

Propiedades físicas y químicas del suelo urbano del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México

Physical and chemical properties of the urban soil in the San Juan de Aragon Park, Mexico City

Luz de Lourdes Saavedra-Romero^{1,†} , Dionicio Alvarado-Rosales¹ ,
Tomás Martínez-Trinidad²  y Patricia Hernández-de la Rosa² 

¹ Postgrado en Fitosanidad-Fitopatología, ² Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México- Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

† Autora para correspondencia (saavedra.luz@colpos.mx)

RESUMEN

Ante la falta de estudios sobre suelos urbanos en México, en el presente trabajo se evaluaron ocho propiedades físicas y químicas empleadas por el Indicador Condición de Suelo del FIA (Programa Nacional de Inventario y Análisis Forestal, de Estados Unidos), para determinar la calidad de los suelos y su papel en el desarrollo de las especies arbóreas del Bosque de San Juan de Aragón. Las propiedades evaluadas y analizadas en términos horizontales y verticales, fueron: pH, conductividad eléctrica, contenido de sales, textura, densidad aparente, y porcentajes de materia orgánica, carbono orgánico y espacio poroso. Se colectaron 96 muestras de suelo sobre 28 sitios de muestreo de 0.1 ha, a tres profundidades, 0-5, 5-10 y 10-15 cm. El pH promedio del suelo fue 7.2; conductividad eléctrica, 0.51 dS m⁻¹; densidad aparente, 1.02 g cm⁻³; espacio poroso, 61.84%; sales disueltas totales, 327.20 mg L⁻¹; materia orgánica, 3.6% y carbono orgánico, 2.63%, así como una clase textural franca. Los suelos del área de estudio presentaron variabilidad vertical para densidad aparente, espacio poroso, contenido de materia orgánica, carbono orgánico, conductividad eléctrica y sales solubles, y fueron relativamente homogéneos en sentido horizontal. Con excepción de la materia orgánica, el resto de las propiedades presentaron valores aceptables para el buen desarrollo de las diferentes especies arbóreas presentes en el bosque e identificadas en estudios previos. La medición de las propiedades

evaluadas, permitió obtener un panorama real sobre la capacidad de este suelo urbano para funcionar como soporte adecuado en el desarrollo de especies leñosas.

Palabras clave: densidad aparente, materia orgánica, pH, textura.

SUMMARY

In view of the lack of studies on urban soils in Mexico, this paper evaluated eight physical and chemical properties used by the Soil Condition Indicator of the FIA (Forest Inventory and Analysis National Program, United States), to determine the quality of the soils and its role in the development of tree species present in the San Juan de Aragon Park. The properties evaluated and analyzed in horizontal and vertical terms were: pH, electrical conductivity, salt content, texture, bulk density, and percentages of organic matter, organic carbon and porous space. 96 soil samples were collected over 28 sampling sites of 0.1 ha, at three depths, 0-5, 5-10 and 10-15 cm. The average soil pH was 7.2; electrical conductivity, 0.51 dS m⁻¹; bulk density, 1.02 g cm⁻³; porous space, 61.84%; total dissolved salts, 327.20 mg L⁻¹; organic matter, 3.6% and organic carbon, 2.63%, as well as a frank textural class. The soils of the study area presented vertical variability for apparent density, porous space, organic matter, organic carbon, electrical conductivity, and soluble salts, and were relatively

Cita recomendada:

Saavedra-Romero, L. L., D. Alvarado-Rosales, T. Martínez-Trinidad y P. Hernández-de la Rosa. 2020. Propiedades físicas y químicas del suelo urbano del Bosque San Juan Aragón, Ciudad de México. Terra Latinoamericana 38: 529-540.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.644>

Recibido: 24 de septiembre de 2019.

Aceptado: 26 de febrero de 2020.

Publicado en Terra Latinoamericana 38: 529-540.

homogeneous horizontally. Except for organic matter, the rest of the properties presented acceptable values for good development of the tree species present. The measurement of the evaluated properties, allowed to obtain a real panorama about the ability of this urban land to function, which is adequate to support the development of woody species.

Index words: *bulk density, organic matter, soil pH, texture.*

INTRODUCCIÓN

Ante el acelerado crecimiento de la población, y en la necesidad de edificar más infraestructura, el hombre ha transformado el paisaje natural en un diferente tipo de suelo, el denominado suelo urbano (Hagan *et al.*, 2010; Beyer *et al.*, 2001). La superficie urbana está creciendo a un ritmo más rápido que cualquier otro uso de suelo (Edmondson *et al.*, 2011), y el pronóstico para el año 2030, es un incremento de 250% (Newbound *et al.*, 2010; Penížek y Rohosková, 2006), con consecuencias notables como la reducción de su calidad (Zhiyanski *et al.*, 2017) y la alteración de sus procesos de génesis (Fanning y Balluff, 1989). El suelo urbano se define como un material no consolidado, con capa superficial no-agrícola (no mayor de 50 cm de espesor) y que con el tiempo se ha formado por la mezcla, relleno o por contaminación con materiales de origen antrópico (Craul, 1999). En las últimas tres décadas, el interés por los suelos urbanos en el mundo ha aumentado (Cheng *et al.*, 2018), sin embargo, quedan por resolver muchas dudas respecto a su dinámica. El concepto general que se tiene de ellos es que poseen baja fertilidad (Pouyat *et al.*, 2007), alta heterogeneidad (vertical y horizontal) (Samson, 2017), estructura compacta (Urban, 2008a,b), pH tendientes a la alcalinidad (Demina *et al.*, 2018), regímenes de temperatura y humedad alterados (USDA, 2005), baja difusión de oxígeno (Lal y Stewart, 2018; Yang y Zhang, 2015), y enormes variaciones en la cantidad de biomasa microbiana, especialmente en las capas superiores del suelo (Demina *et al.*, 2018). Debido a que la calidad del suelo (es decir, la capacidad del suelo para funcionar), y su salud (no renovable y dinámica) no se puede medir directamente, se han propuesto como indicadores, algunas propiedades sensibles al cambio (Andrews *et al.*, 2004); desafortunadamente, no ha sido posible desarrollar una lista básica de indicadores

multipropósito (Schindelbeck *et al.*, 2008; Kinyangi, 2007) y pocas se han probado para evaluar su salud y calidad como sustrato para el desarrollo y crecimiento de especies leñosas en áreas verdes urbanas y forestales (Amacher *et al.*, 2007). Entre las propiedades más estudiadas, destacan: la densidad aparente (Urban, 2008a,b), la conductividad eléctrica y pH (Cekstere y Osvalde, 2013), textura, porcentaje de materia orgánica y porosidad (Ahad *et al.*, 2015), contenido de carbono orgánico, estabilidad de agregados y contenido de fósforo y plomo (Hagan *et al.*, 2010), así como el tamaño y la distribución de poblaciones de hongos, bacterias, algas y actinomicetos (Zhang *et al.*, 2019).

En general, la mayoría de los estudios de suelos urbanos se centran en profundidades de 0 a 30 cm (Hagan *et al.*, 2010), principalmente, por su incierto “origen”, reducido espesor, y porque las capas superficiales del suelo, concentran la mayor cantidad de raíces absorbentes en el caso de árboles urbanos (Pallardy, 2008).

Con el fin de evaluar la salud del suelo, y monitorear cambios en él a través del tiempo (Amacher *et al.*, 2007; O'Neill *et al.*, 2005), el FIA emplea el Indicador Condición de Suelo para tal propósito, lo que ha permitido publicar algunos resultados de su uso (Kolka *et al.*, 2012; Amacher y Perry, 2010). Sin embargo, su implementación requiere de ajustes para ser utilizados en distintas regiones geográficas y objetivos de estudio, como por ejemplo, las áreas verdes urbanas.

En 2008, el Bosque San Juan de Aragón fue declarado área de valor ambiental por el gobierno capitalino, y junto con el Bosque de Chapultepec conforman el 6.5% de las áreas verdes más importantes de la CDMX (SMA, 2012). Con estos antecedentes, en el presente trabajo, se evaluaron ocho propiedades físicas y químicas incluidas en el protocolo del Indicador Condición de Suelo, bajo la premisa de que los suelos urbanos del Bosque San Juan de Aragón, segundo en importancia ecológica para la Ciudad de México, no poseen la calidad necesaria para sostener el desarrollo de especies leñosas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en el parque denominado Bosque San Juan de Aragón (BSJA), Ciudad de México (CDMX). Localizado en la Delegación Gustavo A.

Madero (19° 27' 32" N y 99° 04' 17" O), es considerado un bosque urbano inducido (ALDF, 2013), con clima seco-templado, temperatura media anual de 16.5 °C y precipitación total anual de 586 mm. Aleatoriamente, se seleccionaron 10 de las 14 secciones que conforman al bosque, identificadas con los caracteres B, C, E, F, G, H, J, K, L y M, y empleando una intensidad de muestreo de 2.5% (Schreuder *et al.*, 2004), se establecieron 28 sitios de muestreo circulares de 0.1 ha (1000 m²) (r = 17.84 m) (Figura 1), en los cuales, se determinó la diversidad y estructura del arbolado (Saavedra-Romero *et al.*, 2019).

Procedimientos de Campo

En la evaluación se consideraron ocho propiedades por su importancia en la caracterización de suelos urbanos. Con el propósito de obtener muestras de suelo equitativas y representativas del área de estudio, se utilizó una barrena formada por tres cilindros consecutivos que permitió obtener muestras fraccionadas a profundidades de 0-5, 5-10 y 10 a 15 cm. Se colectaron cuatro muestras en las secciones C y H del bosque (las de mayor dimensión), y tres en el resto

de las secciones. El número de muestras colectadas fue 32, y 96 submuestras en total, las cuales fueron embolsadas, etiquetadas y transportadas al laboratorio de Patología Forestal para su análisis. El muestreo se realizó durante el mes de abril y mayo, 2013.

Análisis de Laboratorio

Las muestras de suelo se procesaron empleando métodos estandarizados para las siguientes propiedades: Densidad aparente (DA) y espacio poroso (EP) (Birkeland, 1993), pH (relación suelo:agua, 1:2.5), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y clase textural (CT) (Jackson, 1999; Bouyoucos, 1962). Las variables porcentaje de carbono orgánico (CO) y la concentración de sales disueltas totales (SDT) se calcularon teóricamente para incluirlas en el análisis. Las fórmulas empleadas, fueron: %CO = [0.724*(%MO)] (Chaudhari *et al.*, 2013; Hillel, 2004) y SDT = [640*(CE)] (Smith y Doran, 1996).

Análisis de Datos

Se realizó con el programa estadístico SAS versión 9.4, empleando estadística paramétrica una vez que se comprobó la normalidad de los datos. Se empleó la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para determinar diferencias. El análisis horizontal se realizó con el promedio de las tres profundidades de muestreo (0-5, 5-10 y 10-15 cm). Cabe destacar que, en estudios previos, se determinó la diversidad y estructura del estrato arbóreo (Saavedra-Romero *et al.*, 2019), resultados que fueron abordados posteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis General de las Propiedades Físicas y Químicas

Los valores de pH oscilaron de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos (Cuadro 1), no obstante, en sustratos tan heterogéneos como el suelo, los valores entre 6.5 y 7.5 se pueden calificar como neutros (Samson *et al.*, 2017). A pesar de que, para muchos, el pH es esencial en la química del suelo y factor primario de su fertilidad, la función del pH va más allá del simple suministro de nutrientes para la planta; otros procesos como las tasas de intemperismo y humificación, así como la actividad de poblaciones microbianas también

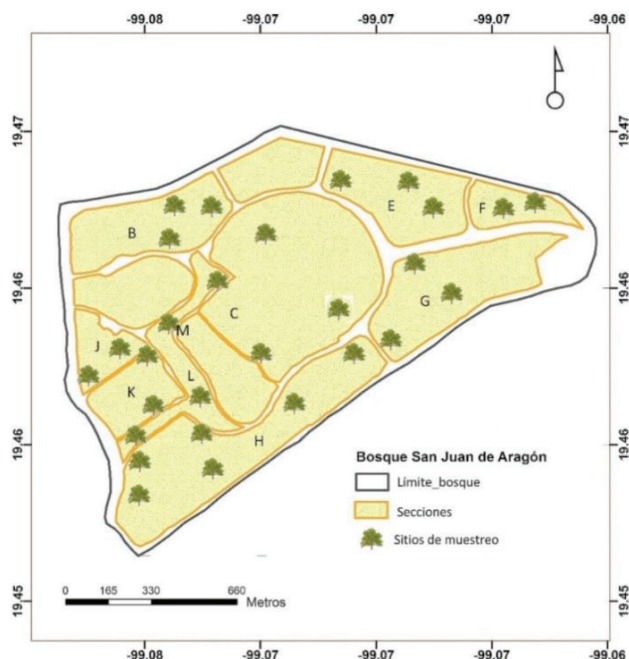


Figura 1. Polígono del Bosque San Juan de Aragón, CDMX (Saavedra-Romero *et al.*, 2019).

Figure 1. Polygon of the San Juan de Aragon Park, CDMX (Saavedra-Romero *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas y químicas evaluadas en los suelos urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México (n = 96).**Table 1. Descriptive statistics of the physical and chemical properties evaluated in the urban soils of the San Juan de Aragon Park, Mexico City (n = 96).**

Variable	Mínimo	Media	Máximo	E.E [†]	L.I. [‡]	L.S. [‡]
pH (1:2.5)	6.61	7.20	7.67	0.02	7.16	7.25
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.28	1.02	1.67	0.03	0.95	1.07
Espacio poroso (%)	36.98	61.84	89.43	1.19	59.48	64.19
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.19	0.51	1.03	0.02	0.46	0.56
Sales disueltas totales (mg L ⁻¹)	121.60	327.20	659.20	15.93	295.57	358.83
Materia orgánica (%)	0.62	3.63	7.69	0.22	3.20	4.07
Carbono orgánico (%)	0.45	2.63	5.57	0.16	2.32	2.94
Arcilla (%)	4.36	24.10	44.72	0.93	22.25	25.94
Limo (%)	22.00	42.24	62.00	0.90	40.46	44.03
Arena (%)	13.28	33.55	51.64	0.97	31.62	35.48

[†] E.E. Error estándar. [‡] Límites de confianza inferior (L.I.) y superior (L.S.) al 95%.

[†] E.E. Standard error. [‡] Lower confidence limits (L.I.) and higher (L.S.) to 95%.

pueden verse afectados (Yang y Zhang, 2015; Neina, 2019), con consecuentes afectaciones en la salud y crecimiento de especies arbóreas (Pregitzer *et al.*, 2016).

Estudios con especies forestales y árboles urbanos indican que un pH de 5.2 a 7.0 es óptimo para su crecimiento; teóricamente, en este intervalo los árboles no evidencian síntomas de toxicidad por metales pesados, y disponen de una reserva apropiada de macro y micronutrientes (Amacher *et al.*, 2007; Costello *et al.*, 2003), con posibles deficiencias quizás de P y Zn (Samson, 2017). Si bien, en la mayoría de las condiciones (edáficas y geográficas), el efecto del pH del suelo tiene efecto sobre la nutrición vegetal (Neina, 2019), también la sensibilidad o tolerancia de las especies, desempeña un papel crucial en su desarrollo y crecimiento. En términos generales, y a partir de estudios previos sobre diversidad y estructura del BSJA, Saavedra-Romero *et al.* (2019), identificaron las siguientes especies arbóreas (o similares), mismas que pueden presentar buen desarrollo en los siguientes intervalos de pH: (a) *Cupressus sempervirens* L., *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, *Tamarix parvifolia* (DC) y *Schinus molle* L. prosperan en suelos con pH <5.5 y >8.5 (muy ácido a muy alcalino); (b) *Eucalyptus camaldulensis* (Dhnh) en pH= 6.5-7.5 (ligeramente ácido a ligeramente alcalino), y (c) *Acacia retinodes* Schltdl., *Casuarina cunninghamiana* (Miq.) y

Grevillea robusta (A. Cunn. Ex. R. Br.) en pH = 6.0-8.5 (ligeramente ácido a altamente alcalino) (Samson *et al.*, 2017; Costello *et al.*, 2003) [<http://hort.ufl.edu/database/trees-scientific.shtml>; <http://selectree.calpoly.edu>]; incluso, en suelos sódicos (pH de 8.6-10), las últimas pueden presentar buen desarrollo (Bui *et al.*, 2014; Osman, 2013).

En general, los árboles han evolucionado para prosperar en suelos con grandes variaciones en el pH; algunas especies tienen un estrecho rango en el cual crecen bien, mientras que otras pueden crecer en un amplio rango. Plantar árboles en suelos con un pH incompatible puede afectar su crecimiento y salud (Scharenbroch *et al.*, 2018), pero, tomando en cuenta el valor de pH = 7.2 registrado en los suelos del área de estudio, asumimos que no existen problemas de solubilidad y disponibilidad de nutrientes para ninguna de las especies arbóreas que ahí crecen (Saavedra-Romero *et al.*, 2019).

Generalmente, los suelos urbanos están catalogados como altamente compactados (Edmondson *et al.*, 2011), pero pocos estudios lo muestran (Jim y Ng, 2018). Para el BSJA, la densidad aparente (DA) fue cercana a 1.0, y ligeramente mayor a la de suelos orgánicos (O'Neill *et al.*, 2005) (Cuadro 2). Valores similares, y en algunos casos mayores, se reportan en suelos de áreas residenciales e institucionales de varias ciudades de Estados Unidos; en Tampa, se han obtenido

promedios de 0.59 g cm⁻³ hasta 1.33 g cm⁻³ (Hagan *et al.*, 2010), mientras que, en Florida, las densidades son mayores (Cuadro 2). De acuerdo con Hagan *et al.* (2012a,b), suelos con DA ≤ 1.33 g cm⁻³ se consideran adecuados para el desarrollo vegetal, ya que poseen menor resistencia mecánica a la penetración de raíces, y tienen excelentes tasas de infiltración; por su parte, Amacher *et al.* (2007), proponen un umbral de 1.5 g cm⁻³, concluyendo que valores superiores a este, son condicionantes de compactación. De acuerdo con el USDA (2006), un suelo con DA de 1.44 g cm⁻³, se califica como moderadamente compactado (Kozlowski *et al.*, 1991), y en estas condiciones, algunas especies arbóreas no prosperan. Por ejemplo, *Alnus rubra* Bong. y *Abies alba* Mill de dos años de edad presentan buen desarrollo en suelos con DA entre 1.32 y 1.59 g cm⁻³; sin embargo, *Picea sitchensis* (Bong.) Carr y *Tsuga canadensis* (L.) Carrière, no muestran el mismo desempeño (Pritchett y Fisher, 1987). De acuerdo con Trowbridge y Bassuk (2004), las DA superiores a las que puede penetrar una raíz afectan de manera inmediata el volumen de suelo utilizable por la planta.

La circulación de peatones, vehículos automotores y equipo de mantenimiento dentro de las áreas verdes, alteran drásticamente las propiedades del suelo; a medida que las partículas del suelo se comprimen por el desarrollo de dichas actividades, la cantidad de poros y la actividad y penetración de raíces también se reducen (Scheyer y Hipple, 2005). Los macroporos (> 50 μm) son los más afectados, disminuyendo en tamaño, afectando en consecuencia las tasas de infiltración y el intercambio de gases (Pallardy, 2008). En el presente

estudio, el espacio poroso (EP) osciló de 57.97 a 65.41%. Suelos urbanos de India, China y Estados Unidos, presentan valores similares a los del BSJA (Cuadro 2). Jim y Ng (2018) mencionan que un espacio poroso >50% es el umbral óptimo para el crecimiento vegetal; suelos con esta cualidad, presentan menor resistencia a la penetración de raíces y la diversidad de microorganismos se ha observado que es mayor (Ropher y Ophel-Keller, 1997). Los estudios de Zheng *et al.* (2017), mencionan que el aumento en la riqueza de especies arbóreas, puede producir cambios en la densidad aparente del suelo, por ende, en la porosidad, siendo esta mayor en la capa superficial del suelo (0-10 cm), es posible, por lo tanto, que la diversidad arbórea del BSJA y la densidad de plantación en sus diferentes secciones ejerzan el mismo efecto (Duan *et al.*, 2019; Saavedra-Romero *et al.*, 2019).

La conductividad eléctrica (CE) y sales disueltas totales (SDT) proporcionaron un panorama sobre el grado de “salinidad” de los suelos del BSJA; la primera, osciló de 0.46 a 0.56 dS m⁻¹, y la segunda, de 295.57 a 358.83 mg L⁻¹ (Cuadro 1). Para el adecuado funcionamiento y crecimiento arbóreo, el suelo debe contener una mezcla de sales mínimamente indispensables; sin embargo, cuando algunas alcanzan concentraciones altas, pueden ocasionar entre otros daños, inhibición osmótica (menor absorción de agua), alteración de procesos enzimáticos, y toxicidad en árboles deciduos por la alta concentración de metales pesados (Piczak *et al.*, 2003); algunas especies sensibles a estas alteraciones son el fresno (*Fraxinus* sp.) y el sicomoro (*Acer pseudoplatanus* L.) (Pallardy, 2008).

Cuadro 2. Rangos de densidad aparente y espacio poroso en distintos suelos urbanos del mundo.
Table 2. Ranges of bulk density and porous space in different urban soils of the world.

Ciudad/País	DA	EP	Referencia
	g cm ⁻³	%	
Kupwara, India	1.24-1.46	42.86-51.18	Ahad <i>et al.</i> (2015)
Coimbatore, India	1.26-1.55	39.22-48.57	Chaudhari <i>et al.</i> (2013)
Florida, E.U.	1.30- 2.20	16.98-50.04†	Hagan <i>et al.</i> (2012a,b)
Gainesville, E.U.	1.01-1.52	42.64-61.88†	Hagan <i>et al.</i> (2012a,b)
Tampa, E.U.	0.59-1.33	61.50-77.73†	Hagan <i>et al.</i> (2010)
California, E.U.	0.79-1.39	47.54-70.18†	Shestak y Busse (2005)
Hong-Kong, China	1.14-2.16	18.49-56.98	Jim y Ng (2018)

† Valores calculados con base a Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio (1990).

† Values calculated based on Ortiz-Villanueva and Ortiz-Solorio (1990).

Con base al carácter tolerante/sensible de las especies arbóreas a las sales del suelo, valores de conductividad eléctrica $< 2.0 \text{ dS m}^{-1}$ (450 mg L^{-1} de sales solubles), se califican como insignificantes (Equiza *et al.*, 2017; Amacher *et al.*, 2000), aunque algunas especies son sensibles incluso a esas concentraciones (Hillel, 2004). De acuerdo con el USDA (2006), un suelo con más de 600 mg L^{-1} de sales, se considera impactado, y con más de 1000 mg L^{-1} , severamente impactado. Con base en los resultados, se concluye que el contenido de sales y de conductividad eléctrica de los suelos del BSJA, se encuentran dentro de límites aceptables para el desarrollo de especies leñosas.

La materia orgánica (MO), es un factor clave en la capacidad de los suelos para mantener la productividad biológica, la calidad ambiental y la salud de las plantas (Mao *et al.*, 2014); y junto con el carbono orgánico (CO), son de los mayores componentes del suelo y la principal fuente energética de microorganismos (Boul *et al.*, 2011). En el BSJA, se determinó un contenido de MO que osciló de 3.20 a 4.07%, y 2.32 a 2.94% para el CO (Cuadro 1), estos valores, en general, son menores a los reportados en suelos urbanos de Miami-Dade con un porcentaje de 9.5, en Gainesville de 3.8%, y de 4.8% en Tampa (Hagan *et al.*, 2012a,b). Los valores reportados para Kupwara, India, fueron más bajos, con 1.04% de MO y 0.57% de CO (Ahad *et al.*, 2015). Según Schindelbeck *et al.* (2008), 5.4% de MO en suelo se considera excelente, 2.3% es bajo, mientras que suelos con menos de 1%, se clasifican con baja fertilidad (USDA, 2006). Con estos antecedentes, los suelos del BSJA se califican con fertilidad moderada, lo cual podría generar problemas de disponibilidad de nutrientes esenciales para la planta y microorganismos asociados.

En lo que respecta a la fracción mineral, las arcillas conformaron el 23.92%, los limos el 42.62% y las arenas el 33.35%. La literatura reporta que los suelos con un contenido de arcilla $> 50\%$ y $>75\%$ de arena, pueden en el corto plazo presentar problemas de compactación, especialmente en áreas de uso intensivo (USDA, 2006). El BSJA, a pesar de ser un área de uso constante, los niveles de estas dos fracciones minerales fueron normales con una clase textural dominante franca. Estos suelos de acuerdo con Amacher *et al.* (2007), son adecuados para soportar el desarrollo de especies forestales debido a que poseen suficientes

reservas de carbono y mejoran ciertas propiedades físicas como la densidad aparente (Riestra *et al.*, 2012).

Análisis Horizontal de las Propiedades Evaluadas

El pH, CE y SDT, presentaron diferencias significativas ($P < 0.0001$) entre secciones. El pH más bajo fue para la sección K, localizada al suroeste del bosque, y valores ligeramente alcalinos para el resto de las secciones (Cuadro 3). Para la CE y SDT los rangos oscilaron de 0.27 a 0.82 dS m^{-1} y de 172.8 a 526.93 mg L^{-1} , respectivamente. Las secciones E, G, H, J y K con las CE más bajas (0.27 a 0.51 dS m^{-1}) y para las restantes, de 0.57 a 0.82 dS m^{-1} . Las SDT presentaron el mismo comportamiento. La variación horizontal (o espacial) respecto a la concentración de sales, ha sido estudiada por Bazihizina *et al.* (2012) y Rogers *et al.* (2005), concluyendo que puede variar drásticamente a través de los sitios de muestreo, así como en profundidad, y aunque se encuentran dentro de límites aceptables para el desarrollo de especies arbóreas, se logró mediante observaciones de campo, identificar una ligera acumulación de sales en la superficie del suelo en la sección G, las cuales debido a la microtopografía del terreno, pudieron ser lixiviadas por escorrentías superficiales. La textura del suelo, y los cambios en la cobertura vegetal también pueden modificar la química del suelo, por lo que la acumulación de sales no es homogénea en todo el terreno (Zhang *et al.*, 2014).

La DA, EP y %MO, no presentaron diferencias significativas horizontales. La primera, presentó valores de 0.87 a 1.14 g cm^{-3} , la segunda, de 57.12 a 67.29% , mientras que la MO de 2.84 a 4.73% . Estos resultados, indican que no todos los suelos urbanos presentan variaciones espaciales (Shestak y Busse, 2005). Respecto a la textura, la fracción arenosa, mostró una variación porcentual mayor que limos y arcillas. El mayor porcentaje de arenas fue para la sección F (al noreste), con 48.55% y, significativamente distinta ($P < 0.0001$) a las secciones B, E, G, H, J y K. Finalmente, en el caso de limos, la sección H (sur) obtuvo un valor de 32% , significativamente menor a la K cuyo valor fue de 53.18% . En términos generales, se identificaron tres clases texturales en los suelos del BSJA; los francos en el 70% de los suelos muestreados, los franco-limosos en un 10% , y la Franca-arcillosa, en el 20% (Cuadro 3).

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de los suelos por sección del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México.
Table 3. Physical and chemical properties of the soils by section of the San Juan de Aragon Park, Mexico City.

Sección	pH	DA	EP	CE	SDT	MO	CO	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
	1:2.5	g cm ⁻³	%	dS m ⁻¹	mg L ⁻¹	-	-	%	-	-	-
B	7.05b	1.07	59.54	0.57abcd	364.80abcd	3.36	1.95	38.72e	45.09cd	16.19a	Franco-arcilloso
C	7.19b	1.03	61.16	0.82a	524.80a	4.73	2.75	22.00abc	41.33bc	36.37c	Franco
E	7.27b	1.13	57.15	0.27d	172.80d	2.84	1.65	28.72cd	41.95bc	29.33b	Franco
F	7.10b	1.14	57.12	0.66f	422.40f	3.22	1.87	18.00ab	33.45ab	48.55e	Franco
G	7.23b	0.94	64.69	0.29cd	185.60cd	3.84	2.23	23.33abcd	46.91cd	29.76b	Franco
H	7.32b	0.87	67.29	0.31bcd	198.40bcd	3.73	2.16	31.45de	32.00a	36.55c	Franco-arcilloso
J	7.34b	0.96	63.77	0.41bcd	262.40bcd	4.22	2.45	14.91a	49.33cd	35.76c	Franco
K	6.86a	1.03	61.10	0.51abcd	326.40abcd	3.39	1.96	24.28bcd	53.18d	21.41a	Franco-limoso
L	7.30b	0.92	65.10	0.63abc	403.20abc	3.62	2.10	22.00abc	35.33ab	42.67d	Franco
M	7.20b	1.06	59.87	0.61abcd	390.40abcd	3.00	1.74	15.81ab	47.57cd	36.61c	Franco

DA = densidad aparente; EP = espacio poroso; CE = conductividad eléctrica; SDT = sales disueltas totales; MO = materia orgánica; CO = carbono orgánico. Letras distintas en las columnas, indican diferencias significativas ($P < 0.0001$). DA, EP, MO y CO fueron significativamente iguales entre secciones. DA = bulk density; EP = porous space; CE = electrical conductivity; SDT = total dissolved salts; MO = organic matter; CO = organic carbon. Different letters in the columns indicate significant differences ($P < 0.0001$). DA, EP, MO and CO were significantly the same between sections.

De acuerdo con Chaudhari *et al.* (2013) y Scheyer y Hipple (2005), el "suelo ideal" posee, humedad suficiente, aire y materia orgánica que satisfagan las demandas de la vegetación, también, adecuado espacio poroso y baja densidad aparente. Un balance en el contenido de arcillas, limos y arenas también es recomendable. Con base en los resultados, todas las secciones del área de estudio están provistas de niveles adecuados de espacio poroso, densidad aparente, conductividad eléctrica y una textura balanceada. Aunque pueden existir diversas explicaciones para el comportamiento relativamente homogéneo en las propiedades a lo largo del gradiente espacial, dos de ellas son las que consideramos más acertadas. La primera, que a pesar de su categoría urbana, los suelos del BSJA, conservan propiedades de origen, y segundo, si fueron creados artificialmente, los materiales empleados en su formación fueron de regular calidad.

Análisis Vertical de las Propiedades Físicas y Químicas

El pH fue uniforme a lo largo del gradiente (5, 10 y 15 cm) (Figura 2A), mientras que la DA se incrementó con la profundidad hasta 1.27 g cm⁻³ en promedio, siendo menor en los primeros 5 cm (0.70 g cm⁻³) (Figura 2B). Un incremento en la DA con la profundidad, fue obtenido

en suelos forestales del centro y norte de Finlandia, debido principalmente, a la reducción en los niveles de materia orgánica (Osman, 2013). El %EP presentó un comportamiento inverso, es decir, mayor en la capa superficial, con 73.47% y menor en profundidad, con 52.03% (Figura 2C). Algunos estudios que evalúan los efectos de la compactación, concluyen que el efecto del tránsito continuo (peatonal o vehicular), se ve usualmente confinado a los 10 primeros centímetros del suelo, pero, el mayor efecto puede ocurrir hasta los 20 cm por debajo de la superficie (Harris *et al.*, 2003). Favorablemente, la DA y el EP registrados en el BSJA se encontraron dentro de lo normal (Binkley y Fisher, 2000); sin embargo, un proceso lento de compactación podría estar ocurriendo en sitios específicos como veredas no autorizadas, áreas de picnic y áreas de ejercicios de bajo impacto, incentivados por la frecuencia del evento, y el contenido de humedad del suelo.

La CE y las SDT presentaron los valores más altos en la superficie (0 a 5 cm), y menores a mayor profundidad (Figura 2DE). En lo que respecta al %MO y %CO, fueron significativamente distintos en las tres profundidades muestreadas ($P < 0.0001$) (Figura 2F). La materia orgánica mostró un comportamiento decreciente de la superficie hacia la capa de 10 a 15 cm, con valores de 6.11, 3.43 y 1.24%, respectivamente.

Caso similar ocurrió con el carbono orgánico cuyos porcentajes fueron 3.59, 1.99 y 0.72%; cabe destacar que la materia orgánica presentó un contenido de carbono orgánico >56%, valor teórico común en suelos urbanos y forestales (Toor y Shober, 2009). Finalmente, respecto a la composición de la fracción mineral (limos, arenas y arcillas), no se observaron diferencias significativas entre las distintas profundidades de muestreo. Según

Sieghardt *et al.* (2005), la variabilidad de los suelos urbanos, es generalmente, mayor comparada con suelos de áreas naturales, debido a que sus procesos de "formación" son más rápidos (en muchos casos, artificiales), más intensas las actividades de manejo, y el clima urbano sumamente cambiante. Sin embargo, en el BSJA, los suelos fueron relativamente homogéneos, con excepción de algunas propiedades.

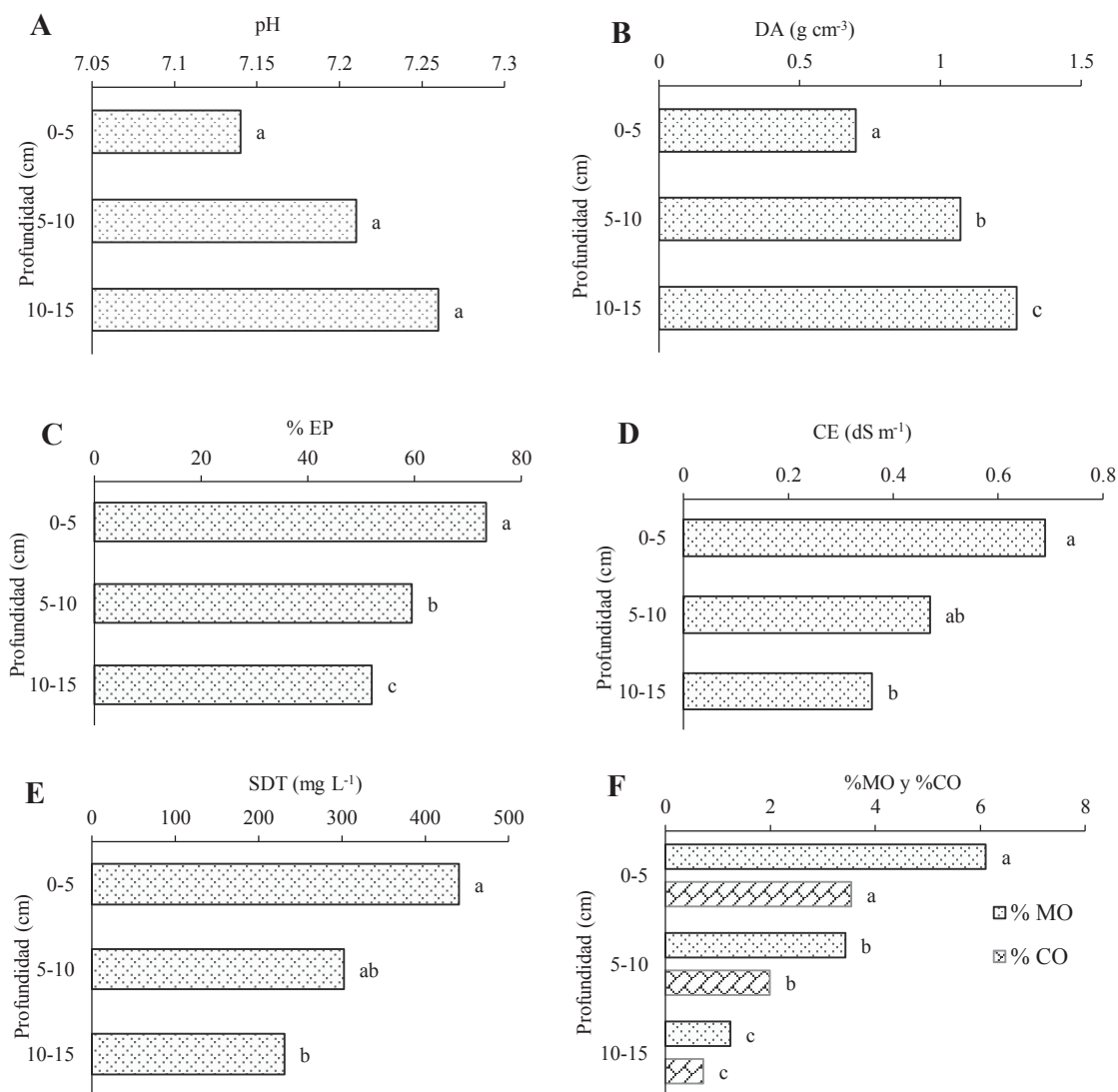


Figura 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos del Bosque San Juan de Aragón y su comportamiento vertical. A = pH; B = densidad aparente (DA); C = espacio poroso (EP); D = conductividad eléctrica (CE); E = sales disueltas totales (SDT); F = porcentajes de materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO). Letras distintas indican diferencias significativas con $P < 0.0001$.

Figure 2. Physical and chemical properties of the soils of the San Juan de Aragon Park and their vertical behavior. A = pH; B = bulk density (DA); C = porous space (EP); D = electrical conductivity (CE); E = total dissolved salts (SDT); F = percentages of organic matter (OM) and organic carbon (CO). Different letters indicate significant differences with $P < 0.0001$.

Si bien, las funciones del suelo son diversas, no les hemos conferido la importancia que merecen. En aras de la producción alimentaria, vivienda, y la obtención de productos forestales, hemos modificado el entorno, y comprometido también la diversidad biológica (Scheyer y Hipple, 2005). La función del suelo urbano, no es muy distinta de los suelos forestales; sin embargo, a la fecha su calidad (función) como sustrato y soporte físico para el desarrollo de árboles urbanos no está del todo clara, pero las propiedades del suelo que afectan directa o indirectamente el desarrollo de la raíz, y su desempeño en la adquisición de agua y nutrimentos en calidad y cantidad, son quizás las que han cobrado mayor impacto. Finalmente, con base en las propiedades evaluadas en el presente trabajo, y de acuerdo con Hillel (2004), se concluye que, la relación densidad aparente-conductividad eléctrica *versus* la actividad de enraizamiento de la planta, debe tomar la forma “menos es mejor”, ya que la actividad de la raíz disminuye cuando la densidad aparente excede cierto valor, misma que también varía con la clase textural del suelo en cuestión, es decir, mientras una densidad aparente de 1.4 g cm⁻³ restringe la actividad de enraizamiento en un suelos arcilloso, en un suelo arenoso la restricción ocurre hasta un valor de 1.7 g cm⁻³. Por otra parte, a medida que aumenta la conductividad eléctrica, el efecto sobre la actividad de enraizamiento y crecimiento vegetal depende de la sensibilidad de la especie, pero un umbral propuesto en suelos urbanos y forestales, es de 2 dS m⁻¹. Respecto a la textura franca, franca-arcillosa y franca- limosa de los suelos del BSJA y los niveles moderados de MO cuantificados, hace suponer, que no existen problemas de abasto de agua, y de macro y micronutrimentos esenciales para las especies leñosas que ahí se desarrollan.

CONCLUSIONES

- Las propiedades físicas y químicas evaluadas en los suelos del Bosque San Juan de Aragón, CDMX, se encontraron dentro de límites favorables para soportar el desarrollo de árboles. El pH se clasificó de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. La conductividad eléctrica y la concentración de sales presentaron valores bajos y favorables, con ligeras restricciones quizás para especies sensibles. El contenido de materia orgánica presentó niveles moderados, al igual que el carbono orgánico. La textura franca es ideal, pues teóricamente proporciona adecuados niveles de nutrimentos

y retienen niveles de humedad suficientes. Los suelos no mostraron marcada variabilidad horizontal como suele referirse en la literatura de suelos urbanos.

- La conductividad eléctrica, contenido de sales, densidad aparente, materia orgánica y carbono orgánico mostraron variación respecto a la profundidad. La medición de las propiedades evaluadas, permitió obtener un panorama real sobre la capacidad de este suelo urbano para funcionar como soporte adecuado en el desarrollo de especies leñosas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada al primer autor para la realización de estudios de posgrado. A los líderes de los Indicadores de Salud del Servicio Forestal de Estados Unidos de América del Norte (USDA-FS).

LITERATURA CITADA

- Ahad, T., T. A. Kanth, and S. Nabi. 2015. Soil bulk density as relate to texture, organic matter content and porosity in Kandi soils of District Kupwara (Kashmir Valley), India. *Int. J. Sci. Res.* 4: 198-200. doi:10.15373/22778179.
- ALDF (Asamblea Legislativa del Distrito Federal). 2013. Creación de un fideicomiso a favor de Bosque de Aragón. Asamblea Legislativa del Distrito Federal. VI Legislatura. 7 p. [http://www.aldf.gob.mx/archivo-fc8fd12e9df4c8a4b2a0216227f463e8.pdf] (Consulta: agosto 15, 2015).
- Amacher, M. C. and C. H. Perry. 2010. The soil indicator of forest health in the Forest Inventory and Analysis Program. pp. 83-108. *In*: D. Page-Dumroese, D. Neary, and C. Trettin. (eds.). Scientific background for soil monitoring on National Forests and Rangelands: workshop proceedings; April 29-30, 2008; Denver, CO. Proc. RMRS-P-59. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA.
- Amacher, M. C., K. P. O'Neil, and C. H. Perry. 2007. Soil vital signs: A new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA. doi: https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-65.
- Amacher, J. K., R. Koenig, and B. Kitchen. 2000. Salinity and plant tolerance. All archived publications. Paper 43. 3: 1-3.
- Andrews, S. S., D. L. Karlen, and C. A. Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 68: 1945-1962. doi: https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945.
- Bazihizina, N., E. G. Barrett-Lennard, and T. D. Colmer. 2012. Plant responses to heterogeneous salinity: growth of the halophyte *Atriplex nummularia* is determined by the root-weighted mean salinity of the root zone. *J Exp. Bot.* 63: 6347-6358. doi: https://doi.org/10.1093/jxb/ers302.

- Beyer, L., P. Kahle, H. Kretschmer, and O. Wu. 2001. Soil organic matter composition of man-impacted urban sites in North Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 164: 359-364. doi: 10.1002/1522-2624(200108)164:4<359::AID-JPLN359>3.0.CO;2-M.
- Birkeland, P. W. 1993. *Pedology, weathering, and geomorphological research.* Oxford University Press. UK. ISBN-10: 0195017307.
- Binkley, D. and R. F. Fisher. 2000. *Ecology and management of forest soils.* John Wiley and Sons. Hoboken, NJ, USA. ISBN: 1118422325.
- Boul, S. W., R. J. Southars, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2011. *Soil genesis and classification.* Wiley-Blackwell. Ames, IA, USA. Print ISBN: 9780813807690.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54: 464-465. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>.
- Bui, E. N., A. Thornhill, and J. T. Miller. 2014. Salt- and alkaline-tolerance are linked in *Acacia*. *Biol. Lett.* 10: 20140278. doi: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0278>.
- Cekstere, G. and A. Osvalde. 2013. A study of chemical characteristics of soil in relation to street trees status in Riga (Latvia). *Urban For. Urban Green.* 12: 69-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.09.004>.
- Chaudhari, P. R., D. V. Ahire, V. D. Ahire, M. Chkravarty, and S. Maity. 2013. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. *Int. J. Sci. Res. Publ.* 3: 1-8.
- Cheng, Z., V. Vasenev, T. Muth, K. H. Kim, and R. K. Shaw. 2018. Advances in urban soils science-SUITMA 9. International Congress Special Issue. *Soil Sci.* 183: 121-122. doi: 10.1097/SS.0000000000000241.
- Costello, L. R., E. J. Perry, N. F. Matheny, J. M. Henry, and P. M. Geisel. 2003. *Abiotic disorders of landscape plants. A diagnostic guide.* UC Agriculture and Natural Resources. Oakland, CA, USA. ISBN: 1879906589.
- Craul, P. J. 1999. *Urban soils. Applications and practices.* John Wiley and Sons. Hoboken, NJ, USA. ISBN-13: 978-0471189039.
- Demina, S., V. Vasenev, K. Ivashchenko, N. Ananyeva, V. Plyushchikov, R. Hajiaghayeva, and E. Dovletyarova. 2018. Microbial properties of urban soils with different land-use history in New Moscow. *Soil Sci.* 183: 132-140. doi: 10.1097/SS.0000000000000240.
- Duan, A., J. Lei, X. Hu, J. Zhang, H. Du, X. Zhang, W. Guo, and J. Sun. 2019. Effects of planting density on soil bulk density, pH and nutrients of unthinned Chinese fir mature stands in south subtropical region of China. *Forests* 10: 351. doi: <https://doi.org/10.3390/f10040351>.
- Edmondson, J. L., Z. G. Davies, S. A. McCormack, K. J. Gaston, and J. R. Leake. 2011. Are soils in urban ecosystems compacted? *Biol. Lett.* 7: 771-774. doi: 10.1098/rsbl.2011.0260.
- Equiza, M. A., M. Calvo-Polanco, D. Cirelli, J. Señorans, M. Wartenbe, C. Saunders, and J. J. Zwiazek. 2017. Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada. *Urban For. Urban Green.* 21: 16-28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.11.003>.
- Fanning, D. S. and M. C. Balluff. 1989. *Soil: morphology, genesis and classification.* John Wiley and Sons. Hoboken, NJ, USA. ISBN: 978-0-471-89248-9.
- Hagan, D., F. Escobedo, G. Toor, C. Dobbs, and M. Andreu. 2010. Urban soils in Tampa: Key physical and chemical properties in an urban and urbanizing watershed. *Soil Water Sci. Dep. SL 324:* 1-4.
- Hagan, D., C. Dobbs, N. Timilsina, F. Escobedo, G. S. Toor, and M. Andreu. 2012a. Anthropogenic effects on the physical and chemical properties of subtropical coastal urban soils. *Soil Use Manage.* 28: 78-88. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00379.x>.
- Hagan, D., F. Escobedo, G. Toor, H. Mayer, J. Klein, and C. Dobbs. 2012b. Soil bulk density and organic matter in urban Miami-Dade County, Florida. *Soil Water Sci. Dep. SL 327:1-5.* doi: 10.13140/RG.2.1.1867.6720.
- Harris, R. W., J. R. Clark, N. P. Matheny, and V. M. Harris. 2003. *Arboriculture. Integrated management of landscape trees, shrubs and vines.* Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA. ISBN-10: 0130888826.
- Hillel, D. 2004. *Encyclopedia of soils in the environment.* Academic Press. Vol. III. Columbia University. New York, NY, USA. eBook ISBN: 9780080547954.
- Jackson, M. L. 1999. *Análisis químico de suelos.* Omega. Barcelona, España. ISBN10: 8428202613.
- Jim, C. Y. and Y. Y. Ng. 2018. Porosity of roadside soil as indicator of edaphic quality for tree planting. *Ecol. Eng.* 120: 364-374. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.06.016>.
- Kinyangi, J. 2007. Soil health and soil quality: A review. <https://hdl.handle.net/1813/66582> (Consulta: noviembre 10, 2014).
- Kolka, R., A. Steber, K. Brooks, C. H. Perry, and M. Powers. 2012. Relationships between soil compaction and harvest season, soil texture, and landscape position for Aspen forest. *North. J. Appl. For.* 29: 21-25. doi: <https://doi.org/10.5849/njaf.10-039>.
- Kozłowski, T. T., P. J. Kramer, and S. G. Pallardy. 1991. *The physiological ecology of woody plants.* Academic Press. New York, NY, USA. ISBN: 0323138004.
- Lal, R. and B. A. Stewart. 2018. *Urban soils. Advances in soil science.* CRC Press. Boca Raton, FL, USA. ISBN-10: 1498770096.
- Mao, Y., S. Sang, S. Liu, and J. Jia. 2014. Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China. *CR Biol.* 337: 332-337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2014.02.008>.
- Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Appl. Environ. Soil Sci.* Article ID 5794869. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>.
- Newbound, M., M. A. McCarthy, and T. Lebel. 2010. Fungi and the urban environment: A review. *Lands. Urban Plan.* 96: 138-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.04.005>.
- O'Neill, K. P., M. C. Amacher, and C. H. Perry. 2005. *Soil as an indicator of forest health: A guide to the collection, analysis, and interpretation of soil indicator data in the Forest Inventory and Analysis Program.* Gen. Tech. Rep. NC-258. USDA Forest Service North Central Research Station. St. Paul, MN, USA. doi: <https://doi.org/10.2737/NC-GTR-258>.
- Ortiz-Villanueva, B. y C. A. Ortiz-Solorio. 1990. *Edafoología.* Universidad Autónoma Chapingo, Depto. de Suelos. Chapingo, Edo. de México, México.
- Osman, K. T. 2013. *Forest soils: Properties and management.* Springer. Switzerland. ISBN-10: 3319025406.

- Pallardy, S. G. 2008. *Physiology of woody plants*. Academic Press. New York, NY, USA.
- Penizek, V. and M. Rohosková. 2006. Urban soils: A part of man's environment. Chapter 26. pp. 213-220. *In*: K. C. Donnelly, L. H. Cizmas (eds.). *Environmental health in central and eastern Europe*. Springer. Dordrecht, Netherlands. Online ISBN: 978-1-4020-4845-6.
- Piczak, K., A. Lesniewicz, and W. Zyrnicki. 2003. Metal concentration in deciduous tree leaves from urban areas in Poland. *Environ Monit Assess* 86: 273-287. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1024076504099>.
- Pouyat, R. V., I. D. Yesilonis, J. Russell-Anelli, and N. K. Neerchal. 2007. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1010-1019. doi: 10.2136/sssaj2006.0164.
- Pregitzer, C. C., N. F. Sonti, and R. A. Hallett. 2016. Variability in urban soils influences the health and growth of native tree seedlings. *Ecol. Restor.* 34: 106-116. doi: <https://doi.org/10.3368/er.34.2.106>.
- Pritchett, W. L. and R. F. Fisher. 1987. *Properties and management of forest soils*. John Wiley and Sons. Hoboken, NJ, USA. ISBN-10: 0471895725.
- Riestra, D., E. Noellemeyer, and A. Quiroga. 2012. Soil texture and forest species condition the effect of afforestation on soil quality parameters. *Soil Sci.* 177: 279-287. doi: 10.1097/SS.0b013e318245d0fe.
- Rogers, M. E., A. D. Craig, R. E. Munns, T. D. Colmer, P. G. H. Nichols, C. V. Malcolm, E. G. Barrett-Lennard, A. J. Brown, W. S. Semple, P. M. Evans, K. Cowley, S. J. Hughes, R. Snowball, S. J. Bennett, G. C. Sweeney, B. S. Dear, and M. A. Ewing. 2005. The potential for developing fodder plants for the salt-affected areas of southern and eastern Australia: An overview. *Aust. J. Exp. Agric.* 45: 301-329. doi: <https://doi.org/10.1071/EA04020>.
- Ropher, M. M. and K. M. Ophel-Keller. 1997. Soil microflora as bioindicator of soil health. 157-178. *In*: C. E. Pankhurst, B. M. Doube, V. V. S. R. Gupta (eds.). *Biological indicators of soil health*. CAB International. UK. ISBN: 0851991580.
- Saavedra-Romero, L. L., P. Hernández-de la Rosa, D. Alvarado-Rosales, T. Martínez-Trinidad y J. Villa-Castillo. 2019. Diversidad, estructura arbórea e índice de valor de importancia en un bosque urbano de la Ciudad de México. *Polibotánica* 47: 25-37. doi: <http://dx.doi.org/10.18387/polibotanica.47.3>.
- Samson, R. 2017. Introduction: Urban trees as environmental engineers. pp. 3-5. *In*: D. Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter, G. Sanesi, and R. Alonso del Amo (eds.). *The urban forest. Cultivating green infrastructure for people and the environment*. Springer. Switzerland. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9_1.
- Samson, R., T. F. Ningal, A. Tiwary, R. Grote, S. Fares, H. Saaroni, J. A. Hiemstra, M. Zhiyanski, U. Vilhar, P. Cariñanos, L. Järvi, A. Przybysz, M. Moretti, and N. Zürcher. 2017. Species-specific information for enhancing ecosystem services. Chapter 12. pp. 111-144. *In*: D. Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter, G. Sanesi, and R. Alonso del Amo. (eds.). *The urban forest. Cultivating green infrastructure for people and the environment*. Springer. Switzerland. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9_12.
- Scharenbroch, B. C., K. Fite, E. Kramer, and R. Uhlig. 2018. Pedogenic processes and urban tree health in engineered urban soils in Boston, Massachusetts, USA. *Soil Sci.* 183: 159-167. doi: 10.1097/SS.0000000000000231.
- Scheyer, J. M. and K. W. Hipple. 2005. *Urban soil primer*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center (<http://soils.usda.gov/use>). Lincoln, NE, USA.
- Schindelbeck, R. R., H. M. Van Es, G. S. Abawi, D. W. Wolfe, T. L. Whitlow, B. K. Gugino, O. J. Idowu, and B. N. Moebius-Clune. 2008. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Lands. Urban Plan.* 88: 73-80. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.006.
- Schreuder, H. T., R. Ernst, and H. Ramírez-Maldonado. 2004. *Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-126. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA.
- Shestak, C. J. and M. D. Busse. 2005. Compaction alters physical but not biological indices of soil health. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 236-246. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0236>.
- Sieghardt, M., E. Mursch-Radlgruber, E. Paoletti, E. Couenberg, A. Dimitrakopoulos, F. Rego, A. Hatzistathis, and T. Barfoed. 2005. The abiotic urban environment: Impact of urban growing conditions on urban vegetation. pp. 281-323. *In*: C. C. K. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, and J. Schipperijn (eds.). *Urban forest and trees*. Springer. Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X_12.
- SMA (Secretaría del Medio Ambiente). 2012. *Los bosques urbanos de Chapultepec y San Juan de Aragón: sitios emblemáticos de importancia socioambiental*. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. México.
- Smith, J. L. and J. W. Doran. 1996. Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. pp. 169-185. *In*: J. W. Doran and A. J. Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publication No. 49. Madison, WI, USA.
- Toor, G. S. and A. L. Shober. 2009. *Soil and fertilizers for master gardeners: Soil organic matter and organic amendments*. UF/IFAS Extension. SL273.
- Trowbridge, P. J. and N. L. Bassuk. 2004. *Trees in the urban landscapes*. John Wiley and Sons. Hoboken, NJ, USA. ISBN-10: 0471392464.
- Urban, J. R. 2008a. *Urban soils. Part 1: Understanding compaction*. International Society of Arboriculture, Champaign, IL, USA.
- Urban, J. R. 2008b. *Urban soils. Part 2: Measuring compaction*. International Society of Arboriculture, Champaign, IL, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2005. *Urban forestry manual*. USDA Forest Service. Athens, GA, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2006. *Urban watershed forestry manual. Part 3. Urban tree planting guide*. Third in a three-part manual series on using trees to protect and restore urban watersheds. Prepared by the Center for Watershed Protection. Newtown Square, PA, USA.
- Yang, J. L. and G. L. Zhang. 2015. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils - A review. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61: 30-46. doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>.

- Zhang, J., X. Wang, J. Wu, and D. Kumari, D. 2019. Fungal community composition analysis of 24 different urban parks in Shanghai, China. *Urban Ecosyst.* 22: 855-863. doi: <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00867-5>.
- Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, H. Hu, X. Yao, and R. Zhong. 2014. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China. *J. Arid Environ.* 104: 23-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.012>.
- Zheng, X., X. Wei, and S. Zhang. 2017. Tree species diversity and identity effects on soil properties in the Huoditang area of the Qinling Mountains, China. *Ecosphere* 8: e01732. doi: <https://doi.org/10.1002/ecs2.1732>.
- Zhiyanski, M., M. Sokolovska, M. Glushkova, U. Vilhar, and L. Lozanova. 2017. Soil quality. pp. 49-58. *In*: D. Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter, G. Sanesi, and R. Alonso del Amo (eds.). *The urban forest. Cultivating green infrastructure for people and the environment.* Springer. Switzerland. ISBN: 978-3-319-50280-9.