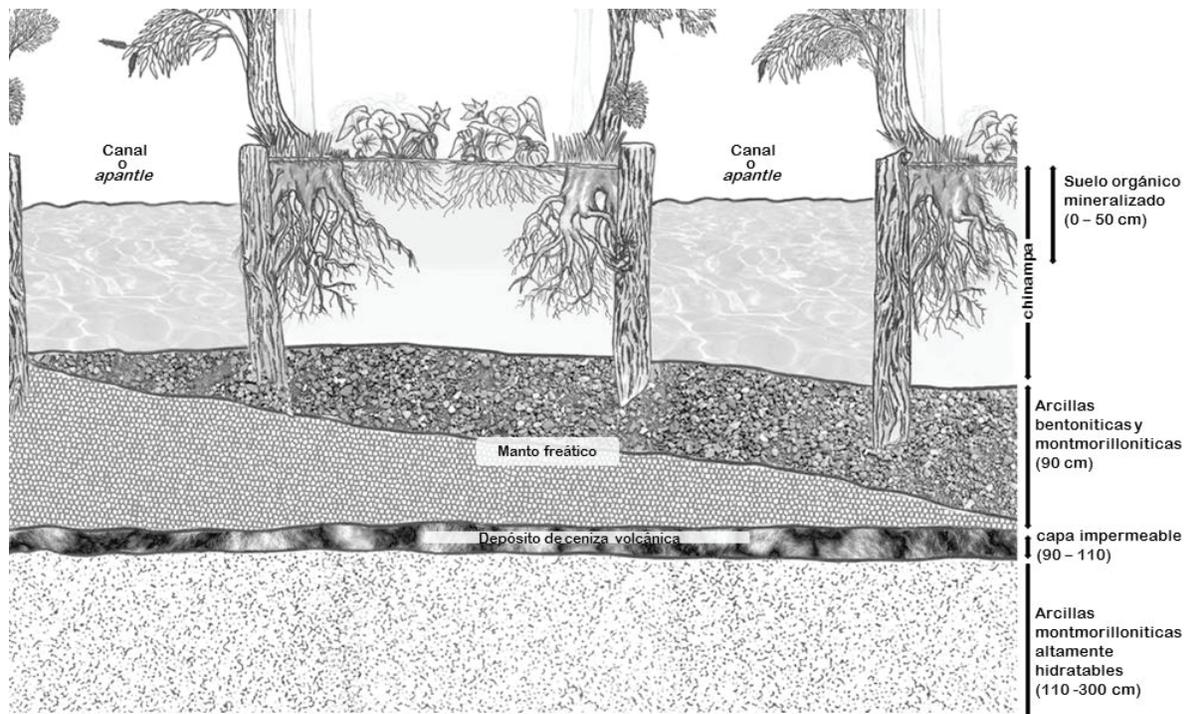


Figura 2. Acuñaamientos diversos de sedimentos lacustres durante el Pleistoceno tardío al Holoceno, hace 48 000 años. Ilustración realizada por Juan Vanegas.

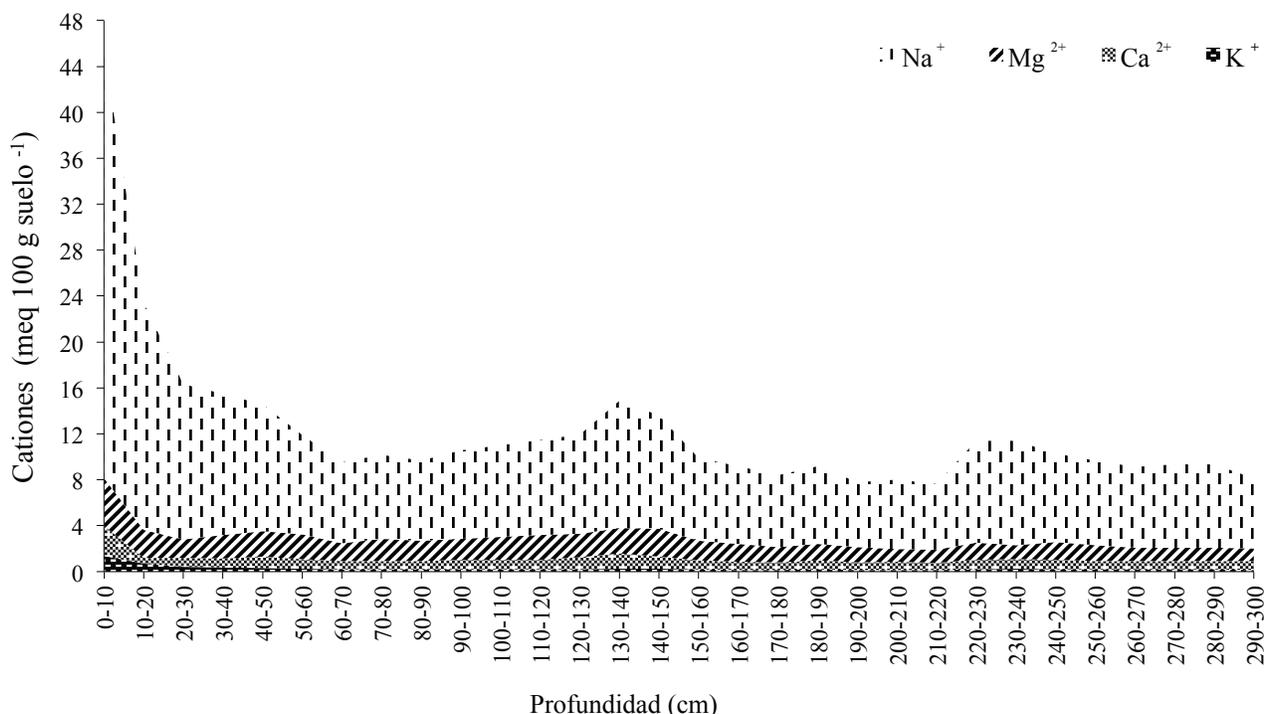


Figura 3. Composición de cationes en el extracto de saturación del suelo en estudio, Xochimilco, México, D. F.

la cual además tiene una estructura cementada muy porosa conformada por agregaciones aleatoriamente distribuidas de tamaño limo y minerales de la fracción arcillosa. Su cementación es generalmente producida por minerales de arcilla tales como alofana, imogolita, haloisita y ferrihidrita, o compuestos de humus, Al/Fe y opalina silícea (Lizcano *et al.*, 2006).

La composición aniónica tuvo el siguiente orden: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$ (Figura 4), los cuales disminuyen de forma homogénea al aumentar la profundidad, por lo menos hasta alcanzar los 220 cm, punto en el que la inflexión varía de forma positiva hasta los 250 cm, la tendencia vuelve a disminuir pero solo para los iones de cloruro y bicarbonato, los iones de sulfato y carbonato son casi imperceptibles, esto es atribuible a su grado de solubilidad y al movimiento del agua en el perfil. Los resultados reportados en este estudio respecto a la composición mineralógica concuerdan con aquellos registrados en estudios previos sobre los suelos de la cuenca de México (Lozano y Ortega, 1998; Ramos *et al.*, 2011; Solleiro *et al.*, 2011).

La mayor concentración de carbonatos CO_3^{2-} (0.14 a 0.22 meq 100 g de suelo⁻¹) se presentó en el rango de 0 a 60 cm de profundidad, a partir de la cual registró

un descenso gradual hasta 0.07 a 0.00 meq 100 g de suelo⁻¹ a 300 cm. Se conoce que la acumulación de los carbonatos en la superficie de los suelos ocurre ocasionalmente por los procesos de evapotranspiración y de ascenso capilar desde los niveles freáticos someros, su lixiviación se presenta durante el predominio de los flujos descendentes de soluciones (Ortega y Velázquez, 2000) y bajo determinadas condiciones físico-químicas. Esta distribución es más perceptible durante la estación de estiaje cuando se mantiene bajo el manto freático (Ramos *et al.*, 2011). La concentración de bicarbonatos HCO_3^- disminuyó sus valores de 1.83 meq 100 g de suelo⁻¹ a los 0 cm de profundidad, hasta 0.92 meq 100 g de suelo⁻¹ hacia los 120 cm, presentando una interrupción del patrón a los 130 cm, de este punto y hasta los 300 cm, los valores disminuyeron de 0.62 a 0.34 meq 100 g de suelo⁻¹ (Figura 3; Cuadro 2).

Los sulfatos SO_4^{2-} presentaron bajas concentraciones (0.1428 a 0.003 meq 100 g⁻¹ de suelo) en el perfil 0-300 cm, y su concentración disminuye conforme aumenta la profundidad, cabe destacar que las mayores concentraciones (0.102 a 0.019 meq 100 g⁻¹ de suelo) de este ion se encontraron entre los 0-110 cm

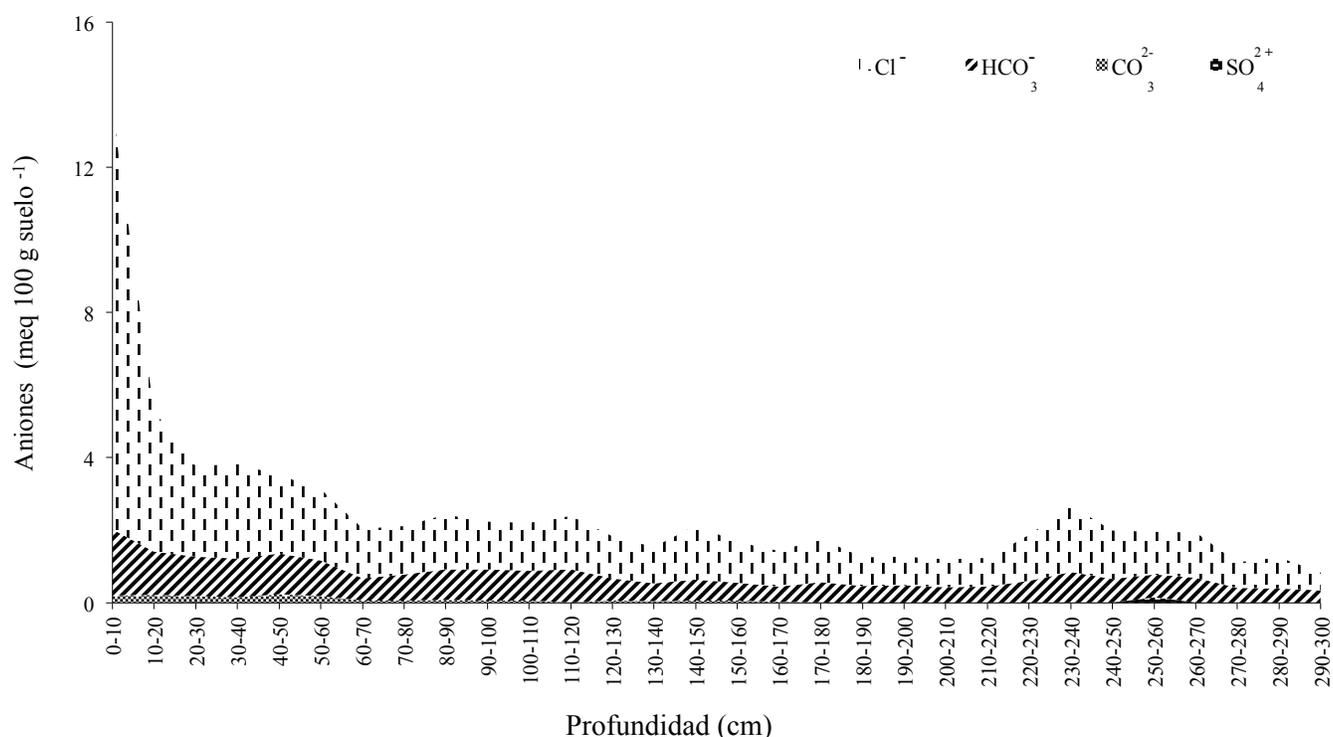


Figura 4. Composición de aniones en el extracto de saturación del suelo en estudio, Xochimilco, México, D. F.

de profundidad, punto adyacente al acuñaamiento de ceniza la cual disminuyó su lixiviación. La solubilidad del sulfato es alta (268 g L^{-1}) a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que su capacidad de combinación con otros iones como el sodio, calcio, magnesio o potasio es casi espontánea (Szabolcs, 1989) por lo que forman sales altamente solubles y móviles en el suelo (Ortega y Velázquez, 2000), lo cual explica que sus valores más altos se presentaran en el rango de los 0 a 200 cm. Durante el proceso de lixiviación cuando el agua en el perfil del suelo se satura con sales en los horizontes superiores, ésta es desplazada hacia los horizontes inferiores, transformándola en soluciones sobresaturadas (Ramos *et al.*, 2011).

La determinación de las bases intercambiables, mostró la siguiente proporción: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$, (Cuadro 3) donde el sodio intercambiable mantuvo la mayor concentración (36.80 a $9.40 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ de suelo) en el rango de 0 a 80 cm de profundidad, a partir de la cual disminuyó, en los 160 cm aumentó a 11.40 a $16.40 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ de suelo y después disminuyó abruptamente, presentando los valores más bajos a 300 cm de profundidad (10.20 a $3.80 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ de

suelo). Por el contrario, la concentración de magnesio aumentó con la profundidad hasta los 120 cm, excepto en aquellos puntos donde varía la composición de los sedimentos donde mostraron valores menores, entre 130 y 300 cm de profundidad la concentración disminuyó (17.20 a $4.80 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ de suelo). Respecto a calcio y potasio, presentaron valores de 1.60 y $2.34 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ de suelo, respectivamente, los cuales se mantuvieron sin cambios significativos en su concentración a través de todo el perfil.

Los análisis de residuo seco evaporado (RSE) mostraron que la mayor concentración de coloides disueltos ($35\ 132 \text{ mg L}^{-1}$) están en los primeros 30 cm y disminuyen a los 100 cm de profundidad (7820 mg L^{-1}), posteriormente a los 110 cm la concentración aumenta (8120 a 8568 mg L^{-1}) hasta los 130 cm para finalmente disminuir, un comportamiento similar ocurre con el RSC. Es probable que el acuñaamiento de ceniza que se encuentra a los 110 cm de profundidad influencia la variabilidad de las concentraciones debido a que la compresibilidad de estas y las diferencias en su clase textural dificultan la conductividad hidráulica (Tobón *et al.*, 2004).

Cuadro 2. Propiedades químicas de un suelo Antrosol Salico Terrico en el Distrito de Riego, Xochimilco, Distrito Federal.

Profundidad cm	pH	CE mS cm ⁻¹	Cationes				Total	Aniones				Total	RSE	RSC	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻				
			- - - meq 100 g suelo ⁻¹ - - -							- - - meq 100 g suelo ⁻¹ - - -				- - mg L ⁻¹ - -	
0-10	8.28	34.19	2.61	4.15	36.89	1.37	45.02	0.19	1.83	11.58	0.0111	13.6117	35132	30156	
0-20	8.19	10.22	0.53	2.45	19.68	0.67	23.34	0.21	1.18	3.88	0.0133	5.2902	17508	15144	
20-30	8.44	11.30	0.76	1.62	13.50	0.43	16.31	0.17	1.08	2.50	0.0245	3.7636	12192	10444	
30-40	8.45	12.22	0.76	2.04	12.32	0.38	15.49	0.14	1.07	2.61	0.0084	3.8376	11388	9652	
40-50	8.32	11.39	0.98	2.19	11.07	0.32	14.57	0.22	1.12	2.17	0.0107	3.5257	10288	8540	
50-60	8.31	10.15	0.87	2.11	8.65	0.23	11.86	0.18	0.98	1.97	0.0063	3.1356	8136	6660	
60-70	8.32	8.11	0.76	1.55	7.00	0.19	9.48	0.07	0.61	1.36	0.0050	2.0496	6772	5500	
70-80	8.24	8.47	0.76	1.89	7.34	0.19	10.17	0.06	0.71	1.33	0.0053	2.1141	7448	5876	
80-90	8.35	7.97	0.72	1.77	7.00	0.18	9.68	0.07	0.85	1.51	0.0067	2.4386	6836	5448	
90-100	8.27	8.21	0.83	1.85	7.70	0.20	10.58	0.06	0.85	1.31	0.0051	2.2319	7820	6168	
100-110	8.21	8.96	0.83	2.00	7.99	0.20	11.02	0.06	0.82	1.31	0.0050	2.1998	8120	6364	
110-120	8.11	9.21	0.83	2.19	8.23	0.19	11.44	0.00	0.92	1.48	0.0066	2.4036	8436	6672	
120-130	8.06	8.26	1.06	2.04	8.66	0.21	11.96	0.06	0.62	1.15	0.0057	1.8281	8568	7120	
130-140	8.06	11.11	1.32	2.19	11.12	0.26	14.90	0.05	0.49	0.99	0.0054	1.5314	8112	7284	
140-150	8.10	10.65	1.06	2.45	9.84	0.24	13.59	0.06	0.57	1.50	0.0063	2.1353	7704	7856	
150-160	8.11	8.39	0.79	1.70	7.20	0.17	9.87	0.05	0.50	1.12	0.0050	1.6801	7192	5760	
160-170	7.98	7.75	0.72	1.51	6.76	0.16	9.15	0.02	0.42	0.99	0.0039	1.4340	6672	5312	
170-180	8.07	7.12	0.68	1.32	6.27	0.15	8.42	0.00	0.58	1.18	0.0044	1.7637	6076	4844	
180-190	7.69	7.70	0.79	1.47	6.76	0.17	9.19	0.00	0.47	0.79	0.0041	1.2589	6684	5368	
190-200	7.95	6.55	0.64	1.32	5.70	0.15	7.81	0.00	0.48	0.79	0.0034	1.2702	5684	4616	
200-210	7.93	6.52	0.68	1.13	6.04	0.16	8.01	0.00	0.42	0.79	0.0035	1.2103	5480	4580	
210-220	8.00	6.49	0.60	1.13	5.72	0.15	7.61	0.00	0.44	0.79	0.0034	1.2343	5760	4680	
220-230	7.95	7.94	0.79	1.51	8.85	0.22	11.38	0.00	0.61	1.25	0.0065	1.8635	8476	7052	
230-240	8.00	7.58	0.83	1.21	9.10	0.25	11.39	0.00	0.84	1.82	0.0086	2.6764	8840	7196	
240-250	8.00	7.49	0.83	1.55	7.70	0.20	10.28	0.00	0.66	1.32	0.0069	1.9924	7416	5964	
250-260	8.08	7.43	0.72	1.40	7.37	0.19	9.68	0.00	0.64	1.18	0.1428	1.9647	6972	5696	
260-270	8.05	7.51	0.76	1.13	7.03	0.17	9.09	0.00	0.68	1.26	0.0057	1.9415	6440	5304	
270-280	8.20	7.58	0.72	1.17	7.27	0.18	9.34	0.00	0.41	0.71	0.0035	1.1221	6360	5224	
280-290	8.14	7.98	0.72	1.17	7.29	0.18	9.36	0.00	0.40	0.85	0.0034	1.2532	6672	5496	
290-300	8.04	6.94	0.76	1.10	6.13	0.16	8.14	0.00	0.34	0.49	0.0021	0.8386	5944	4768	

CE = conductividad eléctrica; RSE = residuo seco evaporado; RSC = residuo seco calcinado.

Cuadro 3. Bases intercambiables de un suelo Antrosol Salico Terrico en el Distrito de Riego, Xochimilco, Distrito Federal.

Profundidad	Cationes				Total	Cationes			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
cm	----- meq 100 g suelo ⁻¹ -----					----- % -----			
0-10	1.60	4.00	36.80	2.34	44.74	3.58	8.94	82.25	5.2302
0-20	1.60	8.40	24.00	2.02	36.02	4.44	23.32	66.63	5.6080
20-30	2.00	6.40	18.80	1.88	29.08	6.88	22.01	64.65	6.4649
30-40	2.40	11.60	16.40	1.72	32.12	7.47	36.11	51.06	5.3549
40-50	3.20	14.00	13.60	1.48	32.28	9.91	43.37	42.13	4.5849
50-60	1.60	16.00	16.60	1.34	35.54	4.50	45.02	46.71	3.7704
60-70	1.20	9.60	11.40	1.18	23.38	5.13	41.06	48.76	5.0470
70-80	1.20	7.20	9.40	0.74	18.54	6.47	38.83	50.70	3.9914
80-90	2.00	10.00	11.40	0.78	24.18	8.27	41.36	47.15	3.2258
90-100	1.60	15.20	13.60	1.36	31.76	5.04	47.86	42.82	4.2821
100-110	1.20	18.40	13.80	1.28	34.68	3.46	53.06	39.79	3.6909
110-120	2.00	17.60	14.40	1.22	35.22	5.68	49.97	40.89	3.4639
120-130	2.00	17.20	15.80	1.28	36.28	5.51	47.41	43.55	3.5281
130-140	2.00	15.60	16.20	1.34	35.14	5.69	44.39	46.10	3.8133
140-150	1.60	15.20	17.60	1.38	35.78	4.47	42.48	49.19	3.8569
150-160	2.00	11.60	16.40	1.48	31.48	6.35	36.85	52.10	4.7014
160-170	2.00	15.20	10.00	1.06	28.26	7.08	53.79	35.39	3.7509
170-180	2.00	13.60	11.00	1.10	27.70	7.22	49.10	39.71	3.9711
180-190	2.00	11.20	10.20	1.14	24.54	8.15	45.64	41.56	4.6455
190-200	2.80	11.20	9.40	1.12	24.52	11.42	45.68	38.34	4.5677
200-210	2.00	10.00	10.20	1.30	23.50	8.51	42.55	43.40	5.5319
210-220	2.40	12.80	9.40	1.42	26.02	9.22	49.19	36.13	5.4573
220-230	2.00	10.40	9.40	1.46	23.26	8.60	44.71	40.41	6.2769
230-240	1.20	9.20	7.60	1.20	19.20	6.25	47.92	39.58	6.2500
240-250	0.80	8.00	6.40	0.94	16.14	4.96	49.57	39.65	5.8240
250-260	1.60	6.80	7.60	1.10	17.10	9.36	39.77	44.44	6.4327
260-270	1.20	4.80	6.00	0.82	12.82	9.36	37.44	46.80	6.3963
270-280	1.60	4.40	7.00	0.88	13.88	11.53	31.70	50.43	6.3401
280-290	1.20	4.80	5.40	0.78	12.18	9.85	39.41	44.33	6.4039
290-300	1.20	4.80	3.80	0.78	10.58	11.34	45.37	35.92	7.3724

CONCLUSIONES

- El análisis haloquímico mostró variaciones en la distribución vertical de sus concentraciones iónicas, las cuales se relacionan con la fluctuación del manto freático durante las estaciones secas y de lluvias.
- En el presente trabajo se observó que el manto freático de la zona de estudio, alcanzó una altura de 90 cm, posterior a éste (a 110 cm de profundidad) se encontró un acuñamiento de ceniza volcánica con un espesor aproximado de 40 cm. Esta capa aparentemente hidrófoba interfiere el curso de lixiviación de sales hacia horizontes inferiores, lo que la lleva a concentrarse en la capa arable (0-30 cm) como parte del ascenso capilar y desecación. Durante la época de lluvias, las sales se disuelven y la sobresaturación las lixivía hasta llegar al manto freático donde aumenta su concentración.
- Por debajo de la capa hidrófoba la migración de agua y sales es escasa lo que mantiene condiciones de hidratación, concentración y reducción mínimas y homogéneas, lo cual demuestra la propiedad semipermeable del acuñamiento, que si bien dificulta la lixiviación no la detiene por completo.
- Los análisis de densidad real, aparente, porcentaje de humedad, profundidad así como la caracterización geomorfológica de los sedimentos, mostró que éstas están relacionadas con el flujo de las sales lo que dificulta su conductividad hidráulica y su concentración.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Colegio de Postgraduados por las facilidades y el apoyo otorgado para la realización de la presente investigación.

Los autores agradecen a los revisores por sus acertadas sugerencias en la versión previa de este manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Allison, L. E., L. A. Richards y Personal del laboratorio de salinidad de los Estados Unidos de América. 1973. Determinación de las propiedades de suelos salinos y sódicos. pp. 7-35. *In*: L. E. Allison, L. A. Richards y Personal del laboratorio de salinidad de los Estados Unidos de América (eds.). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México, D. F.
- APHA (American Public Health Association). 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. Port City Press. Baltimore, MD, USA.
- Bryan, K. 1948. Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México, en relación a los cambios climáticos. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 12: 1-20.
- Chapman, H. D. y P. F. Pratt. 1973. Métodos de análisis para suelos, plantas y agua. Trillas. México, D. F.
- Coras M., P. M., R. O. Capurata y L. Diakite D. 2014. Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 537-548.
- DGCORENADER (Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural). 2006. Programa de manejo del área natural protegida con carácter de zona de conservación ecológica "Ejidotes de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco". *Gaceta Oficial del Distrito Federal.* No. 5. México, D.F.
- Díaz-Rodríguez, J. A. 2006. Suelos lacustres de la ciudad de México. *Rev. Int. Desast. Nat. Accid. Infraestruc. Civil.* 6: 111-130.
- Díaz-Rodríguez, J. A., R. Lozano-Santa Cruz, V. M. Dávila-Alcocer, E. Vallejo, and P. Girón. 1998. Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: A geotechnical perspective: Reply. *Can. Geotech. J.* 35: 600610.
- Edmunds, W. M., J. J. Carrillo-Rivera, and A. Cardona. 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *J. Hydrol.* 258: 1-24.
- IUSS Working Group WRB (International Union of Soil Sciences). 2006. World reference base for soil resources 2006. Report No. 103. FAO. Rome.
- Krasilnikov, P., Ma. C. Gutiérrez C., R. J. Ahrens, C. O. Cruz G., S. Sedov, and E. Solleiro R. 2013. The soils of México. *World Soils Book Series.* Springer. Netherlands.
- Lizcano, A, M. C. Herrera y J. C. Santamarina. 2006. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. Desast. Nat. Accident. Infraestruc. Civil* 6: 167-197.
- Lozano-García, M. S and B. Ortega-Guerrero. 1998. Late quaternary environmental changes of the central part of the Basin of Mexico; correlation between Texcoco and Chalco basins. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 99: 77-93.
- Mooser, F. 1956. Bosquejo geológico del extremo sur de la cuenca de México. 20 Congreso Geológico Internacional. Libro guía C-9: pp. 9-16. UNAM. México. D. F.
- Mooser, F. 1975. Historia geológica de la cuenca de México. pp. 738. *In*: Depto. del Distrito Federal (ed.). Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal. México, D. F.
- Ortega-Escobar, H. y M. Velázquez-Machuca. 2000. Caracterización de los suelos y aguas de la zona de chinampas de Xochimilco, D. F. México, D. F.
- Ortega-Guerreo, A., J. A. Cherry, and R. Aravena. 1997. Origin of pore water and salinity in the lacustrine aquitard overlying the regional aquifer of Mexico City. *J. Hydrol.* 197: 47-69.
- Porta C., J., R. M. López Acevedo y L. C. Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi Prensa. España.
- Ramos-Bello, R., N. E. García-Calderón, H. M. Ortega-Escobar., and P. Krasilnikov. 2011. Artificial chinampas soils of Mexico city: Their properties and salinization hazards. *J. Span. J. Soil. Sci.* 1: 70-85.
- Reyes-Ortigoza, A. L y N. E. García-Calderón. 2004. Evolución de las fracciones húmicas de suelos en la zona chinampera de la ciudad de México. *Terra Latinoamericana* 22: 3 289-298.
- Ritter, D. F., K. R. Craig, and J. R. Miller. 2002. Process geomorphology. Waveland Press. Long Grove, IL, USA.

- Rojas R., T. 1983. La agricultura chinampera: Compilación histórica. Universidad Autónoma Chapingo. México, D. F.
- Rozema, J. and H. Schat. 2013. Salt tolerance of halophytes, research questions reviewed in the perspective of saline agriculture. *Environ. Exp. Bot.* 92: 83-95.
- Santoyo, V. E., S. E. Ovando, F. Mooser y E. León. 2005. Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México. TGC. Geotecnia. México, D. F.
- Siebe, C., R. Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México, D. F.
- Solleiro-Rebolledo, E, S. Sycheva, S. Sedov, E. McClung de Tapia, Y. Rivera-Uria, C. Salcido-Bercovich, and A. Kuznetsova. 2011. Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes. *Quarter. Int.* 233: 40-52
- Szabolcs, I. 1989. Salt affected soils. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Tarback, E. J., F. K. Lutgens y D. Tasa. 2005. Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. Prentice Hall. España.
- Targulian, V. O. and P. V. Krasilnikov. 2007. Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71: 373-381.
- Tobón, J. I., D. E. Arias y M. Jaramillo. 2004. Propiedades físicas e hidráulicas de las cenizas volcánicas en la terraza de Llanogrande (Rionegro, Antioquia). *Dyna* 71: 1-10
- Tricart, J. 1985. Pro-lagos: Los lagos del eje neovolcánico de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Ziegler, K., J. C. C. Hsieh, O. A. Chadwick, E. F. Kelly, D. M. Hendricks, and S. M. Savin. 2003. Halloysite as a kinetically controlled end product of arid-zone basalt weathering. *Chem. Geol.* 202: 461-478.