

# Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación

## *Physical processes of soil in Pedregal de San Angel ecological reserve: attributes for conservation*

Iván Castellanos Vargas<sup>1‡</sup>, Norma E. García Calderón<sup>2,3</sup> y Zenón Cano Santana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Interacciones y Procesos Ecológicos. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n Ciudad Universitaria. 04510 Coyoacán, Cd. de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (icv@ciencias.unam.mx)

<sup>2</sup> Laboratorio de Edafología "Nicolás Aguilera". Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n Ciudad Universitaria. 04510 Coyoacán, Cd. de México, México.

<sup>3</sup> Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México campus Juriquilla. Boulevard Juriquilla 3001. 76230. Juriquilla, Querétaro, México (Adscripción académica actual).

### RESUMEN

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU) alberga una fracción del derrame original de lava del volcán Xitle y actualmente el suelo y la comunidad vegetal son afectados por la fragmentación del paisaje, el depósito de residuos de relleno (como cascajo y otros materiales) y las construcciones irregulares. Se realizó una descripción de las principales propiedades físicas del suelo en sitios con topografía contrastante (planos abiertos conservados y perturbados, grietas y hondonadas). Se encontró un efecto significativo de la topografía sobre las propiedades edáficas. La materia orgánica mostró correlaciones positivas con la porosidad, la arcilla y la humedad; y mostró correlaciones negativas con la densidad aparente y real, la compactación, la acidez y el contenido de arena. El porcentaje de materia orgánica fue el atributo más importante para la clasificación y el ordenamiento canónico de los sitios. Los planos abiertos perturbados siguieron una trayectoria edafogénica diferente de los sitios conservados y asemejan Urbanosoles. Se sugiere la implementación de estrategias encaminadas a lograr su restauración ecológica. La clasificación del suelo de esta reserva corresponde a tres órdenes probables: 1) Entisol háplico, por la edad geológica de su deposición y los procesos de pedogénesis en curso; 2) Leptosol lítico vítrico, por la recurrencia de afloramientos rocosos lávicos de origen magmático y 3) Andosol vítrico por la naturaleza de su material parental y predominancia de arenas. Se concluye que el suelo de la REPSA-CU es incipiente y actualmente

los horizontes de diagnóstico están en proceso de desarrollo. La importancia ambiental de su suelo radica en su capacidad de filtración y retención de agua; su porosidad y compactación le permiten ser un banco de semillas y hábitat de diversas especies de insectos. La fragilidad de los agregados edáficos y la predominancia textural de arena representaron un factor latente de erosión.

**Palabras clave:** porosidad, restauración ecológica, textura, Xitle.

### SUMMARY

The Pedregal de San Angel Ecological Reserve at Ciudad Universitaria (PSAER-CU) has a fraction of the original lava spill of Xitle volcano and currently the soil and plant community are affected by the landscape fragmentation, construction waste filler (such as rubble and other materials) and irregular constructions. A description of the main physical properties of soil in sites with contrasting topography (open preserved and disturbed planes, rifts and hollows) was made. A significant effect of topography on edaphic properties was found. Organic matter fraction showed positive correlations with the percentages fractions of porosity, clay and moisture, and also showed negative correlations with the bulk and particle densities values, compaction, acidity and sand content. The percentage of organic matter was the most important attribute for the analysis classification of sites. The disturbed open plots followed a different edaphogenic path from the conserved sites and resembled Urbanosols.

#### Cita recomendada:

Castellanos Vargas, I., N. E. García Calderón y Z. Cano Santana. 2017. Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana* 35: 51-64.

Recibido: octubre de 2016. Aceptado: diciembre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 51-64.

It is suggested the implementation of strategies aimed at achieving its ecological restoration. The soil classification corresponds to three probable orders: 1) Haplic Entisol by the recent geological age of deposition and currently underway pedogenesis processes; 2) Vitric Lithic Leptosol by the recurrence of magmatic rock outcrops and 3) Vitric Andosol by the nature of the parent material and textural predominance of sands. It is concluded that the soil of the PSAER-CU is incipient and currently the diagnostic horizons are in development process. Soil environmental importance lies in its capacity of water filtration and retention; its porosity and compaction allow it to be a seed bank and habitat of diverse insect species. Fragility of edaphic aggregates and the textural predominance of sand represented a latent erosion factor.

**Index words:** *porosity, ecological restoration, texture, Xitle.*

## INTRODUCCIÓN

El Suelo de Conservación Ecológica se define como la fracción edáfica en riesgo de pérdida, alteración o destrucción que posee importancia ambiental ya que proporciona servicios ecosistémicos invaluable que incrementan la calidad de vida para las personas dentro del entorno urbano, por ejemplo permiten la filtración de agua y recarga de mantos freáticos (Bullock *et al.*, 2011; GDF, 2012). El suelo de conservación ha estado permanentemente amenazado por factores tales como: el crecimiento desordenado de la ciudad; la presencia de asentamientos humanos irregulares y el desarrollo inmobiliario carente de permisos, que contribuye a urbanizar y poblar las zonas rurales. Los efectos negativos palpables tras la pérdida del suelo de conservación son: 1) la sobreexplotación de los mantos acuíferos, 2) los daños a la cubierta vegetal (pérdida por fragmentación), 3) la contaminación de suelos adyacentes y del agua, 4) la deforestación y erosión, y 5) la pérdida de la biodiversidad (Bullock *et al.*, 2011).

Una de las áreas de mayor vulnerabilidad ambiental en la Ciudad de México es la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (que en lo sucesivo será referida como REPSA-CU) es afectada primordialmente por la fragmentación, el depósito de residuos de construcción empleados como relleno (cascajo y otros materiales), las construcciones y los asentamientos irregulares (Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>;

Lot y Cano-Santana, 2009). Los primeros análisis fisicoquímicos enfocados a la descripción general del suelo del Pedregal de San Ángel se atribuyen a Rzedowski (1954), actualmente el estudio del suelo de la REPSA-CU ha pasado inadvertido, por lo que no se cuenta con una identificación y clasificación edáfica que sea concluyente. Por estas razones, se plantearon los siguientes objetivos: 1) realizar una descripción de las principales propiedades físicas del suelo en los sitios con topografía contrastante; 2) identificar los sitios prioritarios de esta reserva para restaurar su suelo y 3) argumentar sobre su valor como suelo de conservación, considerando los beneficios que ofrece y los riesgos de alteración que experimenta.

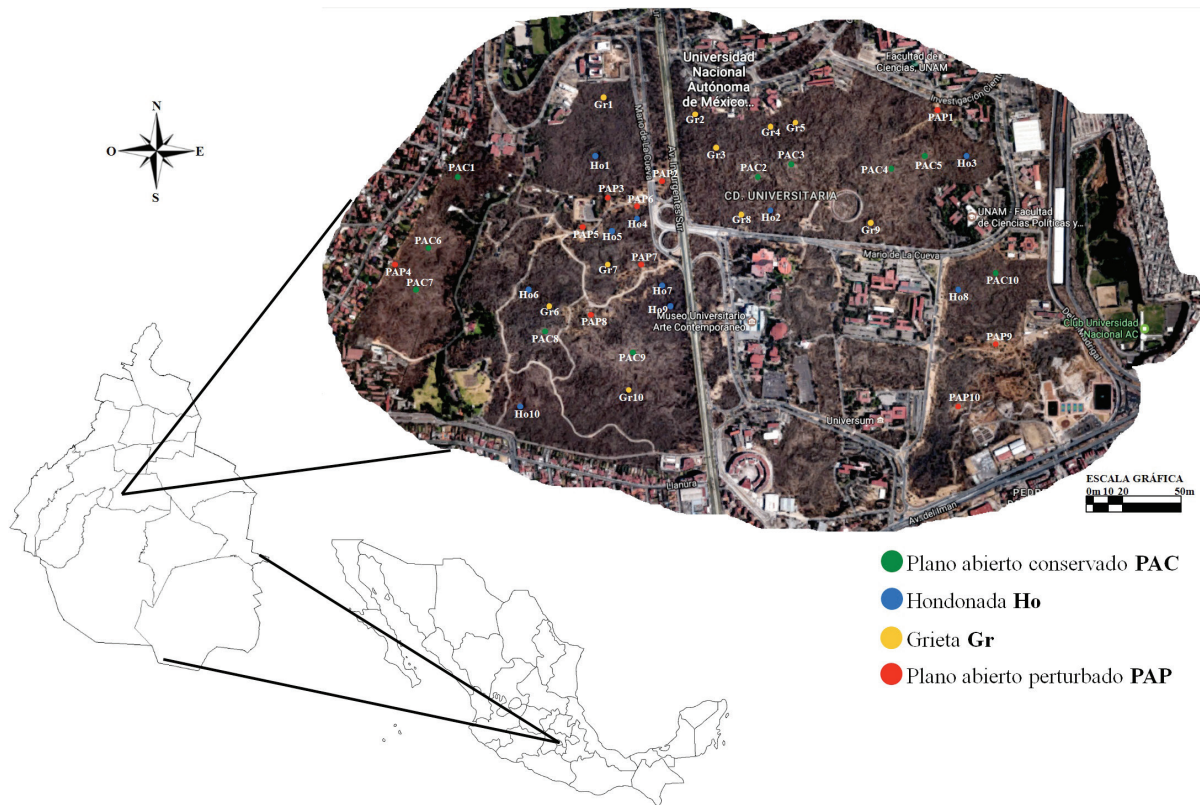
Las hipótesis que se plantearon en este trabajo se enlistan a continuación: 1) si la topografía del sustrato basáltico de la REPSA-CU es contrastante y determina la formación del suelo; entonces se encontrarán diferencias significativas entre las propiedades físicas de los sitios. 2) Si la acumulación del suelo es diferencial en los sitios con topografía contrastante, y ello promueve el crecimiento de plantas con diferente fisonomía; entonces se espera encontrar mayores niveles de materia orgánica y de acidez en las grietas y las hondonadas. Finalmente, 3) se espera encontrar mayor similitud edáfica entre los sitios conservados, en comparación con los sitios perturbados; y esto contribuirá a identificar los sitios con potencial para la conservación y para la restauración ecológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de Estudio

El estudio se realizó en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel ubicada en el *campus* principal de Ciudad Universitaria a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de México. La REPSA-CU ocupa un área de 237.3 ha, se localiza al suroeste de la Cuenca del Valle de México (19° 17' N, 99° 11' O; Figura 1) y cuenta con una altitud promedio de 2300 m. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano; presenta estacionalidad marcada, la época de lluvias comprende de junio a octubre mientras que la temporada seca comprende el resto del año (de noviembre a mayo); la temperatura media anual es de 15.6 °C; la precipitación media anual es de 833 mm (Lot y Cano-Santana, 2009). De acuerdo con el trabajo de Peralta y Prado (2009), el territorio de la REPSA-CU se divide en Zonas Núcleo

<sup>1</sup> Castellanos-Vargas, I. 2001. Ecología de la oviposición de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Pyrgomorphidae) en la Reserva del Pedregal de San Ángel, México, D.F. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.



**Figura 1. Ubicación geográfica de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU).** Cada punto representa la ubicación de los sitios con topografía contrastante y las replicas que se delimitaron para la realización del análisis físico del suelo.

con vegetación altamente conservada y Zonas de Amortiguamiento con un alto grado de disturbio por el impacto humano.

El sustrato predominante en las Zonas Núcleo es un basalto gris oscuro de olivino con microcristales originado por la erupción del volcán Xitle hace aproximadamente 2000 a 1705 años (Rzedowski, 1954; Carrillo, 1995; Siebe, 2009). La lava al solidificarse formó un sustrato heterogéneo cuyo espesor varía en algunos lugares de 50 cm a 10 m; las diferencias de nivel en el terreno formaron grietas, hondonadas, sitios planos y promontorios rocosos; en ellos la acumulación del suelo es diferencial y se caracteriza por ser escaso y poco profundo (Enciso de la Vega, 1979; Álvarez *et al.*, 1982; Cano-Santana y Meave, 1996; Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009).

Por su parte, en las Zonas de Amortiguamiento es frecuente observar que el suelo está perturbado por la presencia de basura inorgánica y restos de materiales de construcción (cascajo) que se acumulan sobre el sustrato basáltico.

La vegetación de la REPSA-CU es un matorral xerófilo que comprende 377 especies de plantas que coexisten conformando una asociación denominada *Senecionetum praecosis* (Rzedowski, 1954; 1978; Castillo-Argüero *et al.*, 2007). En las Zonas de Amortiguamiento los materiales ajenos al suelo y no consolidados son invadidos por vegetación exótica, algunas de las especies que destacan en estos sitios son el pasto africano *Pennisetum clandestinum*, la higuera *Ricinus communis* y las ornamentales *Tropaeolum majus* y *Leonotis nepetifolia*.

### Técnicas de Muestreo

La selección de los sitios de muestreo se basó en dos criterios, (1) la topografía (sitios planos y abruptos) y (2) la composición de especies vegetales que en ellos se desarrolla.

Se ubicaron sitios planos abiertos conservados (PAC) dominados por el “zacatón” *Muhlenbergia robusta* (Gramineae), así como sitios planos abiertos

y perturbados (PAP) con dominancia de *Pennisetum clandestinum* (Gramineae) y se seleccionaron dos tipos de sitios abruptos: (1) grietas (Gr), que son formaciones elongadas estrechas de menos de 5 m de ancho, originadas de fracturas del basalto de longitud y profundidad variable y (2) hondonadas (Ho), formaciones geológicas resultado de la acumulación de gases desprendidos de la lava, que tienden a formar una bóveda de pocos centímetros de grosor, cuyo techo al colapsarse, origina una oquedad o depresión en el terreno, la cual tiende a adquirir forma circular de diámetros y profundidades variables (Waitz y Wittich, 1911; Wittich, 1919; Schmitter, 1953; Enciso de la Vega, 1979; Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009). Las grietas y hondonadas se caracterizaron por mostrar una vegetación arbórea y arbustiva bien desarrollada, con dominancia de *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae) y *Eupatorium petiolare* (Compositae) que les confieren a los sitios un aspecto fisonómico “cerrado”.

De los cuatro tipos de sitios se establecieron 10 réplicas y de cada uno se extrajeron 10 muestras de suelo con la ayuda de un nucleador edáfico acorde con las especificaciones de McIntyre (1967) y van Reeuwijk (2006) (2 cm de diámetro central y 5.5 cm de altura del cilindro). El nucleador se enterró a una profundidad promedio de 5 cm. El periodo de muestreo de los suelos comprendió de enero a marzo de 1999. En cada caso y previo a la extracción de la muestra, se valoró la estructura de los agregados edáficos con base en la terminología descrita en el manual de Cuanalo de la Cerda (1990) y se midió la compactación del suelo mediante un penetómetro de cono equipado con una punta de 30” y 21.5 mm de diámetro superior (marca Dickey-John Co.), previamente calibrado en kg cm<sup>-2</sup>.

### Técnicas de Análisis Edáficos

Posterior a la colecta, las muestras se procesaron de acuerdo con las técnicas de van Reeuwijk (2006): se secaron al aire, se molieron en un mortero de material inerte y se tamizaron a través de mallas con aperturas de 0.5 y 0.2 cm para extraer cuerpos ajenos a su composición granulométrica.

Las valoraciones que se realizaron a las muestras del suelo fueron:

**Color.** Su determinación se realizó para suelo seco y húmedo por el método de comparación con las tablas de Munsell (1992).

**Densidad aparente (DA).** Se evaluó por el método volumétrico diferencial del aire retenido entre las partículas del suelo (Baver *et al.*, 1980; Redondo-Arámburo, 1988; van Reeuwijk, 2006).

**Densidad real (DR).** La masa sólida real de las partículas edáficas se evaluó por el método de saturación de las muestras con agua, para el proceso se emplearon picnómetros de cristal (Baver *et al.*, 1980; Gandoy-Bernasconi, 1991; van Reeuwijk, 2006).

**Porosidad (%P).** El porcentaje de porosidad de las muestras se evaluó mediante la comparación de la DA con respecto a la DR, según lo indica la siguiente Ecuación 1:

$$\%P = \left( 1 - \left( \frac{DA}{DR} \right) \right) \times 100 \quad (1)$$

**Fracciones texturales.** Los porcentajes de arena, de limo y de arcilla se evaluaron por el principio de sedimentación gravimétrica diferencial de las partículas, para esto se empleó el método del hidrómetro de Bouyoucos (1927), el cual arroja resultados confiables en suelos dominados por arena y escasa arcilla.

**Humedad.** Se midió el contenido de humedad de 400 muestras edáficas (100 por cada tipo de sitio) obtenidas mediante nucleaciones de 100 g realizadas con cajas de Kubiena de 4 × 6 × 9 cm. El contenido de humedad edáfica se obtuvo por la diferencia de peso registrado al momento de colectar las muestras edáficas, y posterior a un periodo de 24 h de secado en estufa a 105 °C (Redondo-Arámburo, 1988; Gandoy-Bernasconi, 1991, van Reeuwijk, 2006).

**Acidez edáfica.** Se determinó en el laboratorio empleando un potenciómetro Black Zeromatic con electrodos de vidrio y calibrado con una solución buffer a pH 7. La acidez se determinó a partir de una mezcla de suelo y agua destilada hervida en relación 1:2.5 y una solución de cloruro de potasio (KCl) 1M pH 7 en la misma proporción a la empleada con agua destilada.

**Materia orgánica.** Se evaluó mediante el método de la titulación de Walkley y Black (1934) y modificado por van Reeuwijk (2006) para suelos jóvenes.

La preparación de las muestras y los análisis edáficos se realizaron bajo la supervisión técnica del personal del Laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera Herrera” del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.



## Análisis Estadístico

Con el fin de evaluar si el tipo de sitio (en función de su topografía) afecta a las características físicas del suelo se aplicaron análisis de varianza de una vía excepto en el caso del color y la estructura por tratarse de variables categóricas.

Por su parte, las características físicas expresadas como porcentajes (porosidad, textura, humedad y materia orgánica) fueron corregidas como  $x' = \arcsen \sqrt{x}$  (Zar, 2010).

Previamente a la realización de los análisis de varianza, se comprobó que la distribución numérica obtenida de cada una de las pruebas edáficas cumpliera con los supuestos de la normalidad, en caso contrario estos valores se ajustaron mediante una corrección logarítmica (Sokal y Rohlf, 1995; Zar, 2010). Con el fin de determinar las diferencias significativas entre los sitios de la REPSA-CU se aplicaron pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey. Para establecer la prioridad de los sitios que requieren restauración ecológica del suelo para fines de su conservación, se realizaron análisis de correlación múltiple entre las diez propiedades físicas edáficas cuantitativas; posteriormente con la matriz de correlación se procedió a determinar la similitud y agrupación entre las réplicas de los sitios mediante un Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) fundamentado con el criterio de máxima verosimilitud y se calculó el valor de inercia para cada variable edáfica. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete STATISTICA v.8.0 (StatSoft, 2008) bajo la supervisión técnica del personal del Laboratorio Ecología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Orígenes del Suelo

El suelo de la REPSA-CU se desarrolla sobre un manto de alteración (eluvial-coluviál) que es un resultado de la dinámica de factores físicos, químicos y biológicos que originan en su seno una incipiente diferenciación vertical que actualmente dificulta la formación y observación de los horizontes edáficos de diagnóstico.

Las etapas implicadas en la formación del suelo de la REPSA-CU son las siguientes:

**1) Fase eluvial.** Ocurre la disgregación mecánica de la roca ígnea, sucede por procesos de transformación mecánica y meteorización química del basalto que determinan la formación de un manto de alteración *in situ* (o eluvión). En esta fase, los líquenes tienen preponderancia en la litólisis de la roca volcánica (Schmitter, 1953).

**2) Fase coluvial.** En ella ocurre la meteorización química de los materiales regolíticos liberados y transportados desde otros sitios de la Cuenca de México (coluvión) que se enriquece con el aporte de arena y limo transportados por el viento (Ordóñez, 1890; Carrillo, 1995).

### Color y Estructura

De acuerdo con la clasificación de Munsell (1992), el color del suelo varía desde 7.5YR3/2 cuando está seco, hasta 10YR/4/3 cuando está húmedo. El color del suelo es pardo oscuro a muy oscuro, lo cual es indicio de una elevada cantidad de materia orgánica. La naturaleza basáltica de la composición mineralógica del suelo sugiere la existencia de una rápida meteorización capaz de formar mezclas amorfas de magnesio y olivino con escaso o nulo ordenamiento cristalino (Rzedowski, 1954; Delvigne *et al.*, 1979).

Por su parte, la estructura del suelo se caracteriza por estar débilmente desarrollada, destaca que en los sitios PAC se observaron escasos agregados subangulares frágiles de 2 mm, en los sitios abruptos (Gr y Ho) y PAP los agregados se observaron invariablemente poliédricos, con las caras planas, delgadas y delicadas; lo cual es indicio de la predominancia de la fracción arcillosa así como de la actividad de organismos como bacterias, hongos, colémbolos y lombrices cuyas secreciones mantienen unidas a las partículas edáficas (Allison, 1968; Tisdall y Oades, 1982; Muscolo *et al.*, 1999; Caesar-Tonthat, 2002; Carter, 2002; Arango *et al.*, 2009). La estructura que se observó en los agregados del suelo no favorece la diferenciación de los horizontes típicos de un perfil edáfico convencional, esto es indicio de que el suelo de la REPSA-CU es incipiente y los horizontes diagnóstico aún están en proceso de desarrollo y esto es un resultado congruente con los de Rzedowski (1954).

## Efecto de la Heterogeneidad Topográfica sobre las Propiedades Físicas del Suelo

Las propiedades físicas del suelo fueron afectadas significativamente por la topografía que adquirió el basalto al enfriarse y solidificarse en cada tipo de sitio (Cuadro 1). Este resultado es congruente con los hallazgos de Huggett (1975) y Buol *et al.* (2003) quienes reportan que la topografía y la dirección de los flujos hídricos determinan los procesos edafogénicos en ecosistemas terrestres. Santibáñez-Andrade *et al.* (2009) indican que en la REPSA-CU existen por lo menos cinco tipos de microambientes basálticos (sitios planos, oquedades, grietas, hondonadas y promontorios rocosos) los cuales constituyen una muestra representativa de la heterogeneidad geomorfológica y topográfica que presentó el Pedregal original en esta zona de la Cuenca del Valle de México.

A continuación se muestran los valores promedio de cada propiedad edáfica. En todos los casos, la medida de dispersión que se muestra es el error estándar (e.e.). **Densidad aparente (DA).** El valor promedio global de la DA fue de  $1.12 \pm 1.5 \text{ g cm}^{-3}$ . Este atributo no varió significativamente entre los sitios PAC y PAP ( $1.14$  y  $1.13 \text{ g cm}^{-3}$  respectivamente).

**Cuadro 1. Análisis de Varianza de una vía para evaluar el efecto de los sitios sobre las propiedades físicas del suelo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU). Los grados de libertad corresponden en todos los casos al número de tratamiento (tipos de sitios – 1) y a las réplicas de las muestras de cada sitio (400 muestras – 4).**

Propiedad edáfica	F	Grados de libertad	P
Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	528	3396	< 0.001
Densidad real ( $\text{g cm}^{-3}$ )	308	3396	< 0.001
% Porosidad	234	3396	< 0.001
% Arena	226.8	3396	< 0.001
% Limo	600.5	3396	< 0.001
% Arcilla	37.3	3396	< 0.001
Compactación ( $\text{kg cm}^{-2}$ )	20.5	3396	< 0.001
% Humedad	372.5	3396	< 0.001
pH $\text{H}_2\text{O}$ [1:2.5]	98.5	3396	< 0.001
pH KCl [1:2.5]	123.2	3396	< 0.001
% Materia orgánica	646.8	3396	< 0.001

Las grietas y las hondonadas registraron valores de DA significativamente más bajos  $1.11$  y  $1.09 \text{ g cm}^{-3}$  respectivamente (Cuadro 2).

**Densidad real (DR).** El valor promedio global de la DR fue de  $1.62 \pm 1.08 \text{ g cm}^{-3}$ . La DR varió desde  $1.64 \text{ g cm}^{-3}$  en los sitios PAC hasta  $1.53 \text{ g cm}^{-3}$  en el suelo de las grietas (Cuadro 2).

**Porosidad (%P).** El porcentaje de porosidad global del suelo fue de  $21.6 \pm 5.1\%$  y varió desde  $30.7\%$  en los sitios PAC hasta  $27.4\%$  en el suelo de las grietas (Cuadro 2).

Los valores de densidad (aparente y real) indican que la REPSA-CU posee suelos ligeros que se caracterizan por un alto porcentaje de porosidad. Con base en las ideas de Carter (2002) y Amer (2012), estos atributos son importantes para la filtración del agua de lluvia, así como para favorecer la recarga del manto freático y evitar el hundimiento de zonas territoriales de la Ciudad de México. Por su parte, los resultados de Vreeken-Buijs *et al.* (1998) señalan que los microartrópodos que utilizan al suelo como hábitat son un factor determinante para la distribución y tamaño de los poros edáficos. Estos autores también destacan la importancia de estos organismos para la incorporación de biomasa que favorece la filtración vertical del agua y evita la escurriencia superficial y lateral. Finalmente, la cantidad y forma espacial de los poros del suelo facilitará el desarrollo de las raíces de las plantas; y los exudados radiculares cementarán los agregados y evitarán la movilidad de las partículas edáficas (Glasbey *et al.*, 1991; Katja-aho *et al.*, 2011).

**Fracciones texturales.** El suelo de la REPSA-CU presentó textura Franca (Migajón) Arenoso-Limosa. La fracción textural predominante fue la arena ( $53.8 \pm 10.6\%$ ), seguida en orden de importancia por el limo con  $25.1 \pm 3.9\%$  y finalmente, la arcilla fue la fracción representada con el valor más bajo en la composición con  $21.5 \pm 5.1\%$ .

El porcentaje de arena varió significativamente desde  $57.9 \pm 0.26\%$  en los sitios PAP hasta un  $50.0 \pm 0.04\%$  en el suelo acumulado en las grietas (Cuadro 2). Los resultados del porcentaje de arena encontrados en los sitios PAC favorecerían la colonización de hierbas al ser sitios con alta capacidad de filtración, mientras que los valores de limo y arcilla de los sitios abruptos (Gr y Ho) favorece el desarrollo de árboles y arbustos, pues estas partículas generan microporos que retienen agua capilar y generan humedad ambiental (Amer, 2012). De acuerdo con la clasificación que menciona Castellanos

**Cuadro 2. Valores promedio de las propiedades físicas de los suelos en sitios con topografía contrastante de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU). Las letras diferentes en cada propiedad edáfica denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey con  $P < 0.05$ .**

Propiedad edáfica	Sitios			
	Plano abierto conservado	Hondonada	Grieta	Plano abierto perturbado
Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$1.14 \pm 0.09$ A	$1.09 \pm 0.07$ C	$1.11 \pm 0.06$ B	$1.13 \pm 0.01$ A
Densidad real ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$1.64 \pm 0.03$ A	$1.56 \pm 0.03$ C	$1.53 \pm 0.06$ D	$1.62 \pm 0.03$ B
% Porosidad	$30.67 \pm 0.10$ A	$29.78 \pm 0.11$ B	$27.35 \pm 0.05$ C	$29.98 \pm 0.09$ B
% Arena	$52.38 \pm 0.32$ C	$53.35 \pm 0.09$ B	$50.06 \pm 0.04$ D	$57.86 \pm 0.26$ A
% Limo	$27.20 \pm 0.17$ A	$24.99 \pm 0.04$ B	$27.57 \pm 0.06$ A	$21.09 \pm 0.14$ C
% Arcilla	$20.43 \pm 0.15$ D	$21.66 \pm 0.13$ B	$22.37 \pm 0.08$ A	$21.06 \pm 0.15$ C
Compactación ( $\text{kg cm}^{-2}$ )	$0.48 \pm 0.05$ C	$0.54 \pm 0.05$ A	$0.53 \pm 0.07$ A	$0.51 \pm 0.07$ B
% Humedad	$16.33 \pm 0.15$ C	$19.38 \pm 0.20$ B	$23.89 \pm 0.29$ A	$13.27 \pm 0.25$ D
pH ( $\text{H}_2\text{O}$ 1:2.5)	$6.11 \pm 0.02$ B	$6.15 \pm 0.04$ B	$5.34 \pm 0.02$ A	$6.05 \pm 0.05$ B
pH (KCl 1:2.5)	$5.26 \pm 0.02$ A	$5.18 \pm 0.04$ AB	$4.45 \pm 0.01$ C	$5.10 \pm 0.04$ B
% Materia orgánica	$15.55 \pm 0.10$ B	$17.83 \pm 0.09$ B	$18.97 \pm 0.09$ A	$13.44 \pm 0.09$ C

*et al.* (2000), la arena del suelo de la REPSA-CU está dentro del intervalo correspondiente a muy finas (0.5 a 0.1 mm), en tanto que el limo es grueso (0.002 a 0.49 mm). Estos datos son congruentes con los que reportó Castellanos-Vargas (2001)<sup>1</sup>, donde encontró tamaños de arena (fina a muy fina) entre 0.07 a 0.2 mm de diámetro y limo de gruesos a medios entre 0.03 a 0.006 mm y son altamente preferidos por los ortópteros para ovipositar.

Se encontraron variaciones significativas de la cantidad de limo en los diferentes ambientes estudiados. En las grietas y los sitios PAC se registraron los valores más altos de este componente textural ( $27.6 \pm 0.06$  y  $27.2 \pm 0.17\%$ , respectivamente); en tanto que en los sitios Ho y PAP se registraron valores significativamente menores  $24.9 \pm 0.04\%$  y  $21.0 \pm 0.15\%$ , respectivamente (Cuadro 2).

Las grietas mostraron contenidos de  $22.4 \pm 0.08\%$  de arcilla seguidas en orden de importancia por Ho y PAP ( $21.7 \pm 0.13$  y  $21.0 \pm 0.15\%$ , respectivamente), en los sitios PAC se registró la menor cantidad de esta fracción textural con  $20.4 \pm 0.16\%$  (Cuadro 2).

Algunos datos de García-Hernández *et al.* (2008) sugieren que la topografía de un sitio puede determinar la repartición diferencial de las partículas texturales del suelo. En las zonas altas de los lomeríos de ecosistemas áridos con suelos aluviales predominan las arenas y la velocidad de infiltración es mayor, en comparación con

las partes bajas que son ricas en arcillas depositadas por el arrastre del agua y la filtración del agua es lenta. En el estudio de la REPSA-CU se estimó la pendiente de los promontorios rocosos siendo  $\leq 10^\circ$  y carecen de acumulación de suelo (Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009) y según un modelo teórico propuesto por Soberón *et al.* (1991), el movimiento del agua por escorrentía gravimétrica sería desde las partes altas de los promontorios hacia las depresiones topográficas del basalto (sitios planos, grietas y hondonadas) en los que se depositan las partículas del suelo de manera diferencial, pues su movimiento guarda una relación con el tamaño de las partículas. Los resultados de este trabajo indican que el valor del limo en las hondonadas y las grietas varió desde 24.9 a 27.6%; mientras que la arcilla varió en estos sitios desde 21.7 a 22.4%. Finalmente, algunos datos de Castillo-Argüero *et al.* (2009) y Peralta y Prado (2009) señalan que la heterogeneidad fisonómica de la REPSA-CU es atribuible a la zonificación del suelo con distintas propiedades edáficas las cuales potencializan el crecimiento diferencial de la vegetación.

**Compactación.** El valor global de compactación de los suelos fue de  $0.51 \pm 0.10 \text{ kg cm}^{-2}$ . Los sitios con la mayor dureza edáfica fueron Ho y Gr con  $0.54 \pm 0.005$  y  $0.53 \pm 0.007 \text{ kg cm}^{-2}$ , respectivamente seguidos en orden de importancia por los PAP y PAC con  $0.51 \pm 0.007$  y  $0.48 \pm 0.005 \text{ kg cm}^{-2}$ , respectivamente (Cuadro 2).

Se apreció la escasa compactación que ofrecen los suelos de los sitios planos potencializa la movilidad de las partículas promoviendo su erosión. Mientras en los sitios PAP se observó mayor propensión a la erosión debido a que están dominados por el pasto *Pennisetum clandestinum*, que crece con estolones superficiales que fijan escasamente el suelo (Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>). Este pasto promueve la acidificación y promueve la erosión hídrica, pues para crecer necesita altos niveles de humedad edáfica (Sidari *et al.*, 2004).

**Humedad.** El valor promedio de la humedad de los suelos durante el periodo de muestreo fue de  $17.6 \pm 8.5\%$ . Las grietas registraron mayor humedad ( $23.9 \pm 0.37\%$ ) en tanto que los sitios PAP registraron el valor promedio más bajo con  $13.2 \pm 0.25\%$  (Cuadro 2). Estos resultados indican que las grietas brindan una alta retención de humedad edáfica que se traduce en la estabilidad de los agregados edáficos (Tisdall y Oades, 1982) y en el desarrollo de vegetación arbórea de aspecto fisonómico cerrado y ello conlleva a beneficios ecosistémicos como la purificación del aire y la regulación de la temperatura atmosférica en la REPSA-CU.

**Acidez edáfica.** Los suelos son moderadamente ácidos (promedio global:  $6.5 \pm 1.3$ ). La acidez edáfica de los sitios en disolución con agua a razón 1:2.5 varió desde  $6.15 \pm 0.04$  en las hondonadas hasta  $5.34 \pm 0.02$  en las grietas; por su parte en solución salina con KCl a razón 1:2.5, la acidez varió desde  $5.26 \pm 0.02$  en los sitios PAC hasta  $4.45 \pm 0.01$  en las grietas (Cuadro 2).

**Materia orgánica.** Los suelos son ricos en materia orgánica, la concentración promedio general fue de  $16.1 \pm 3.9\%$ . Los sitios con una cantidad significativamente mayor de MO fueron las grietas con  $18.9 \pm 0.09\%$  seguidas en orden de importancia por las hondonadas, los sitios PAC y PAP con  $17.8 \pm 0.09$ ;  $15.5 \pm 0.1$  y  $13.4 \pm 0.09$ , respectivamente (Cuadro 2). Los sitios planos (PAC y PAP) registraron menores niveles de humedad, de MO y de compactación en comparación con los sitios de topografía abrupta. Los sitios con mayor alcalinidad fueron las hondonadas (Ho) y los PAC y PAP; y los sitios con mayor acidez fueron las grietas (Gr).

La acidificación del suelo en la REPSA-CU se atribuye a la naturaleza química de las rocas, así como a los aportes de restos vegetales que incrementan la MO. Los resultados sugieren que la fertilidad de los suelos de la REPSA-CU puede estar en función del alto

porcentaje de MO que reciben cuando los árboles y los arbustos pierden su follaje (Castillo-Argüero *et al.*, 2007). Es probable que en los sitios con topografía accidentada existan procesos diferenciales para la síntesis de ácidos húmicos y fúlvicos, pues con base en los trabajos de Yamauchi *et al.* (1984), Piccolo (2002) y Troeh y Thompson (2005) las condiciones idóneas para su formación son la protección ante la incidencia directa de la radiación solar y del viento, así como la recurrencia de humedad ambiental, temperatura media y acción biológica de hongos y bacterias que degradan y mineralizan la MO. Para el caso de la REPSA-CU, es necesario diseñar un estudio enfocado en la caracterización química de estos importantes componentes de la fertilidad edáfica. Finalmente, se considera que la acidez del suelo de esta reserva representa un papel restrictivo para las especies vegetales que la habitan. Por ejemplo, Leary *et al.* (2006) discuten que el coeficiente de acidez/alcalinidad de los suelos volcánicos determina la diversidad de la vegetación xerófitica en las islas de Hawaii. No obstante, *Ulex europaeus* (Fabaceae) al fijar el nitrógeno atmosférico modifica la acidez del suelo, y su alta tolerancia a la escasez de humedad, le permiten invadir la comunidad vegetal y reducir su valor de diversidad.

### Trayectorias del Desarrollo Edáfico de la REPSA-CU

El análisis de correlación múltiple mostró que las diez propiedades edáficas cuantitativas establecen interacciones numéricas estrechas entre sí (Cuadro 3). El porcentaje de materia orgánica es un atributo fisicoquímico que se correlaciona significativamente con el resto de las propiedades edáficas que se evaluaron.

La MO presentó correlaciones positivas con los porcentajes de porosidad, arcilla y humedad; y a la vez correlaciones negativas con la densidad aparente y real; con los porcentajes de arena y limo, así como con la compactación y los valores de pH (Cuadro 3). Este resultado corrobora la tendencia que reportó Rzedowski (1954) sobre la importancia de la materia orgánica en el desarrollo del suelo del Pedregal; destaca el hecho que al incorporarse la MO al suelo, el pH alcanza valores más ácidos.

Con la matriz de correlación se realizó un Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) y los resultados



**Cuadro 3. Coeficientes de correlación (R) entre las propiedades edáficas del suelo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel del Pedregal de Ciudad Universitaria (REPSA-CU). Se presentan en negritas los valores significativamente diferentes de cero ( $P < 0.05$ ). DA = densidad aparente; DR = densidad real; las lecturas del pH se hicieron en disolución con agua destilada hervida relación 1:2.5 y con solución salina KCl 1N pH 7 relación 1:2.5; %MO = valor porcentual de materia orgánica.**

	DA	DR	Porosidad	Arena	Limo	Arcilla	Compactación	Humedad	pH	
									H <sub>2</sub> O	KCL
	g cm <sup>-3</sup>			%			kg cm <sup>-2</sup>	%		
DR	-0.835									
% Porosidad	0.475	-0.88								
% Arena	0.502	0.613	0.552							
% Limo	0.311	0.349	0.299	-0.913						
% Arcilla	0.618	0.798	-0.738	-0.626	-0.254					
Compactación	0.545	0.66	-0.581	-0.45	0.138	0.813				
% Humedad	0.668	0.821	-0.751	-0.803	0.642	0.691	-0.594			
pH H <sub>2</sub> O	0.064	0.247	0.349	0.295	-0.268	-0.178	-0.048	-0.33		
pH KCl	0.073	0.302	0.427	0.163	-0.149	-0.103	-0.061	-0.353	0.771	
% MO	-0.77	-0.833	0.68	-0.831	-0.696	0.653	-0.551	0.954	-0.263	-0.267

del cálculo de la inercia por el criterio de máxima verosimilitud mostraron que las propiedades edáficas responsables de agrupar a los sitios similares fueron en orden de importancia la MO, la DR, los porcentajes de porosidad y de arena, así como la DA (Cuadro 4). Estas cuatro variables explicaron el 23.18% de la variación del modelo de la Figura 2 y sugieren la existencia de procesos edafogénicos con trayectorias diferenciales atribuibles al estado de conservación de los sitios.

El ACC refleja que los sitios PAC, Gr y Ho se encuentran agrupados (Figura 2) y el criterio edáfico que logró este ordenamiento positivo fue el %MO,

mientras que los sitios PAP formaron un grupo independiente cuyo criterio de agrupación negativo fue la predominancia de arena lo cual es indicador de disturbio. La recurrencia de material no consolidado (cascajo) y la presencia de especies vegetales exóticas son parte de los agentes responsables del deterioro de los PAP de la REPSA-CU (Castellanos-Vargas, 2001)<sup>1</sup>; por lo que es apremiante instaurar una estrategia de restauración ecológica del suelo con base en los preceptos que Antonio-Garcés (2008)<sup>2</sup> señaló: 1) remover el sustrato ajeno, 2) erradicar la vegetación exótica y 3) incorporar sustrato basáltico cuya composición mineralógica sea similar a la que existe en los sitios conservados (PAC, Gr y Ho).

### Clasificación del Suelo con Base en sus Orígenes y sus Propiedades Físicas

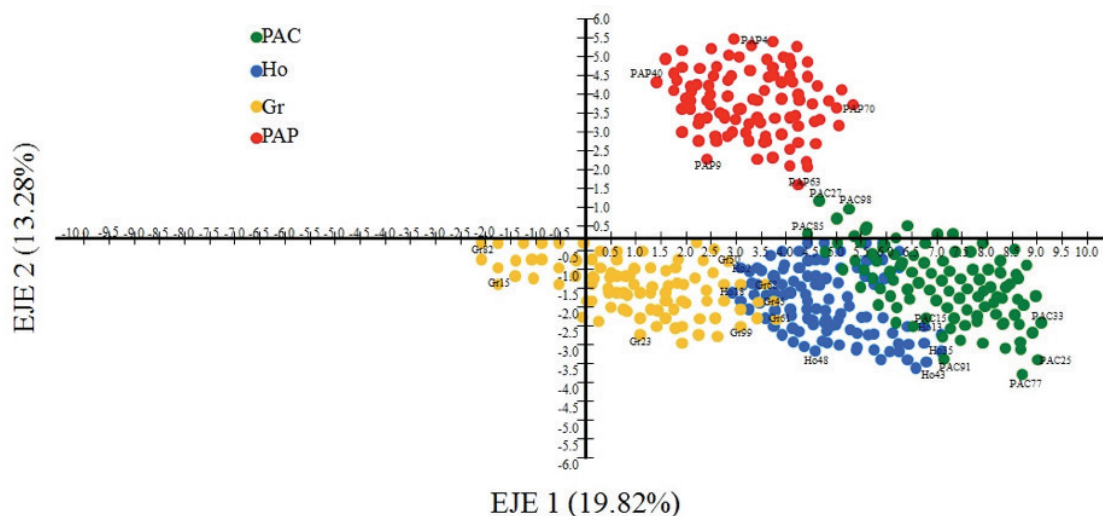
De acuerdo con los análisis físicos reportados en el presente estudio, el suelo de la REPSA-CU actualmente está en proceso de maduración, por lo que su clasificación taxonómica es incierta. Con base en los criterios propuestos por la USDA (1999) y Buol *et al.* (2003), sus características lo ubican en por lo menos tres órdenes que se explican a continuación:

1) El suelo reúne las características de un Entisol háplico incipiente dado que se trata de un suelo joven en

**Cuadro 4. Propiedades edáficas que aportan mayor inercia al Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) para la clasificación de los sitios con topografía contrastante de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU).**

Propiedad física	Inercia	Correlación con el eje 1	Correlación con el eje 2
	%		
% MO	15.48	-0.99	0.1
DR	4.52	0.18	-0.41
% Porosidad	1.41	0.45	0.4
% Arena	1.77	0.34	-0.8

<sup>2</sup> Antonio-Garcés, J. 2008. Restauración ecológica de la zona de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D. F. (México). Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.



**Figura 2. Análisis Canónico de Correspondencia para el ordenamiento y clasificación de los sitios con topografía contrastante en función de diez propiedades físicas del suelo. PAC = plano abierto conservado, Ho = hondonada, Gr = grieta y PAP = plano abiertos perturbados.** Se emplearon 100 muestras por cada sitio, se señalan las muestras que intervinieron en la determinación de la inercia. La trayectoria de los sitios PAP resultó independiente del resto de los sitios.

términos del tiempo geológico. Según datos de Ordóñez (1890); Schmitter (1953) y Siebe (2009) la lava del Xitle se enfrió gradualmente hace aproximadamente 2000 a 1705 años, y a la fecha el manto de alteración eluvial se ha enriquecido por el aporte de la fracción coluvial, generando un suelo delgado, con agregados subangulares cuyas caras son frágiles y sin desarrollo de horizontes de diagnóstico evidentes.

2) Este suelo reúne las características de un Leptosol Lítico Vítrico con frecuentes afloramientos de roca basáltica por lo que su pedregosidad es alta y su profundidad es variable. En algunos de los sitios PAC estudiados el suelo registra una profundidad mínima de 2.5 cm (Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>); en contraste con los datos de Cano-Santana y Meave, (1996) y Santibáñez-Andrade *et al.* (2009) quienes indican que en los sitios conservados puede alcanzar hasta 16 cm. Un hecho destacable desde la perspectiva de Blume y Giani (2005), los Urbanosoles o Antroposoles son suelos originados artificialmente por residuos de materiales de construcción no consolidados, que tras un prolongado tiempo de abandono son colonizados por plantas exóticas y animales oportunistas que originan ecosistemas emergentes cuyas interacciones bióticas son volátiles. En la REPSA-CU los resultados encontrados en los sitios PAP avalan esta aseveración, y sus atributos físicos los diferencian significativamente de los sitios conservados (Cuadro 2 y Figura 2) y en

esta reserva, los sitios PAP se han usado para aminorar la heterogeneidad topográfica y nivelar las áreas verdes deportivas.

3) El suelo asemeja un Andosol vítrico muy somero en proceso de desarrollo cuya fracción textural está dominada por las arena volcánica y cenizas con afinidad basáltica. Al revisar los resultados en función de la clasificación de Le Maitre (1976) y Young (2003) sobre rocas ígneas, destaca que el sustrato basáltico de la REPSA-CU reúne las características de un magma basáltico, el cual durante el enfriamiento perdió importantes volúmenes de vapor de agua, que generó grandes cantidades de burbujas que le proporcionaron textura porosa que potencializa la retención de agua líquida y elementos de las fracciones texturales: arena volcánica, limo coluvial y arcilla coloidal o monomineral originada por microdivisiones.

La presencia de minerales arcillosos en el suelo de la REPSA-CU denota la presencia de intemperismo en el material parental, pues corresponden a minerales secundarios producto del proceso de andosolización. Por otra parte, la importancia del estudio de las cenizas volcánicas con afinidad andesítica radica en establecer mejores líneas de interpretación acerca de los procesos edafogénicos, el desarrollo del paisaje y el cambio del clima en esta zona de la Cuenca de México. Estas directrices son congruentes con las que señaló Ward *et al.* (1993) para las planicies de las zonas semiáridas

del sureste de Estados Unidos.

Finalmente, en el suelo de la REPSA-CU los procesos de carácter biológico y bioquímico llegarán a adquirir gran importancia en la conformación de los horizontes; ya sea por la degradación de la materia orgánica a cargo de los microorganismos y los animales cavadores que alberga.

### **Importancia de la Conservación del Suelo de la REPSA-CU**

La REPSA-CU está inmersa en el entorno urbano y su extensión territorial comprende un mosaico de vegetación en el que las interacciones bióticas son complejas y se sustentan en el suelo incipiente que se desarrolla en los sitios con topografía contrastante (Castillo-Argüero *et al.*, 2004; 2009). Las características físicas que se encontraron en el suelo de la REPSA-CU evidencian la fragilidad del ecosistema y potencializan su conservación en términos de los servicios ambientales que proporcionan.

**Retención de agua e infiltración.** La arena y porosidad de los sitios PAC, Ho y Gr potencializa la filtración vertical del agua. Por su parte, la arcilla de las grietas y hondonadas genera microporos capaces de retener agua por capilaridad. El sustrato rocoso contribuye a retener agua debido a la gran cantidad de burbujas producidas por los gases de la lava, que al enfriarse originó oquedades en las rocas.

El valor porcentual de la humedad contenida en las muestras del suelo debe tomarse con la debida medida ya que son claramente un reflejo de la fecha y la estación en la que se colectaron las muestras (entre enero y marzo de 1999 es decir; al finalizar el invierno y principio de la primavera); y son resultado del periodo de lluvias comprendido entre junio a octubre de 1998 (Castellanos-Vargas, 2001)<sup>1</sup>.

En la REPSA-CU los Urbanosoles o Antroposoles (suelos urbanizados y perturbados) que conforman los sitios PAP pueden representar cierta importancia para la captación y filtración de agua en el ecosistema pues están conformados por un 58% de arena (Cuadro 2). No obstante, el funcionamiento y dinámica que seguirán estos sitios debe contar con monitoreo y valoración constante. El suelo de los sitios PAP puede promover la colonización de la vegetación exótica hacia los sitios conservados y alterar la dinámica de las interacciones bióticas que existen en esta reserva (Castillo-Argüero *et al.*, 2004; 2007; 2009).

**Secuestro de partículas y banco de latencia.** La porosidad del suelo de los sitios de la REPSA-CU (Cuadro 2) puede incrementar las probabilidades de secuestrar las partículas atmosféricas suspendidas cuando interactúan con las moléculas de agua de lluvia, mediante su incorporación al espacio intersticial que existe entre los agregados edáficos (Glasbey *et al.*, 1991; Certini y Scalenghe, 2006; Paul, 2007; Amer, 2012). La baja densidad y la alta porosidad del suelo de la REPSA-CU se pueden considerar como factores que facilitan el resguardo de semillas en latencia. El suelo es un banco biológico donde la diversidad genética de las plantas es alta; el germoplasma del suelo potencializa la diversidad de especies que componen a la comunidad vegetal, son consideradas como un recurso para la restauración de la vegetación natural y son hábitat para ootecas, pupas y larvas de diversas especies de insectos que sobreviven al invierno en este medio (Bliss y Smith, 1985; Chambers *et al.*, 1991; Dalling *et al.*, 1995; Butler y Chazdon, 1998; Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>; Olfert *et al.*, 2002; Gardiner y Miller, 2004; Hansson *et al.*, 2011).

**Erosión y desertificación.** La textura Franco (Migajón) Arenosa-Limosa promueve en el suelo la formación de agregados pequeños con caras subangulares, delicadas y escasa cohesión. Los agregados edáficos se rompen fácilmente entre los dedos y al aplicarles una presión de 0.51 kg cm<sup>-2</sup> (Cuadro 2), lo cual es un claro referente de la escasa estabilidad que la arena y limo le proporcionan al suelo. La fragilidad y baja cohesividad que se observó entre los agregados son atributos que potencializan la erosión (USDA, 1997). Es probable que los sitios PAC y PAP posean mayor riesgo de erosión debido a la vegetación herbácea predominantemente baja ( $\leq 50$  cm) y raíces poco profundas; en tanto que las grietas y hondonadas pueden presentar un menor riesgo ya que presentan vegetación arbustiva y arbórea ( $> 50$  cm a  $\geq 1.5$  m que le proporcionan a los sitios aspecto cerrado y mayor cobertura al suelo); con raíces muy profundas. En estos sitios se encontraron mayores cantidades porcentuales de arcilla, de humedad edáfica y de materia orgánica (Cuadro 2); estas tres propiedades son responsables de la estabilización de los agregados y de la reducción de la dispersión de las partículas finas (Allison, 1968; Tisdall y Oades, 1982; Glasbey *et al.*, 1991; USDA, 1997; Jastrow y Miller, 1998; Vreeken-Buijs *et al.*, 1998; Cockroft y Olsson, 2000; Brady y Weil, 2002; Busscher *et al.*, 2002; McCarthy, 2007).

**Acidez y fertilidad.** La acidez edáfica de la REPSA-

CU fue de  $6.5 \pm 1.3$  y varió desde 6.15 hasta 4.45 (Cuadro 2) y de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) y Sparks (2003), existen por lo menos seis causas que originan la acidificación del suelo en los ecosistemas terrestres: *a)* el uso de fertilizantes (principalmente de reacción ácida); *b)* la remoción de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) que provoca la vegetación nativa tras la asimilación de nutrientes; *c)* la lixiviación de bases intercambiables (en sitios con un régimen de lluvia alto); *d)* el origen y naturaleza del material parental (según su relación  $\text{Al}^{3+}$ :  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{K}^+$ ); *e)* descomposición de la MO y *f)* la recurrencia de lluvia ácida en la localidad.

Para la REPSA-CU hace falta realizar un análisis con mayor grado de profundidad para establecer los factores que intervienen en la acidez del suelo. Rzedowski (1954) estableció que los suelos del Pedregal de San Ángel poseen grandes cantidades de cationes como  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  pues seguramente las plantas los usan diferencialmente para su crecimiento y nutrición; 2) estos iones son abundantes debido a que son aportados constantemente por acarreos aluviales de origen sedimentario (traídos por el viento o disueltos en agua de lluvia desde cualquier lugar de la Cuenca de México) y 3) por su origen eluvial, esto es por la hidrólisis *in situ* de feldespatos presentes en el basalto. Asimismo, los suelos del Pedregal son pobres en aniones como N y P; ya que son aprovechados por las plantas para la formación de tejidos aéreos y subterráneos; forman parte de la materia orgánica y originan una capa de mantillo profunda.

La acidez puede atribuirse al lavado constante de bases intercambiables, pues Lot y Cano-Santana (2009) indican que la precipitación media anual de la REPSA-CU puede alcanzar hasta 833 mm, y la temporada de lluvias comprende cinco meses (de junio a octubre), y durante este periodo el suelo está sometido a un barrido hídrico de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ . De acuerdo con las observaciones de Rzedowski (1954), la vegetación del Pedregal de San Ángel se asentó sobre un basalto gris oscuro de olivino [ $(\text{A}_2)\text{SiO}_4$ ] con microcristales. Según datos de Delvigne *et al.* (1979) y de Ottonello (1997), el olivino es una solución regular de Fayalita y Forsterita, y en su fórmula química " $\text{A}_2$ " puede estar representado por algún metal como  $\text{Fe}^{2+}$  ( $^{3+}$ ),  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  o  $\text{Ni}^{2+}$ ; los cuales al hidrolizarse pasan a formar parte de la solución del suelo en un ambiente edáfico donde la escasez de sitios de intercambio promueve su lixiviación.

## CONCLUSIONES

-La topografía que presenta la REPSA-CU es un factor determinante de las propiedades físicas del suelo y actualmente, los horizontes de diagnóstico de los perfiles edáficos son incipientes y están en proceso de desarrollo.

-El contenido de MO fue un atributo central para la clasificación, agrupación y ordenamiento de los sitios que se analizaron. Este parámetro mostró correlaciones significativas positivas con las fracciones porcentuales de la porosidad, arcilla y humedad y a la vez mostró correlaciones significativas negativas con las densidades aparente y real, la compactación, acidez y contenido porcentual de arena.

-Basados en los resultados de las pruebas físicas se argumenta que la clasificación del suelo conforme a los sistemas taxonómicos vigentes corresponde a las siguientes categorías: 1) Conforme a la clasificación USDA (1999) Entisol háplico, por la edad geológica reciente de su deposición y los procesos de pedogénesis actualmente en curso; 2) Leptosol Lítico, otro calificador se sugiere Vitríco o Ándico conforme a la clasificación de la Base Referencial Mundial de los Suelos (IUSS Working Group, 2006), por la recurrencia de afloramientos rocosos de origen magmático extrusivo y 3) Andosol vitríco por la naturaleza de su material parental y predominancia textural de arena.

-Por su parte, el suelo de los sitios PAP ha sido fuertemente modificado por disturbios antrópicos, por lo que su trayectoria edafogénica lo clasifica como un Ubanosol/Antroposol, y conforma un grupo independiente de los sitios conservados PAC, Ho y Gr. Es apremiante encaminar acciones de restauración ecológica en ellos pues su extensión y cobertura de especies exóticas puede alcanzar otros sitios de esta reserva.

-Con base en los resultados físicos que se mostraron en este trabajo, la importancia de la conservación del suelo de la REPSA-CU radica en su capacidad para retener y filtrar agua; así como en el potencial para secuestrar partículas atmosféricas, a la vez que es hábitat de semillas y huevecillos. A fin de aminorar los riesgos de erosión y desertificación, se sugiere evitar las modificaciones a la comunidad vegetal original de los sitios conservados y erradicar las plantas exóticas.



## AGRADECIMIENTOS

Manifestamos nuestro más sincero agradecimiento a Rosalía Ramos Bello, María del Socorro Galicia Palacios, Elizabeth Fuentes Romero y Marco Antonio Romero Romero por su asistencia técnica. Y a los comentarios de los revisores anónimos que ayudaron a mejorar sustancialmente este trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Allison, F. E. 1968. Soil aggregation some facts and fallacies as seen by microbiologist. *Soil Sci.* 106: 136-143.
- Álvarez S., F. J., J. Carabias L., J. Meave C., P. Moreno C., D. Nava F., F. Rodríguez Z., C. Tovar G. y A. Valiente B. 1982. Proyecto para la creación de una reserva en el Pedregal de San Ángel. Cuadernos de Ecología No. 1. Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F.
- Amer, A. M. 2012. Water flow and conductivity into capillary and non-capillary pores of soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 12: 99-112.
- Arango-Galván, A., L. Cutz-Pool, and Z. Cano-Santana. 2009. Estructura de la comunidad de colémbolos del mantillo. pp. 395-402. *In:* A. Lot and Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. UNAM. México, D. F.
- Baver, L. D., W. H. Gardner y W. R. Gardner. 1980. Física de suelos. U. T. E. H. A. México.
- Bliss, D. and H. Smith. 1985. Penetration of light into soil and its role in the control of seed germination. *Plant Cell Environ.* 8: 475-483.
- Blume, H. P. and L. Giani. 2005. Classification of soils in urban/industrial agglomerations in Germany and recommendations for the WRB. *Euras. Soil Sci.* 38: 72-74.
- Bouyoucos, G. J. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Sci.* 23: 343-354.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Bullock, J. M., J. Aronson, A. C. Newton, R. F. Pywell, and J. M. Rey-Benayas. 2011. Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities. *Trends Ecol. Evol.* 26: 541-549.
- Buol, S.W., R. J. Southard, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2003. Soil genesis and classification. Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ, USA.
- Busscher, W. J., P. J. Bauer, and J. R. Frederick. 2002. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil Tillage Res.* 68: 49-57.
- Butler, B. J. and R. L. Chazdon. 1998. Species richness, spatial variation, and abundance of the soil seed bank of a secondary tropical rain forest. *Biotropica* 30: 214-222.
- Caesar-Tonthat, T. C. 2002. Soil binding properties of mucilage produced by a basidiomycete fungus in a model system. *Mycol. Res.* 106: 930-937.
- Cano-Santana, Z. y J. Meave. 1996. Sucesión primaria en derrames volcánicos: El caso del Xitle. *Ciencias* 41: 58-68.
- Carrillo, T. C. 1995. El Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. México. Colección INCAPA. México, D. F.
- Castillo-Argüero, S., G. Montes-Cartas, M. Romero-Romero, Y. Martínez-Orea, P. Guadarrama-Chávez, I. Sánchez-Gallén y O. Núñez-Castillo. 2004. Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D. F., México). *Bol. Soc. Bot. Méx.* 74: 51-75.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, J. Meave, M. Hernández-Apolinar, O. Núñez-Castillo, G. Santibáñez-Andrade y P. Guadarrama-Chávez. 2009. Flora; susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas. pp. 107-133. *In:* A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. UNAM. México, D. F.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, M. A. Romero-Romero, P. Guadarrama-Chávez, O. Núñez-Castillo, I. Sánchez-Gallén y J. A. Meave. 2007. La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Aspectos florísticos y ecológicos. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F.
- Certini, G. and R. Scalenghe. 2006. Soils: Basic concepts and future challenges. Cambridge University Press. Cambridge.
- Chambers, J. C., J. A. MacMahon, and J. H. Haefner. 1991. Seed entrapment in alpine ecosystems: Effects of soil particle size and diaspore morphology. *Ecology* 72: 1668-1677.
- Cockroft, B. and K. A. Olsson. 2000. Degradation of soil structure due to coalescence of aggregates in no-till, no-traffic beds in irrigated crops. *Aust. J. Soil Res.* 38: 61-70.
- Cuanalo de la Cerda, H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- Dalling, J. W., M. D. Swaine, and N. C. Garwood. 1995. Effect of soil depth on seedling emergence in tropical soil seed-bank investigations. *Funct. Ecol.* 9: 119-121.
- Delvigne, J., E. B. A. Bisdorf, J. Sleeman, and G. Stoops. 1979. Olivines their pseudomorphs and secondary products. *Pedologie* 29: 247-309.
- Enciso de la Vega, S. 1979. Las lavas del Pedregal de San Ángel. *CONACyT. Ciencia y Desarrollo* 25: 89-93.
- Gandoy-Bernasconi, W. 1991. Manual de laboratorio para el manejo físico de los suelos: Temporal y riego, parcela y cuenca. UACH. Chapingo, Estado de México, México.
- García-Hernández, M. A., M. A. García-Hernández, I. Castellanos-Vargas, Z. Cano-Santana y C. M. Peláez-Rocha. 2008. Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana* 26: 21-27.
- Gardiner, D. T. and R. W. Miller. 2004. Soils in our environment. Pearson Education. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Glasbey, C. A., G. W. Horgan, and J. F. Darbyshire. 1991. Image analysis and three-dimensional modelling of pores in soil aggregates. *J. Soil Sci.* 42: 479-486.
- GDF (Gobierno del Distrito Federal). 2012. Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) del Distrito Federal, México.
- Hansson, K., B. A. Olsson, M. Olsson, U. Johansson, and D. B. Kleja. 2011. Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden. *For. Ecol. Manage.* 262: 522-530.

- Huggett, R. J. 1975. Soil landscape systems: A model of soil genesis. *Geoderma* 13: 1-22.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO. Rome.
- Jastrow, J. D. and R. M. Miller. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. pp. 207-223. *In*: R. Lal, J. K. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds.). *Soil processes and the Carbon Cycle*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Kataja-aho, S., H. Fritze, and H. Haimi. 2011. Short-term responses of soil decomposer and plant communities to stump harvesting in boreal forests. *For. Ecol. Manage.* 262: 379-388.
- Le Maitre, R. W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. *J. Petrol.* 17: 589-598.
- Leary, J. K., N. V. Hue, P. W. Singleton, and D. Borthakur. 2006. The major features of an infestation by the invasive weed legume gorse (*Ulex europaeus*) on volcanic soils in Hawaii. *Biol. Fertil. Soils* 42: 215-223.
- Lot, A. and Z. Cano-Santana. 2009. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- McCarthy, D. F. 2007. *Essentials of soil mechanics and foundations: Basic geotechnics*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- McIntyre, G. A. 1967. Soil sampling for soil testing. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 33: 309-320.
- Munsell color. 1992. Munsell soil color chart. Munsell Color Company. Grand Rapids, MI, USA.
- Muscolo, A., F. Bovo, F. Gionfriddo, and S. Nardi. 1999. Earthworm humic matter produces auxin-like effects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1303-1311.
- Olfert, O., G. D. Johnson, S. A. Brandt, and A. G. Thomas. 2002. Use of arthropod diversity and abundance to evaluate cropping systems. *Agron. J.* 94: 210-216.
- Ordóñez, E. 1890. El Pedregal de San Ángel; apuntes para la petrología del Valle de México. *Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate* 4: 115.
- Otonello, G. 1997. *Principles of geochemistry*. Columbia University Press. New York, NY, USA.
- Paul, E. A. 2007. *Soil microbiology ecology and biochemistry*. Academic Press. New York, NY, USA.
- Peralta H., A. y J. Prado M. 2009. Los límites y la cartografía. pp. 27-42. *In*: A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. UNAM. México, D. F.
- Piccolo, A. 2002. The supramolecular structure of humic substances a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Adv. Agron.* 75: 57-134.
- Redondo Arámburo, A. 1988. *Manual de edafología general*. Universidad Autónoma de Sinaloa. México.
- Rzedowski, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *An. Esc. Nac. Cienc. Biol.* 8: 59-129.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México, D. F.
- Santibáñez-Andrade, G., S. Castillo-Argüero, J. A. Zavala-Hurtado, Y. Martínez Orea y M. Hernández Apolinar. 2009. La heterogeneidad ambiental en un matorral xerófilo. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 85: 71-79.
- Schmitter V., E. 1953. Investigación petrológica en las lavas del Pedregal de San Ángel. pp. 218-237. *In*: *Memorias del Congreso Científico Mexicano: Ciencias físicas y matemáticas*. Vol. III. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Sidari, M., M. R. Panuccio, and A. Muscolo. 2004. Influence of acidity on growth and biochemistry of *Pennisetum clandestinum*. *Biol. Plant.* 48: 133-136.
- Siebe, C. 2009. La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670  $\pm$  35 años AP y sus implicaciones. pp. 43-49. *In*: A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. UNAM. México, D. F.
- Soberón M., J., M. C. Rosas M. y G. Jiménez C. 1991. *Ecología hipotética de la Reserva del Pedregal de San Ángel*. Cienc. Des. 17: 25-38.
- Sokal, R. R. and F. J. Rohlf. 1995. *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. W. H. Freeman. New York, NY, USA.
- Sparks, D. L. 2003. *Environmental soil chemistry*. Academic Press. London.
- StatSoft, Inc. 2008. *Electronic Statistics Textbook*. StatSoft Corporation <http://www.statsoft.com/textbook>. Tulsa. Oklahoma. (Consulta: enero 14, 2014).
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Troeh, F. R. and L. M. Thompson. 2005. *Soils and soil fertility*. Wiley-Blackwell. New York, NY, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA-NRCS. Agricultural handbook no. 436. Washington, DC, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1997. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning in the revised universal soil loss equation*. USDA-NRCS. Agricultural handbook no. 703. Washington, DC, USA.
- van Reeuwijk, L. P. 2006. *Procedures for soil analysis*. ISRIC-FAO. Wageningen, The Netherlands.
- Vreeken-Buijs, M. J., J. Hassink, and L. Brussaard. 1998. Relationships of soil microarthropod biomass with organic matter and pore size distribution in soils under different land use. *Soil Biol. Biochem.* 30: 97-106.
- Waitz, P. y E. Wittich. 1911. Tubos de explosión en el Pedregal de San Ángel. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 7: 169-175.
- Walkley, M. S. and C. A. Black. 1934. *Methods of soil analysis*. *Soil Sci.* 37: 29-35.
- Ward, P. A., B. J. Carter, and B. Weaver. 1993. Volcanic ashes: Time markers in soil parent materials of the southern plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 453-460.
- Wittich, E. 1919. Los fenómenos microvolcánicos en el Pedregal de San Ángel. *Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate* 38: 101-105.
- Yamauchi, M., S. Katayama, T. Todoroki, and T. Watanabe. 1984. Total synthesis of fulvic acid. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 23: 1565-1566.
- Young, D. A. 2003. *Mind over magma the story of igneous petrology*. Princeton University Press. Princeton, NJ, USA.
- Zar, J. H. 2010. *Biostatistical analysis*. Pearson Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.