

Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal

Recibido: 26 de febrero de 2007. Aceptado en versión final: 28 de noviembre de 2007.

Silke Cram*

Helena Cotler**

Luis Miguel Morales***

Irene Sommer*

Estela Carmona***

Resumen. El crecimiento y expansión de las ciudades ha ocasionado un fuerte deterioro de la salud e integridad de los ecosistemas *in situ* disminuyendo su posibilidad de ofrecer servicios ambientales. El suelo constituye uno de los primeros componentes alterados que dejan de proporcionar numerosos beneficios necesarios para el mantenimiento de la calidad de vida de la población urbana.

En este trabajo se lleva a cabo una primera evaluación de la situación actual de los suelos en el Distrito Federal y sus servicios ambientales potenciales. Para ello, se utilizaron mapas e imágenes de satélite recientes para la construcción de un mapa morfoedafológico. Con base en esta información

se detectaron como prioridades: *a)* el cuidado y atención de suelos sobre pendientes $> 10^\circ$ indicando las delegaciones implicadas; *b)* el incremento y/o mejora en la atención de los espacios no sellados que aún se mantienen en cada Delegación; *c)* la necesidad de elaborar políticas y propuestas de manejo para el Distrito Federal que consideren la diversidad de usos y de sus unidades morfoedafológicas. Además se identifican algunos de los servicios ambientales que deberían incorporarse en las políticas y el manejo de los suelos.

Palabras clave: Suelos urbanos, servicios ambientales, Distrito Federal, México, unidades morfoedafológicas.

Identification of the potential soil environmental services in the urban landscape of Mexico City

Abstract. Ecosystems health and integrity has been affected due to the growth and expansion of the cities reducing their capability to offer environmental services. Soil is one of the first components altered, diminishing the provision of numerous benefits linked to the citizens quality of life.

In this work a first analysis of this situation in Mexico City is carried out. Maps and recent images were analyzed and processed to build a morphoedaphic map. Based on this information, the following priorities were derived: *a)* care and attention to soils on slopes $> 10^\circ$ pointing out the im-

*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: silre@servidor.unam.mx; irenes@igiris.igeograf.unam.mx

**Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Av. Periférico Sur No. 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, 04530, México, D. F. E-mail: hcotler@ine.gob.mx

***Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán. E-mail: moraman@servidor.unam.mx; ecarmona@ciga.unam.mx

plied delegations; *b*) increase the extension and/or improve the quality of the remaining not-sealed soils in each delegation; *c*) the need to elaborate a management and political proposal for the whole watershed and a set of delegational level programs considering their own different combination of soil uses and morphoedaphic units. Some of the potential environmental services to be considered in construction-free soils management policies are also suggested.

Key words: Urban soils, environmental services, Mexico City, morphoedaphic units.

INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos también llamados ambientales constituyen todos aquellos beneficios que la población obtiene de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Como parte de los ecosistemas terrestres, los suelos cumplen importantes servicios ecosistémicos, el más conocido es el soporte y suministro de nutrientes a las plantas, de ahí que la degradación del suelo esté considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos (PNUMA, 2000). El suelo, además, constituye el medio donde se realiza una parte importante de los ciclos biogeoquímicos necesarios para el reciclaje de los compuestos orgánicos; se estima que el contenido de carbón almacenado en el primer metro del suelo es 1.5 veces mayor a aquél acumulado en la biomasa (Sombroek *et al.*, 1993), constituyendo la tercera fuente más importante de carbón (Lal, 1999). Este “secuestro” de carbón por el suelo, reduce su liberación a la atmósfera como CO₂, uno de los principales gases con efecto “invernadero” responsables del cambio climático (Kern y Johnson, 1993).

Otras funciones no menos importantes, son captar el agua que permite la recarga de los acuíferos, lo que influye en la calidad de la misma, filtrando, amortiguando y captando ciertos contaminantes, impidiéndoles llegar a las reservas de agua (Brady y Weil, 1999). El suelo contribuye indirectamente a modular temperatura y humedad, lo cual mejora la calidad del aire (evitando polvaredas y/o favoreciendo la producción de oxígeno), factores todos relacionados con la calidad de vida del habitante urbano.

En ambientes propiamente urbanos, además de su contribución a la recarga de acuíferos, la infiltración del agua en el suelo no urbanizado reduce los niveles de escorrentía, evitando inundaciones y arrastres de basura hacia las partes bajas de las zonas urbanas, almacena agua (a la par que nutrientes) para la vegetación y evita la sobrecarga de drenaje artificial (Sanders, 1986; Blume, 1990; Blume *et al.*, 1997, Lal, 2002). Finalmente, en los ecosistemas urbanos, Brady y Weil (1999) mencionan al suelo como proveedor de servicios para material de construcción o como cimiento para la infraestructura urbana.

Para que el suelo pueda preservar sus funciones, es necesario garantizar su contacto con el agua, la vegetación y el aire del entorno, conservando las propiedades que regulan su calidad,¹ condición que tiende a perderse a medida que avanzan los procesos de urbanización.

Los servicios ambientales que provee el suelo son poco valorados en las zonas urbanas. Básicamente se concibe al suelo como soporte de construcciones o infraestructura, lo que favorece prácticas para su aislamiento o “sellamiento” dando origen a problemas de encharcamientos, inundaciones, pérdida de biodiversidad, déficit en la recarga de acuíferos, entre otros. Estos problemas demandan altas inversiones para ser resueltos y esto, en muchas ocasiones, sólo puede realizarse provisionalmente.

Los suelos urbanos se distinguen de los naturales esencialmente por estar mezclados con materiales de relleno con presencia de residuos de construcción, balance ácido-alcalino con tendencia a la alcalinización, tendencia a la contaminación con metales pesados y derivados del petróleo, propiedades físico-mecánicas particulares tales como alta compactación, condiciones que en conjunto limitan la aireación, el drenaje y el almacén de humedad disponible a la planta y crecimiento de raíces. Esto también afecta la composición de las poblaciones

¹ Calidad del suelo, entendida como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites naturales, para sostener la productividad de plantas y animales, mantener la calidad del aire y del agua y sostener la salud humana (Karlen *et al.*, 1997).

de organismos degradadores y los mecanismos químicos frente a diversos contaminantes (Stroganova y Agarkova, 1993; Jim, 1998; Stroganova y Prokofieva, 2000; Beyer *et al.*, 2000; Lal, 2002).

Cuando la ciudad tiende a crecer y complicarse, se vuelve necesaria una planeación detallada, articulada, armónica y dinámica que contemple los usos de suelo permitidos, el balance y equilibrio deseable en los procesos ecológicos-naturales *vs.* los urbanos y la identificación de espacios que deban y puedan ser recuperados y rehabilitados como áreas verdes (Breuste *et al.*, 1998). Cada vez, se reconoce más la importancia del suelo antrópico como soporte de las áreas verdes urbanas y con ello de la calidad de vida del habitante de la ciudad (Bullock y Gregory, 1991; Verter, 2007). El manejo del suelo en zonas urbanas debe tener como meta disminuir el sellamiento de la superficie e identificar los servicios ambientales que provee para asegurarlos o mejorarlos. En trabajos como los de Stasch y colaboradores (1999 y 2000) se muestra que el uso del suelo juega un papel importante en el desarrollo de las características propias de suelos urbanos y enfatizan la preservación de las funciones ecológicas al interior de los ambientes urbanos.

Otra estrategia propuesta por Huinink (1998) se basa en la necesidad de obtener tierra o material de relleno después de construir, arreglar, preparar para construcción, etc., en áreas urbanas; asimismo, propone una serie de criterios de calidad que tendrían que tener estos materiales de relleno frente al uso al que se les destinará, así se controlaría el uso de "sustratos sanos" desde la compra-venta de dichos materiales.

Los procesos de urbanización de la Ciudad de México, aunado a sus condiciones geoecológicas, conllevan una severa degradación ecológica consistente en la eliminación de vida silvestre, deforestación, erosión y contaminación de agua y aire; subsidencia de tierras y desequilibrios en las recargas de los mantos freáticos en algunos sitios (González-Morán *et al.*, 1999), eliminación y fragmentación de los bosques y la vulnerabilidad a incendios de los bosques remanentes (Fenn y Bauer, 1995). Asimismo, son importantes los efectos originados por la contaminación atmosférica, en particular la lluvia ácida y la depositación seca, que

contienen metales pesados que por sus características de toxicidad y facilidad de transporte hacia zonas distantes se consideran uno de los factores de deterioro ambiental y de la calidad de vida de la población en la Ciudad de México (GDF, 2000).

El crecimiento acelerado de la Ciudad de México ha tenido muy poca previsión en cuanto a la contribución de los suelos al bienestar de su población. En ese sentido, la amplia y diversa bibliografía referida a esta ciudad y a su cuenca (Fenn y Bauer, 1995; Marín *et al.*, 1995, González-Morán *et al.*, 1999; Garza, 2000; Gutiérrez de MacGregor *et al.* 2006; Ezcurra *et al.*, 2006) hace escasa referencia a este componente esencial del paisaje urbano.

Como un primer paso para identificar los servicios ambientales potenciales de los suelos urbanos del Distrito Federal se realizó *i)* una regionalización morfoedafológica del área, *ii)* se evaluó la superficie de suelo no sellado por Delegación y *iii)* se realizó una primera aproximación del tipo de servicios ambientales potenciales de los suelos del Distrito Federal.

ÁREA EN ESTUDIO

El área en estudio comprende la zona urbana del Distrito Federal localizada geográficamente en el sureste de la Cuenca de México, entre los meridianos 98° 57' y 99° 22'W, los paralelos 19° 36' y 19° 03'N a una altitud entre 3 930 y 2 230 msnm, con un área aproximada de 1 320 km² ocupados por 16 delegaciones políticas (Gutiérrez de MacGregor *et al.*, 2006; Figura 1).

En la Cuenca de México, las condiciones geomorfológicas y climáticas que promueven la formación y evolución de los suelos son diversas. Varios autores sintetizan la diversidad de los paisajes en cuatro grandes unidades: *a)* relieve montañoso, *b)* piedemonte, *c)* planicies proluviales-lacustres y *d)* planicie lacustre, cuyos suelos cumplen con funciones disímiles y por ende proveen distintos servicios ambientales.

a) El *relieve montañoso* localmente denominado sierras, es de origen volcánico y forma el parteaguas de la cuenca, está sujeto a severa erosión; las cárcavas y barrancos son comunes en esta unidad. En algunas

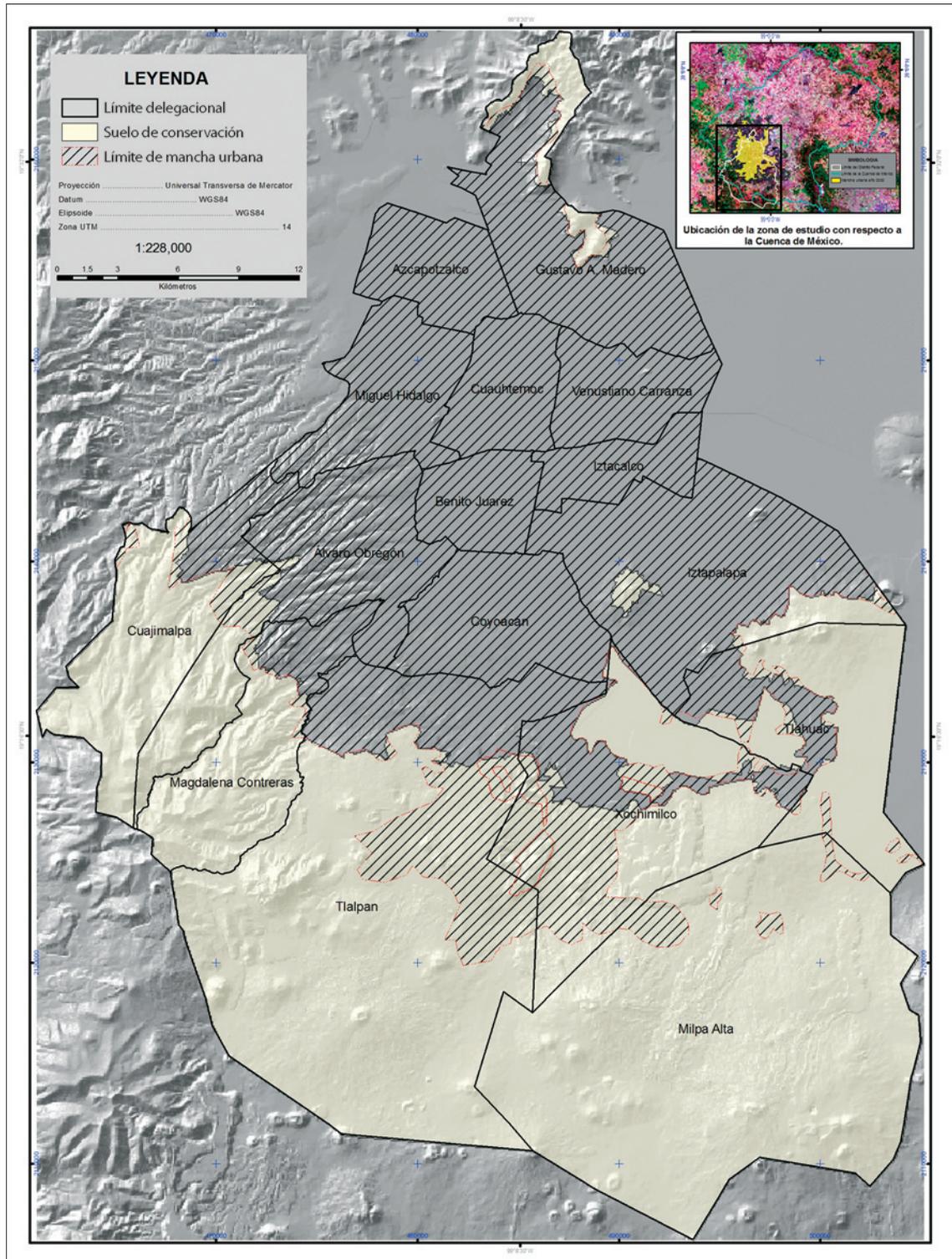


Figura 1. Mapa de ubicación del Distrito Federal, sobre un modelo digital de terreno.

sierras más recientes como la del Chichinautzin y Tezontepec, el agua se infiltra rápidamente y no modela rasgos superficiales (*Ibid.*), pero si genera manantiales (De la Lanza y García, 1995). En sus puntos más elevados, las sierras observan un clima de tundra (ET; *Ibid.*). Entre los 2 800 y 4 000 msnm se encuentran suelos propiamente forestales (Andosoles, Leptosoles y Phaeozem) que soportan bosques de pinos, oyamel y/o encinos, bosques poco densos y fragmentados para los que se reporta una alta vulnerabilidad a incendios (*Ibid.*).

La zona montañosa tiene como principal función la captación del agua para recargar los acuíferos, aunque su gradual urbanización merma esta capacidad y aumenta el riesgo de convertirla en potencial vía de entrada de contaminantes al acuífero (González-Morán *et al.*, 1999); al respecto, ya se han reportado altas concentraciones de plomo y otros metales (tanto en suelos como en la vegetación) producto de procesos atmosféricos (Benavides, 1990).

b) Los *pedemontes* son superficies inclinadas en la parte basal de las sierras. En la sierra Chichinautzin se presenta un piedemonte muy estrecho. Esta superficie es sumamente permeable, se encuentra muy alterada por construcciones y viviendas y basureros a cielo abierto (González-Morán *et al.*, 1999), por lo que se considera la vía de contaminación más importante del acuífero.

En el piedemonte se sitúa parte de las delegaciones de Milpa Alta, Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa, que ocupan altitudes entre los 2 250 y 2 800 msnm, con pendientes de 7 a 15%; los suelos son Leptosoles y Phaeozem, que en ciertos sitios pueden estar sembrados con cultivos de maíz, frijol o frutales. Estos suelos son sumamente sensibles a la erosión (Marín *et al.*, 1995).

c) Las *planicies proluviales-lacustres* presentan pendientes menores a 3%, están formadas por materiales transportados por ríos estacionales (proluviales). Se consideran superficies de transición entre el piedemonte y la planicie lacustre. Van “reduciendo” el lago y lo transforman en tierra firme con una humedad constante propia de la vegetación hidrófila. La mayor parte de esta zona está urbanizada (Gutiérrez de MacGregor *et al.*,

2006). Ocupan altitudes entre 2 250 y 2 270 msnm y albergan suelos de tipo Phaeozem no salino, son suelos profundos limosos o arcillosos con pH entre 7 y 7.5, con materia orgánica de 1 a 2% en la capa arable, propios para la agricultura, aunque actualmente esta actividad es prácticamente inexistente (Marín *et al.*, 1995).

d) La *planicie lacustre* presenta las altitudes más bajas (< 2 240 msnm), una topografía casi horizontal con pendientes < 2%, que abarca una superficie de 1 431 km², es decir, 23% del área de la Cuenca de México (González-Morán *et al.*, 1999), con un clima templado lluvioso con lluvias en verano (Cwbg). Los sedimentos que la conforman son impermeables, lo que permitió que en su superficie se formaran los sistemas de lagos: Zumpango-Xaltocan-San Cristóbal (al norte), México-Texcoco (al centro) y Xochimilco-Chalco (al sur).

Sus suelos son Phaeozem, Solonchak y Gleysol salinos y/o sódicos, que se forman de materiales aluviales o coluviales y de sedimentos acumulados en los antiguos lagos. Tienden a concentrar sales y sodio como resultado de procesos de evaporación a largo plazo. En el vaso de Texcoco los suelos presentan altos pH (> 8), elevada conductividad eléctrica (> 9 mS/m) y alta saturación de bases (mayor de 85%; Marín *et al.*, 1995). Su morfología original ha sido muy alterada por diversas actividades antrópicas encaminadas al drenaje y control de inundaciones de la ciudad, alberga las delegaciones Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac, así como una superficie considerable de Coyoacán y Xochimilco.

METODOLOGÍA

Para integrar la información arriba mencionada e incorporar a los suelos considerando sus factores formadores y así obtener unidades de territorio homogéneas con una estructura, dinámica y problemas comunes, y de esta forma analizar los servicios ambientales que pueden cumplir, se utilizó un enfoque morfoedafológico (Geissert, 2002).

El análisis y tratamiento de la información se realizó mediante el programa Arcview versión 3.2 (ESRI, 1999a) y ArcInfo versión 8.0 (ESRI, 1999b). Las coberturas utilizadas fueron:

1. Curvas de nivel digitalizadas provenientes de la carta topográfica (cartas E14 A39, E14A28, E14A38, E14A48, E14A29, E14A49, E14B211, E14B31 y E114B41) escala 1:50 000, INEGI (1997).
2. Mapa geológico, escala 1:100 000 (Mooser *et al.*, 1996).
3. Mapa edafológico, escala 1:250 000, INEGI (1984).
4. Base de datos climática de CONABIO a escala 1:1 000 000 (García, 1998).
5. Fotomosaico del área en estudio escala 1:50 000, elaborado por el Instituto de Geografía de la UNAM (2002).
6. Límite del Distrito Federal.

Las etapas metodológicas consistieron en determinar unidades homogéneas a partir de características morfográficas, como la pendiente, la amplitud del relieve y la densidad y diseño de curvas de nivel. En una segunda etapa se infirió la génesis considerando la litología y la edad de las rocas. Estas dos primeras etapas dieron lugar a unidades morfo genéticas. Posteriormente se afinaron los pisos bioclimáticos y, por último, se integró el mapa edafológico, realizando un análisis de los resultados cartográficos (Cotler *et al.*, 2002).

Mapa de suelos y cambios inducidos por el desarrollo urbano

Se procesaron imágenes de satélite LANDSAT 7 (enero del 2000), con una resolución espacial de 30 m. A la imagen se le hizo una clasificación supervisada y se obtuvieron cinco clases de acuerdo con su valor digital en las seis bandas del espectro (azul a infrarrojo medio), éstas fueron: agua, concreto, materiales inorgánicos (que abarca láminas, pero también rocas, superficies salinas, etc.), vegetación escasa o seca y vegetación verde. Las áreas selladas se estimaron por diferencia, después de haber superpuesto las dos clases que indican áreas no selladas (vegetación escasa o seca y vegetación verde).

El margen de error de contenido por clasificación (ya que pueden confundirse las clases) puede ser de hasta 10% y el error de posición es de 30 m, porque los píxeles son relativamente grandes. Estos errores se consideraron como aceptables para la escala y el objetivo de comparar las áreas selladas entre las diferentes delegaciones.

En las áreas de conservación, sobre todo en las zonas montañosas con pendientes pronunciadas donde hay mucha sombra en la imagen, el error de clasificación es más alto (hasta un 20%), ya que marca algunas áreas como selladas, que en las fotografías aéreas se notan no selladas, esto sucede sobre todo en zonas desprovistas de vegetación que muestran tonos muy oscuros (Figura 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapa morfoedafológico

Se determinaron 18 unidades morfo genéticas del relieve (Figura 3), las cuales incluyen 64 unidades morfoedafológicas (Figura 4), en su correspondiente anexo se presenta una descripción completa de cada una de ellas. Tres de las 64 unidades morfoedafológicas cubren casi el 50% del área (47.3%) del Distrito Federal y son:

1. Las superficies planas acumulativas de la llanura (plana a suavemente ondulada, lacustre-acumulativa), formada por depósitos lacustres del Cuaternario superior que cubre el 23.94% del Distrito Federal. Dominadas por una asociación de suelo que incluye: Phaeozem háplico, Solonchak háplico y Gleysol mólico (Unidad I-1).
2. Las superficies acumulativo-erosivas (ligeramente inclinadas (1-5°) de los lomeríos y colinas volcánico-estructurales, ligera a fuertemente disecionadas), formadas por brechas, tobas basálticas, brechas volcánicas basálticas, rocas ígneas extrusivas básicas y brechas volcánicas intermedias a básicas del Cuaternario que cubren 8.18% de la superficie. Con una asociación de suelos constituida por: Andosol mólico, Phaeozem háplico y Leptosol lítico (Unidad X-27).

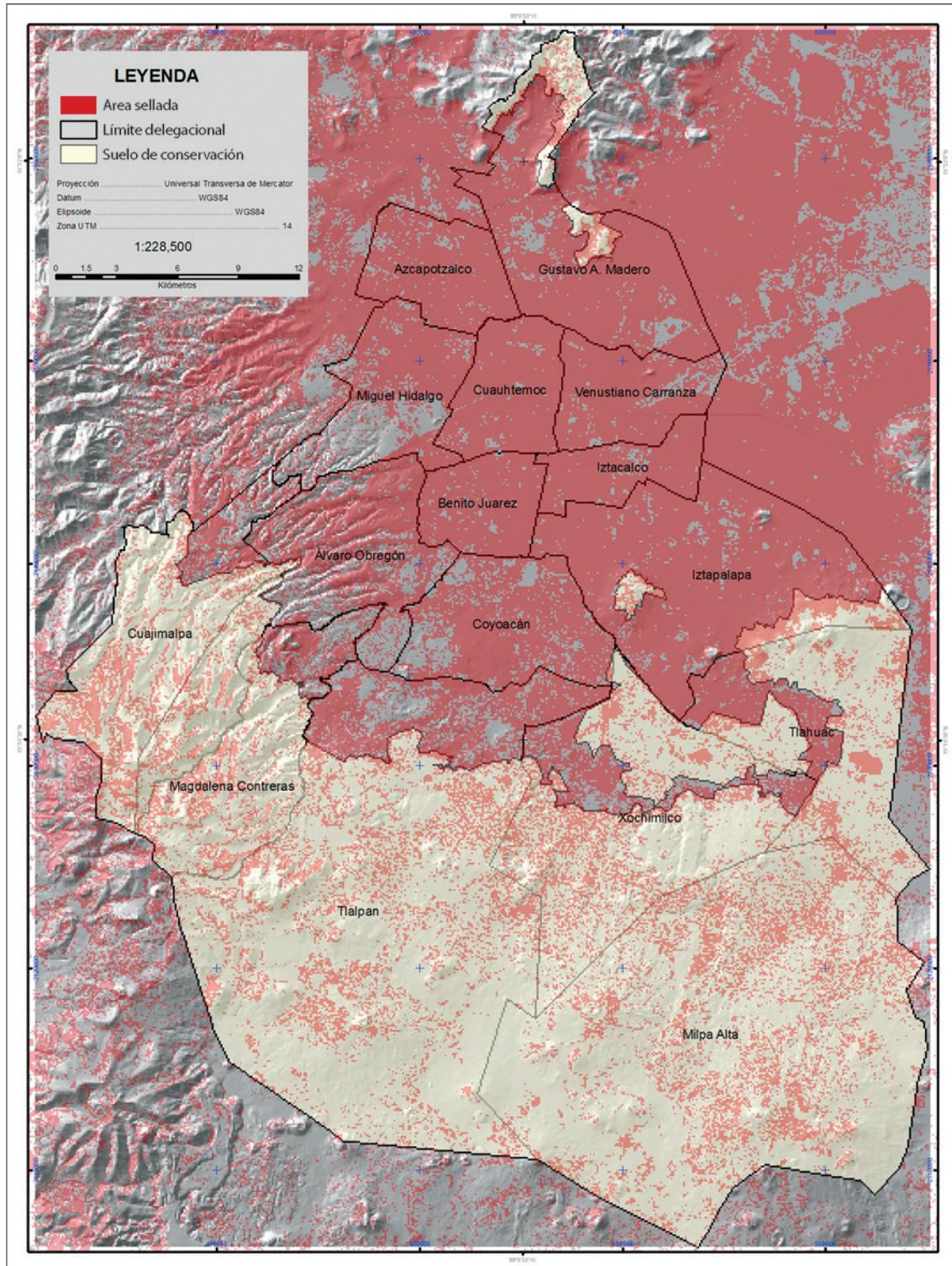


Figura 2. Imagen que muestra área sellada en el Distrito Federal.

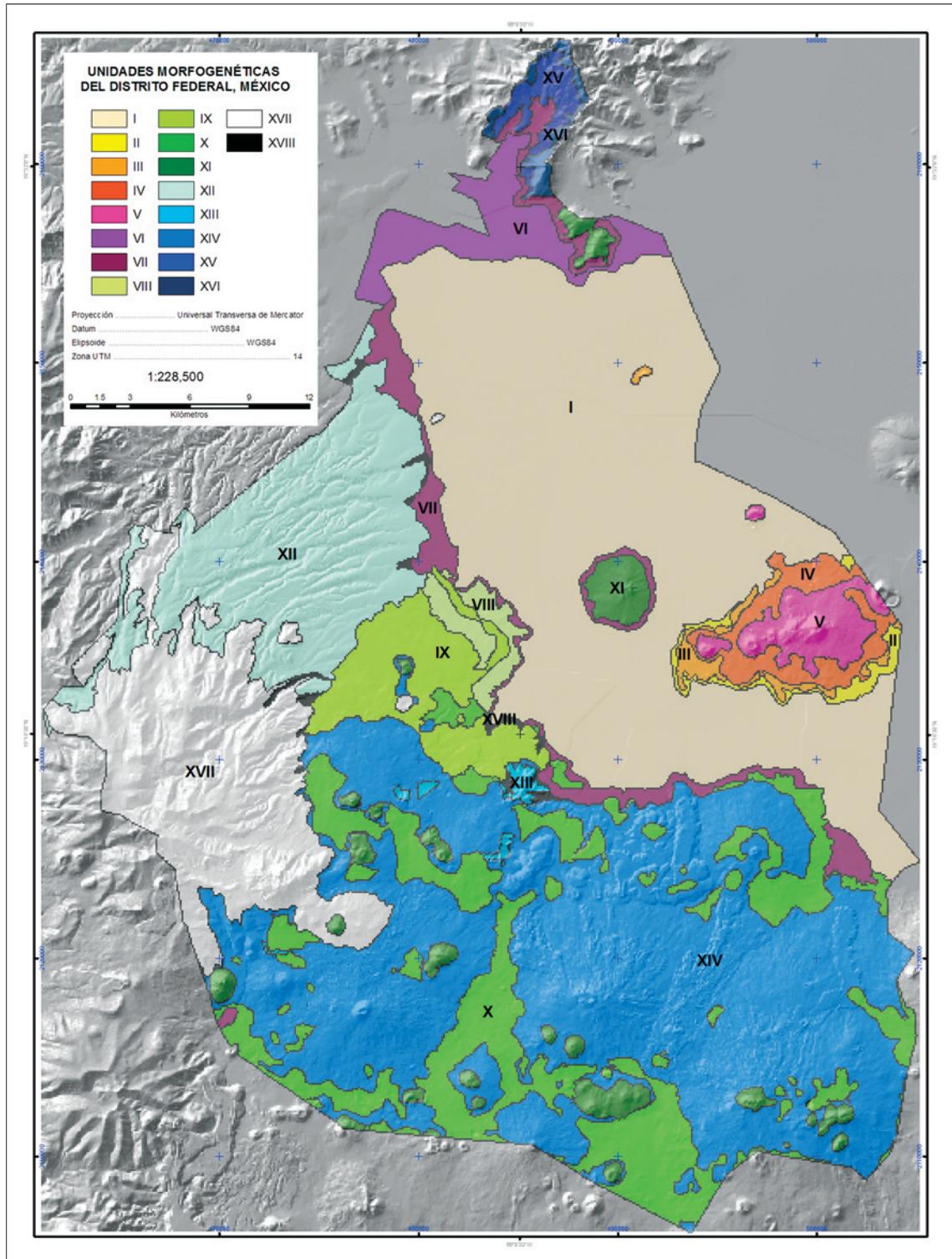


Figura 3. Mapa de unidades morfológicas del Distrito Federal.

Anexo Figura 4. Descripción completa de las unidades contenidas en el mapa morfoedafológico del Distrito Federal

SM	Unidad Morfogenética	Unidades Morfoedafológicas			Área (km ²) y % de la unidad		
		Unidad morfológica	Area (km ²) y % del área total	Asociación de suelo (FAO, 1998)			
A	I-Llanura plana a suavemente ondulada, lacustre-acumulativa, formada por depósitos lacustres del Cuaternario superior	1-Superficies planas acumulativas (<1°)	358.52 (23.94%)	Feozem haplico + Solonchak háplico+Gleysol mólico	22.52 (5.91%)		
		2- Superficies acumulativa-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	22.52 (1.5%)	Feozem haplico + Feozem gléyico+Solonchak háplico	358.52 (94.09%)		
	B	II-Llanuras colinosas y lomeríos fluviio-acumulativos en piedemonte formado por depósitos aluvio-coluviales del Cuaternario superior	3-Superficies planas acumulativas (<1°)	3.93 (0.26%)	Feozem haplico + Feozem calcarico	3.82 (49.31%)	
			4-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	3.82 (0.26%)	Feozem haplico + Feozem calcarico+Vertisol éutrico	3.93 (50.69%)	
			III-Llanuras colinosas y lomeríos volcánico-estructurales, ligeramente disecionados formados por brechas volcánicas intermedias a básicas del Cuaternario	5- Superficies planas acumulativas (<1°)	3.14 (0.21%)	Feozem haplico + Leptosol lítico	3.14 (40.41%)
				6- Superficies acumulativa-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	4.63 (0.31%)	Feozem haplico + Feozem calcarico + Regosol eutrico	4.63 (59.59%)
IV-Lomeríos y colinas volcánico-estructurales, ligera a fuertemente disecionados, formados por brecha volcánica intermedia a básica del Cuaternario	V-Montañas volcánico-estructurales, ligeramente disecionadas, formadas por tocas ígneas extrusivas básicas, brechas volcánicas intermedias a básicas del Cuaternario superior e inferior	7-Superficies planas acumulativas (<1°)	2.09 (0.14%)	Andosol mólico+Feozem haplico + Leptosol lítico	0.87 (4.03%)		
		8-Superficies erosivo-denudativas, ligeramente inclinada (1-5°)	18.71 (1.25%)	Andosol mólico+Feozem háplico+Leptosol lítico	2.09 (9.65%)		
		9-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	0.88 (0.06%)	Feozem haplico + Leptosol lítico+Andosol mólico	18.71 (86.32%)		
		10-Superficies planas acumulativas (<1°)	0.14 (0.01%)	Feozem haplico + Feozem calcarico	0.14 (0.63%)		
		11- Superficies erosivo-denudativas, ligeramente inclinadas (5-10°)	4.12 (0.27%)	Andosol mólico+Regosol éutrico+Leptosol lítico	0.42 (1.85%)		
		12-Laderas erosivas medianamente inclinadas (1-5°)	9.97 (0.67%)	Regosol éutrico+Leptosol lítico+Feozem háplico	2.37 (10.53%)		

	13-Complejo de cimas y laderas denudativas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	5.53 (0.37%)	Feozem háplico+Leptosol lítico	4.12 (18.26%)	
	14-Complejo de cimas y laderas denudativas, fuertemente inclinadas (20-30°)	2.37 (0.16%)	Feozem háplico+Regosol éútrico	5.53 (24.5%)	
	15-Laderas denudativas, muy fuertemente inclinadas (>30°)	0.42 (0.03%)	Leptosol lítico+Andosol mólico+Regosol éútrico	9.98 (44.23%)	
C	VI-Llanuras colinosas fluvio-acumulativas, ligeramente disecionadas formadas por depósitos aluviales del Cuaternario superior	16-Superficies planas acumulativas (< 1°)	24.81 (1.66%)	Feozem háplico+Feozem calcárico	18.5 (51.46%)
		17-Superficies erosivo-denudativas, ligeramente inclinadas (1-5°)	11.14 (0.74%)	Feozem háplico + Vertisol éútrico	17.45 (48.54%)
		18-Superficies planas acumulativas (< 1°)	18.09 (1.21%)	Feozem háplico+Feozem calcárico	18.1 (41.98%)
	VII-Llanuras colinosas y lomeros fluvio-acumulativos en piedemonte formados por depósitos aluvio-coluviales del Cuaternario	19-Superficies erosivo-denudativas, ligeramente inclinadas (1-5°)	23.69 (1.58%)	Feozem háplico+Feozem calcárico+ Vertisol éútrico	23.69 (54.96%)
		20-Laderas denudativas medianamente inclinadas (5-10°)	1.32 (0.09%)	Feozem háplico+Vertisol éútrico	1.32 (3.06%)
		21-Superficies planas acumulativas (< 1°)	9.32 (0.62%)	Feozem háplico+Feozem calcárico	9.32 (72.78%)
	VIII-Llanuras volcánico-estructurales onduladas, mediana a fuertemente disecionadas formadas por basalto y tobas basáltica del Cuaternario	22-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	3.48 (0.23%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	3.49 (27.22%)
		23-Superficies planas acumulativas (< 1°)	8.28 (0.55%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	8.29 (16.56%)
		24-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	39.93 (2.67%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Luvisol mólico	39.93 (79.79%)
		25-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	1.83 (0.12%)	Feozem háplico+Leptosol lítico+Luvisol mólico	1.83 (3.65%)

Continuación anexo Figura 4

C	X-Lomeríos y colinas volcánico-estructurales, ligero a fuertemente disecionados formados por basalto, tobas basálticas, brechas volcánicas basálticas, rocas ígneas extrusivas básicas y brechas volcánicas intermedias a básicas del Cuaternario	26-Superficies planas acumulativas (< 1°)	7.45 (0.5%)	Feozem háplico+Andosol mólico+Leptosol lítico	7.45 (4.92%)
		27-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	122.55 (8.18%)	Andosol mólico+Feozem háplico+Leptosol lítico	122.55 (80.98%)
		28-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	20.43 (1.36%)	Feozem háplico+Leptosol lítico+Andosol mólico	20.43 (13.5%)
		29-Laderas erosivo-denudativas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	0.89 (0.06%)	Leptosol lítico+Andosol mólico	0.89 (0.6%)
	XI-Lomeríos y colinas volcánico-estructurales, ligero a fuertemente inclinados, formados por basalto, tobas basálticas, brechas volcánicas básicas, rocas ígneas extrusivas básicas y brechas volcánicas intermedias a básicas (Conos volcánicos) del Cuaternario superior e Inferior	30-Superficies planas acumulativas (< 1°)	0.12 (0.01%)	Feozem háplico+Feozem calcárico	0.12 (0.33%)
		31-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	5.44 (0.36%)	Feozem háplico+Regosol éútrico+Leptosol lítico	5.44 (14.96%)
		32-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	6.88 (0.46%)	Regosol éútrico+Leptosol lítico+Feozem háplico	6.88 (18.93%)
		33-Complejo de cimas y laderas denudativas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	17.17 (1.15%)	Andosol mólico+Leptosol lítico+Feozem háplico	17.17 (47.24%)
		34-Laderas denudativas, fuertemente inclinadas (20-30°)	5.96 (0.4%)	Andosol mólico+Feozem háplico	5.96 (16.39%)
		35-Laderas denudativas, muy fuertemente inclinadas (>30°)	0.776 (0.05%)	Leptosol lítico+Andosol mólico+Regosol éútrico	0.78 (2.13%)
XII-Montañas volcánico-erosivas, ligera a medianamente disecionadas, formadas por andesitas del Cuaternario	36-Superficies planas acumulativas (< 1°)	1.4 (0.09%)	Feozem háplico+Leptosol lítico	1.4 (1.03%)	
	37-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	52.94 (3.53%)	Feozem háplico+Leptosol lítico+Feozem lúvico	52.94 (39.1%)	
	38-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	34.4 (2.3%)	Feozem háplico+Feozem lúvico+Andosol mólico	34.4 (25.4%)	
	39-Complejo de laderas y valles erosivos, mediana a fuertemente inclinados (10-20°)	45.23 (3.02%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	0.95 (1.06%)	
	40-Laderas erosivas, fuertemente inclinadas (20-30°)	0.95 (0.06%)	Regosol éútrico+Leptosol lítico	45.23 (33.4%)	

C	XIII-Montañas volcánico-erosivas, ligera a medianamente disecionadas formadas por andesitas del Cuaternario	41-Laderas denudativas,medianamente inclinadas (5-10°)	1.22 (0.08%)	Andosol mólico+Leptosol lítico+Feozem háplico	1.22 (25.75%)
		42-Laderas erosiva-denudativas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	2.36 (0.16%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Andosol mólico	1.51 (31.76 %)
		43-Laderas erosivo-denudativas, fuertemente inclinadas (20-30°)	1.17 (0.08%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Andosol mólico	2.02 (42.48%)
XIV-Montañas volcánico-estructurales, ligera a medianamente disecionadas, formadas por basalto, brechas volcánicas básicas, brechas volcánicas intermedias a básicas, rocas ígneas extrusivas básicas y tobas basálticas del Cuaternario	44-Superficies planas acumulativas (< 1°)	1.87 (0.13%)	Leptosol lítico+Andosol mólico	1.87 (0.45%)	
	45-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	76.74 (5.12%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Andosol mólico	99.35 (23.82%)	
	46-Complejo de cimas y laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	227.22 (15.17%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Andosol mólico	101.46 (24.32%)	
	47-Complejo de cimas y laderas erosivo-denudativas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	107.61 (7.18%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Andosol mólico	87.79 (21.04%)	
	48-Laderas denudativas, fuertemente inclinadas (20-30°)	3.72 (0.25%)	Leptosol lítico+Feozem háplico+Andosol mólico	126.69 (30.37%)	
XV-Montañas volcánico-erosivas, medianamente disecionadas formadas por rocas ígneas extrusivas ácidas y brechas volcánicas intermedias a ácidas del Cuaternario	49-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	0.54 (0.04%)	Feozem háplico+Vertisol éutrico	0.54 (5.63%)	
	50-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	1.53 (0.1%)	Feozem háplico+Leptosol lítico	4.59 (47.45%)	
	51-Laderas erosivas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	6.69 (0.45%)	Feozem háplico+Leptosol lítico	3.63 (37.52%)	
	52-Laderas erosivas, fuertemente inclinadas (20-30°)	0.91 (0.06%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	0.91 (9.4%)	
XVI-Montañas volcánico-estructurales medianamente disecionadas formadas por andesitas del Cuaternario	53-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	0.24 (0.02%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	1.67 (25%)	
	54-Laderas erosivo-denudativas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	2.96 (0.2%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	1.67 (25%)	
	55-Laderas erosivo-denudativas, fuertemente inclinadas (20-30°)	2.61 (0.17%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	1.67 (25%)	

Continuación anexo Figura 4

C	56-Laderas erosivo-denudativas, muy fuertemente inclinadas (> 30°)	0.86 (0.06%)	Leptosol lítico+Feozem háplico	1.67 (25%)
XVII-Montañas volcánico-erosivas ligera a fuertemente disecionadas formadas por rocas ígneas extrusivas intermedias del Cuaternario superior e inferior	57-Superficies acumulativo-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°)	5.76 (0.38%)	Andosol mólico + Luvisol mólico	5.77 (3.85%)
	58-Laderas erosivo-denudativas, medianamente inclinadas (5-10°)	16.48 (1.1%)	Andosol mólico + Luvisol mólico+Feozem háplico	16.48 (11.01%)
	59-Complejo de cimas y laderas erosivas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)	84.63 (5.65%)	Andosol mólico+Leptosol lítico+Luvisol mólico	84.63 (56.51%)
	60-Laderas erosivas, fuertemente inclinadas (20-30°)	37.03 (2.47%)	Andosol mólico+Leptosol lítico+Feozem lúvico	37.02 (24.72%)
	61-Laderas erosivas, muy fuertemente inclinadas (> 30°)	5.86 (0.39%)	Andosol mólico+Leptosol lítico	5.86 (3.91%)
	XVIII-Valles fluvio-tectónicos intermontanos formados por depósitos aluviales del Cuaternario superior e inferior	62-Complejo de cauces y planos de inundación, ligeramente inclinado (1-5°)	3.36 (0.22%)	Feozem háplico
63-Complejo de cauces y terrazas indiferenciadas, medianamente inclinadas (5-10°)		0.63 (0.04%)	Feozem háplico	1.28 (28.2%)
64-Complejo de cauces y terrazas indiferenciadas, mediana a fuertemente inclinadas (10-20°)		0.56 (0.04%)	Feozem háplico	2.25(49.56%)

SM - Sistema morfoclimático.

A- Llanura sedimentaria con clima seco semiárido templado subhúmedo.

B- Montañas medias (H < 3 000 m, lomeríos y llanuras formadas por rocas ígneas extrusivas y rocas del complejo vulcanógeno-sedimentario con clima semiárido templado.

C- Montañas medias a altas (H > 3 000 m), lomeríos y llanuras formadas por rocas ígneas extrusivas, rocas del complejo vulcanógeno-sedimentario y depósitos sedimentarios con clima templado subhúmedo, cálido a semi frío.

3. El complejo de cimas y laderas erosivo-denudativas (medianamente inclinadas 5-10°) de las montañas volcánico-estructurales, ligera a medianamente diseccionadas, formadas por basalto, brechas volcánicas básicas, brechas volcánicas intermedias a básicas, rocas ígneas extrusivas básicas y tobas basálticas del Cuaternario que cubren el 15.17% de la superficie. Con asociación de suelos compuesta por: Leptosol lítico, Phaeozem háplico y Andosol mólico (Unidad XIV-46).

Estas tres unidades cubren amplias zonas de la planicie lacustre, la planicie proluvial-lacustre y del relieve montañoso. Las unidades morfoedafológicas restantes se diferencian esencialmente por sus intervalos de pendientes y/o origen geológico.

Si bien cada una de estas unidades morfoedafológicas comparten características biofísicas semejantes, difieren en su dinámica que es resultado de las modificaciones realizadas por el manejo y el tipo de apropiación del territorio. En este trabajo se recurrió a la superposición del mapa morfoedafológico con el fottomosaico para, a grandes rasgos, reconocer las principales modificaciones del área en estudio. Se distinguieron tres condiciones contrastantes que alteran la posibilidad del suelo de proveer servicios ambientales: los suelos en barrancas, los suelos sellados por la edificación de construcciones urbanas y los suelos que mantienen áreas verdes.

1. Suelos de barrancas con pendientes mayores de 10°

Como consecuencia de la expansión del área urbana, hoy en día la mayor parte de los suelos que no se encuentran sellados están ubicados en barrancas de las unidades morfoedafológicas XII, XIV y XVII (véase Anexo). Las delegaciones que presentan un alto porcentaje de suelos en estas condiciones son: Álvaro Obregón (44.9%), Cuajimalpa (71.1%), Magdalena Contreras (71.4%), Tlalpan (22.5%), Milpa Alta (23.5%) y Gustavo A. Madero (20%; Tabla 1). Los suelos ligero a medianamente profundos de estas zonas posibilitan el funcionamiento potencial de soporte de cobertura vegetal y de

conducción de agua para recarga del acuífero; sin embargo, son suelos con un alto riesgo de degradación por erosión hídrica, si son desprovistos de la vegetación o si se manejan inadecuadamente.

2. Suelos sellados

Se clasificaron como suelos sellados, aquéllos que se encuentran cubiertos por algún tipo de infraestructura (casas, edificios, vialidad, patios, estacionamientos, banquetas, industria, etc.). En la Tabla 1 se muestran los porcentajes de suelo sellado por delegación. La superficie total del Distrito Federal que está sellada es de 713 km², que equivale a un 47% de su territorio, y que afecta todas las unidades morfoedafológicas, sobre todo las superficies planas acumulativas de la llanura (Unidad I). Las delegaciones con los porcentajes más elevados de suelos sellados (> 80% de su superficie sellada) son: Cuauhtémoc (95), Iztacalco (94.5), Benito Juárez (93.2), Azcapotzalco (91.2), Venustiano Carranza (89.8), Iztapalapa (89.1) y Gustavo A. Madero (79.8). Coyoacán presenta un alto porcentaje de suelos sellados (75.2%), las demás delegaciones presentan menos del 50% de su superficie sellada, en gran medida porque coinciden con aquellas delegaciones que tienen parte de su territorio bajo la figura jurídica de suelo de conservación. Sin embargo, se puede apreciar en el mapa de la Figura 1 que el avance de la mancha urbana, y con ello los suelos sellados, ya abarca una parte de esta área.

3. Suelos con vegetación

En observaciones puntuales de sitio se pudo apreciar que los suelos naturales son una minoría, en la mayoría de los casos los materiales naturales se hallan mezclados con materiales de desecho de diversas fuentes y tipos. Por ejemplo, grava y escombros en el Parque las Águilas, basura en la Alameda del Norte, en San Lorenzo Tezonco y en el Parque Deportivo Xochimilco, lodos residuales o azolves en el Parque Deportivo Xochimilco, composta en la Alameda Central, arena y suelos importados en el Parque México (Figuras 5a y b). La magnitud de esta situación no se pudo cuantificar, debido a la dificultad técnica que representa esta heterogeneidad típica de los suelos urbanos (Stasch *et al.*, 1999 y 2000).

Tabla 1. Suelo sellado y suelos en barrancas por Delegación (2000)

	Delegación	Extensión total		Área sellada	Área no sellada	Suelos en barrancas con pendientes > 10° (%)
		km ²	%	%	%	
1	Álvaro Obregón	88	5.9	52.4	47.6	44.92
2	Azcapotzalco	34	2.2	91.2	8.8	0
3	Benito Juárez	27	1.8	93.2	6.8	0
4	Coyoacán	54	3.6	75.2	24.8	0.82
5	Cuajimalpa	81	5.4	36.9	63.1	71.15
6	Cuauhtémoc	33	2.2	95.0	5.0	0
7	Gustavo A. Madero	87	5.8	79.8	20.2	20.29
8	Iztacalco	23	1.5	94.5	5.5	0
9	Iztapalapa	116	7.7	89.1	10.9	4.95
10	Magdalena Contreras	66	4.4	34.3	65.7	71.49
11	Miguel Hidalgo	48	3.2	61.5	38.5	8.20
12	Milpa Alta	285	19	23.1	76.9	23.50
13	Tláhuac	86	5.8	38.0	62.0	3.78
14	Tlalpan	309	20.6	28.3	71.7	22.51
15	Venustiano Carranza	34	2.3	89.8	10.2	0
16	Xochimilco	128	8.6	35.9	64.1	18.90

Nota: los porcentajes fueron calculados según coberturas que obtuvo el Instituto de Geografía, UNAM, de la extensión total por Delegación.

- Área total del D.F.: 1 498 km²
- Extensión del área de conservación: 773 km² (51.6 %)
- Área total sellada: 713 km² (47%)
- Extensión total de suelos en pendientes > 10°: 336.2 km² (22.4 %)



Figura 5. Fotografías con perfiles de suelos urbanos (a Alameda Norte; b Deportivo Xochimilco).

La identificación y clasificación de suelos urbanos es un tema de estudio emergente, con propuestas parciales como la de la WRB (Rossiter, 2007; IUSS Working Group WRB, 2006; Effland y Pouyat, 1997) que recientemente incorporó en su sistema de clasificación dos tipos de suelos urbanos, los Antrosoles: suelos modificados profundamente por actividades humanas, debido a adiciones de materia orgánica y residuos; y los Tecnosoles que contienen una cantidad significativa de artefactos ajenos al suelo o que están sellados por materiales creados por el ser humano, lo cual correspondería con los suelos “sellados” identificados en este trabajo y algunos más.

3.1 Índice de áreas verdes/habitante

La presencia y la salud de las áreas verdes en el Distrito Federal constituyen una respuesta de la calidad de los distintos tipos de suelo y el mante-

nimiento de sus funciones y, por ende, la provisión de servicios ambientales.

En la Tabla 2 se muestran los porcentajes de áreas verdes por habitante que mantiene cada Delegación. Se puede constatar que las delegaciones Azcapotzalco (6.7), Benito Juárez (5.0), Cuauhtémoc (3.2), Iztacalco (3.1), Iztapalapa (7.1) y Venustiano Carranza (7.4) presentan los índices más bajos del Distrito Federal, incluso menores a los valores recomendados a nivel internacional que fluctúan entre 9 y 16 m²/habitante (Guevara y Moreno, 1987). Esta situación indica una pobre calidad del ambiente para el habitante urbano de esas delegaciones con la consecuente pérdida de servicios ambientales.

El análisis de las áreas verdes también ha sido determinado por Ezcurra *et al.* (2006) quienes mencionan que todos los espacios abiertos dentro de la Ciudad de México han disminuido (entre 1950 y

Tabla 2. Áreas verdes por habitante en cada Delegación (2000)

	Delegaciones	Área no sellada (m ²)	Población total (INEGI, 2000) habitantes	Áreas “verdes” (m ² /habitante)
1	Álvaro Obregón	42 994 113	687 020	62.6
2	Azcapotzalco	2 944 128	441 008	6.7
3	Benito Juárez	1 788 355	360 478	5.0
4	Coyoacán	13 376 220	640 423	20.9
5	Cuajimalpa	51 116 816	151 222	338.0
6	Cuauhtémoc	1 638 847	516 255	3.2
7	Gustavo A. Madero	17 568 814	1 235 542	14.2
8	Iztacalco	1 266 442	411 321	3.1
9	Iztapalapa	12 597 982	1 773 343	7.1
10	Magdalena Contreras	43 363 350	222 050	195.3
11	Miguel Hidalgo	18 327 924	352 640	52.0
12	Milpa Alta	218 767 124	96 773	2260.6
13	Tláhuac	53 415 927	302 790	176.4
14	Tlalpan	221 211 380	581 781	380.2
15	Venustiano Carranza	3 447 194	462 806	7.5
16	Xochimilco	82 241 015	369 787	222.4

Nota: se destacan en cursivas los valores por debajo de los índices mínimos recomendados (Guevara y Moreno, 1987).

2005) a diferentes tasas, manteniendo un cambio anual de -1.5%. Así los parques, jardines y espacios públicos que cubrían 13% de la zona metropolitana en 1950, se redujeron a 9.5% en 1995.

Por otro lado, es notoria la distribución desigual de las áreas verdes en relación con la concentración poblacional; algunas delegaciones, como Milpa Alta, cuentan con 2260 m²/habitante (considerando el suelo de conservación), mientras que otras delegaciones, como Iztacalco, tienen apenas 3.1 m²/habitante. Sin embargo, como lo menciona Pisanty (2000) la desigualdad metropolitana también se refleja en el tipo de áreas verdes; en ese sentido, a pesar de la gran extensión de áreas verdes

de Milpa Alta, esta delegación no reconoce ningún espacio bajo la categoría de parque.

Usos del suelo

En la Tabla 3 se presenta la superficie de suelo por delegación, destinada a diferentes usos, conforme a lo reportado en los programas delegacionales. En ellos se censaron los siguientes usos: habitacional, mixto, comercio y servicios, industria, equipamiento, vialidad primaria, recreación y no urbanizado (Grajales, 2000) y se comparan contra el porcentaje de área sellada obtenido en este estudio.

Las delegaciones más urbanizadas (0% categoría no urbanizado en Tabla 3) son Azcapotzalco, con el

Tabla 3. Comparación entre los valores de áreas selladas estimados por Delegación y los reportes de asociaciones de uso del suelo para las mismas

Delegaciones	Uso de suelo (en % de la Delegación)									Área sellada (Delegación %)
	1	2	3	4	5	6	7	8*	9	
Álvaro Obregón	31.4	19.0	0.4	0.5	4.2	1.7	23.7	18.6	+4.8	52.4
Azcapotzalco	24.2	35.9	0.6	21.8	11.1	2.4	3.7	0	+4.8	91.2
Benito Juárez	77.7	8.3	0.6	0.5	2.9	7.4	1.9	0	+4.2	93.2
Coyoacán	54.0	19.3	0.8	0.6	12.1	1.6	11.3	0	+13.2	75.2
Cuajimalpa	39.8	7.9	0.1	0	0.5	1.2	1.9	48.6	+12.6	36.9
Cuauhtémoc	26.6	43.3	2.5	0	5.6	18.4	3.2	0	+1.4	95.0
Gustavo A. Madero	34.5	27.7	0.5	3.4	8.0	1.6	7.1	16.9	-4.1	79.8
Iztacalco	56.2	23.4	1.4	1.0	5.2	1.9	10.3	0	-5.4	94.5
Iztapalapa	37.3	18.5	13.8	1.9	8.8	3.8	8.4	7.1	-5.0	89.1
Magdalena Contreras	40.1	1.7	0.6	0	1.2	1.7	0.6	53.8	+11.0	34.3
Miguel Hidalgo	56.2	11.8	0.2	1.1	16.7	2.1	11.5	0	+26.6	61.5
Milpa Alta	6.1	0.6	0	0	0.3	0	0	93.0	-16.1	23.1
Tláhuac	14.1	4.3	0.8	0	2.5	1.8	4.0	72.4	-14.5	38.0
Tlalpan	12.7	2.7	0	0.2	1.3	0.5	1.8	80.8	-10.9	28.3
Venustiano Carranza	21.6	42.7	1.2	1.3	26.5	1.3	4.9	0	+3.8	89.8
Xochimilco	31.1	1.7	0.1	0.1	3.4	0	0.8	62.9	-0.5	35.9

1. Habitación, 2. Mixto, 3. Comercio y servicios, 4. Industria, 5. Equipamiento, 6. Vialidad primaria, 7. Recreación, 8. No urbanizado, 9. "Diferencia entre fuentes".

* En este porcentaje se incluye la superficie de preservación ecológica, rescate ecológico, producción rural agroindustrial, la zona agropecuaria, las zonas de preservación y las áreas no utilizables en las que se prohíbe construir.

Nota: se destaca con cursivas la Delegación con el porcentaje más alto de un uso específico.

más alto uso industrial a nivel delegacional; Benito Juárez, con el más alto uso habitacional; Cuauhtémoc, con usos dominantes mixto y de vialidad primaria; Venustiano Carranza, dominando en equipamiento y uso mixto; Iztacalco, Miguel Hidalgo y Coyoacán. En tanto que Contreras, Xochimilco, Tlalpan, Tláhuac, Milpa Alta y Cuajimalpa, el área no urbanizada sigue siendo dominante, por lo cual es urgente hacer uso de los instrumentos de planeación de uso del suelo, incorporando criterios de conservación y calidad de vida del habitante urbano. Gustavo A. Madero y Álvaro Obregón presentan un intenso uso habitacional del suelo pero mantienen áreas de recreación. En sus áreas no urbanizadas se tendría que privilegiar al suelo como cuerpo natural, permitiendo así que provea servicios ambientales, entre ellos, el mantenimiento de vegetación.

Las delegaciones con los más altos porcentajes de superficie cubierta con usos de suelo para habitación, comercio y servicios, industria o equipamiento y vialidad primaria, así como mezclas de estos usos (mixtos), (clases 1 a 6) presentan lógicamente, bajos porcentajes de usos de suelo “no urbanizado” y de recreación (clases 7 y 8).

En la columna 9 de la Tabla 3 se muestran las diferencias entre los valores reportados de uso de suelo (*Ibid.*) y las áreas selladas, obtenidos en este trabajo; el signo positivo indica una subestimación de las áreas selladas con respecto a los usos del suelo y los signos negativos indican sobreestimación; estas disparidades pueden adjudicarse a las diferencias propias de los métodos utilizados. Por ejemplo, las diferencias positivas podrían explicarse, en función de que en los registros oficiales de uso del suelo no se cuantifican los jardines particulares que sí se consideran en las imágenes utilizadas en este trabajo, diferencia que resulta relativamente significativa en las delegaciones Coyoacán (+13.2), Cuajimalpa (+12.6) y Magdalena Contreras (+11.0), pero sobre todo en Miguel Hidalgo (+26.6). Las diferencias negativas indican una discrepancia entre lo reportado y lo observado, posiblemente debido a invasiones de suelos, misma que llega a ser considerable en ciertas delegaciones como Tlalpan (-10.9), Tláhuac (-14.5) y Milpa Alta (-16.1).

En estos resultados, aunque preliminares, se puede reconocer una relación entre los usos de suelo y sus características (grado de sellamiento), de manera que la identificación y estudio de características similares pudieran ayudarnos en el entendimiento y definición de los suelos urbanos.

Servicios ambientales de los suelos

En función de las características morfoedafológicas del Distrito Federal, del origen y la calidad de los materiales de formación de los suelos y de sus extensiones se pueden inferir algunos servicios ambientales que los suelos estarían ofreciendo a la población (Tabla 4). Esta primera aproximación permite reconocer que los suelos urbanos ofrecen servicios muy diversos y multi-escalares, que benefician tanto a la población del Distrito Federal como a sus áreas aledañas.

Los servicios considerados guardan una estrecha relación con la calidad de vida de la población. Entre los principales servicios se pueden mencionar el mejoramiento de la recarga y el filtrado que mejora la calidad del agua, en una ciudad caracterizada por la escasez y contaminación de este recurso. Tal es la importancia de este servicio, que ante la escasez de suelo que posibilita la infiltración y recarga, actualmente se buscan técnicas artificiales (pozos de recarga) para suplir esta función.

El servicio de regulación, retención y amortiguamiento de contaminantes depositados a partir de la atmósfera también es importante en la ciudad, donde la quema de combustibles fósiles origina metales pesados que, aunados a la presencia de ozono, acidifican las lluvias de la región. La concentración de estos contaminantes en la atmósfera suele ser mayor en la zona sur-oeste de la ciudad (GDF, 2000).

La regulación de la erosión del suelo evita tolvaneras que aumentan la contaminación del aire y reducen el aporte de materiales (basura, desechos) que impiden el funcionamiento adecuado de drenajes y alcantarillados, incrementando el riesgo de inundaciones en las partes bajas de la ciudad.

La presencia de suelos profundos, que permiten un buen enraizamiento y la conservación de su calidad, asiste en la mitigación y prevención de la incidencia de enfermedades y plagas en plantas, y

Tabla 4. Servicios ambientales potenciales de los suelos urbanos del D.F.

Unidades morfoedafológicas principales	Delegaciones (o porciones de ellas)	Servicios ambientales	Suelos de áreas verdes		
			Jardines particulares	Parques	Zona de conservación
Complejo de cimas y laderas medianamente inclinadas (5-10°) formadas por rocas ígneas extrusivas básicas con suelos de tipo Leptosol lítico, Feozem háplico y Andosol mólico (unidad XIV-46).	Tlalpan, Milpa Alta y Xochimilco, donde del 15 al 25% de los suelos se encuentran sellados.	Recarga de acuíferos	+	++	+++
		Filtrado de agua	++	++	+++
		Retención de agua	++	+++	+++
		Retención de contaminantes	-	++	+++
		Captura de carbono	+	++	+++
Superficie acumulativa-erosivas, ligeramente inclinadas (1-5°) de lomeríos y colinas volcánico-estructurales, formadas por rocas ígneas extrusivas intermedias a básicas con suelos de tipo Andosol mólico, Feozem háplico y Leptosol lítico (unidad X-27).	Tlalpan, Milpa Alta y Xochimilco, donde del 30 al 35% de los suelos se encuentran sellados.	Control de erosión	+	++	+++
		Mantenimiento de biodiversidad (incluyendo agrobiodiversidad)	-	+	+++
		Regulación de enfermedades y plagas	-	+	++
		Servicios culturales	-	++	+++
		Servicios ambientales	Camellones	Jardines particulares	Parques
Superficies planas acumulativas de la llanura formada por depósitos lacustres, (unidad I-1). Hoy en día, los suelos no-sellados se encuentran sujetos a formación y modificaciones antrópicas.	Iztacalco, Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza y porciones de Gustavo A. Madero, Coyoacán, Benito Juárez, Xochimilco e Iztapalapa, donde del 60 al 95% de los suelos se encuentran sellados.	Recarga de acuíferos	-	-	++
		Filtrado de agua	-	+	+
		Retención de agua	-	+	+
		Retención de contaminantes	-	+	+
		Captura de carbono	-	-	+
Control de erosión	-	-	+		
Mantenimiento de biodiversidad (incluyendo agrobiodiversidad)	-	-	+		
Regulación enfermedades y plagas	-	-	+		

contribuye a preservar la biodiversidad que caracteriza la parte central de México.

En las áreas en que aún persiste la agricultura (área de suelo de conservación), un suelo sano contribuye a la productividad y agrobiodiversidad, así como a la captura de bióxido de carbono que redundaría en beneficios para toda la población. Los servicios ambientales otorgados por los suelos sólo pueden ser proveídos cuando éstos no se encuentran sellados, por lo cual su evaluación se realizará a partir de los suelos no sellados, que mantienen algún tipo de vegetación.

CONCLUSIONES

El crecimiento acelerado y poco planeado del Distrito Federal ha propiciado la urbanización y sellamiento de sus suelos. Por otro lado, la planeación urbana no ha considerado el mantenimiento de las áreas verdes como fuente de servicios ambientales que permitirían mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Los suelos se sellan indiscriminadamente en función de criterios inmediatistas para dar solución a presiones sociales, de vivienda o de fluidez de tránsito.

En esta región existe un alto porcentaje de suelos en barrancas con pendientes $> 10^\circ$, muchos de los cuales presentan asentamientos irregulares o son utilizados como tiraderos a cielo abierto, eliminando así la posibilidad de que los suelos permitan recargar el acuífero, mantener una vegetación ribereña propia y estabilizar los taludes. Los riesgos por una alta susceptibilidad a la erosión hídrica son comunes en delegaciones como Magdalena Contreras, Cuajimalpa y Álvaro Obregón.

En los últimos 50 años, con la acelerada urbanización del Distrito Federal, se ha perdido gran extensión de suelo producto del sellamiento, llegando a una situación en la que hay seis delegaciones prácticamente sin suelo libre, y en el caso de las áreas libres de construcción el suelo se presenta como un mosaico de fragmentos aislados formado por pocos suelos naturales y muchos con caracteres antrópicos.

Prácticamente la mitad de las delegaciones cuentan con un elevado porcentaje de áreas selladas,

donde el suelo y sus respectivas funciones han sido eliminados. El proceso de sellamiento ha alcanzado tales niveles que no cumplen con los valores mínimos recomendados a nivel internacional de áreas verdes/habitante. Tales como Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza.

A pesar de que el 50% del Distrito Federal se localiza en tres unidades morfoedafológicas principales, la heterogeneidad morfoedafológica del Distrito Federal es muy grande. Esta riqueza edáfica constituye un gran potencial en relación con la planeación de posibles servicios ambientales que la población podría recibir de sus suelos, aun los no sellados. Las delegaciones que cuentan con esta posibilidad, como Tlalpan, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, deben considerar la necesidad de mantener y valorar este recurso, más si son suelos todavía sin influencia antrópica.

Las delegaciones Álvaro Obregón, Coyoacán, Cuajimalpa y Magdalena Contreras, que se han desarrollado sobre las laderas y el piedemonte del Distrito Federal y cuya función principal es la recarga del acuífero, debieran dar énfasis al control y/o regularización de esta situación.

Además de la urbanización, otra consecuencia del escaso entendimiento y valoración de los servicios ambientales de los suelos se refleja en los materiales de relleno utilizados para parques y jardines, los cuales no sólo impiden el buen funcionamiento del suelo en estas áreas, sino que pueden llegar a constituir fuentes de contaminación. Esta situación puede deberse en parte a que no se cuenta con una normatividad específica a este respecto.

Aun así, los suelos antrópicos todavía tienen potencial para brindar servicios ambientales para contribuir a un ambiente urbano sustentable (Verter, 2007; Craul, 1999) y se considera que sería importante continuar con las investigaciones conducentes a la identificación, tipificación y valoración de este recurso mediante cartografía más fina, para establecer un plan de manejo óptimo. Este plan tendría que considerar la gran diversidad de tipos y asociaciones de suelos que se lograron identificar en este trabajo a través del mapa morfoedafológico y que representan a la vez una riqueza y un reto en la administración de tan escaso recurso.

Hoy día, algunos de los servicios ambientales básicos, como la purificación del aire o el filtrado del agua en las zonas urbanas, son atendidos mediante políticas ambientales diseñadas *ad hoc*. Sin embargo, uno de los componentes básicos de todo ecosistema terrestre, como es el suelo, se atiende de manera desarticulada y parcial (Cotler *et al.*, 2007).

Conforme a los resultados obtenidos en este diagnóstico, el manejo más recomendable debiera orientarse a la protección de los fragmentos de suelo libre de construcciones adjudicándole la función de área verde, esto incrementaría su potencial en la captura de carbono, la producción de oxígeno, la cantidad de sombra, el control de humedad y temperatura, y en algunos casos, incremento del área urbana de recreación.

AGRADECIMIENTOS

A Estela Carmona e Hilda Rivas por su apoyo en la búsqueda y análisis de información sobre uso del suelo y el apoyo logístico. A Bernardo Soto Ramos y Celia López Miguel por la elaboración de los mapas. A Patricia Balvanera y a los revisores anónimos que enriquecieron el documento final con importantes sugerencias y comentarios.

REFERENCIAS

- Benavides M., H. M. (1990), "Acumulación de Pb en el follaje de varias especies arbóreas de la Ciudad de México", Resumen en *Memorias del XI Congreso Mexicano de Botánica*, Oaxtepec, Morelos.
- Beyer, L., P. Kahle, H. Kretschmer and Q. Wu (2000), "Soil organic matter in urban soils", in *Proceedings of the First International Conference on soils of urban, industrial, traffic and mining areas*, vol. III: The soil quality and problems: What shall we do?, pp. 579-584.
- Blume, P. H. (1990), *Handbuch des Bodenschutzes*, Ecomed Verlag, Germany.
- Blume, P. H., P. Felix-Henningsen, W. R. Fischer, H. G. Frede, R. Horn and K. Stahr (1997), *Handbuch der Bodenkunde*, Ecomed Verlag, Germany.
- Brady, C. N. and R. R. Weil (1999), *The nature and properties of soils*, Prentice Hall.
- Breuste, J., H. Feldmann and O. Uhlmann (eds.; 1998), *Urban Ecology*, Springer Verlag, Germany.
- Bullock, P. and P. J. Gregory (1991), *Soils and the urban environment*, Blackwell Scientific Publications, Great Britain.
- Cervantes, B. J. y R. R. López (2000), "Geomorfología", en Garza, G. (coord.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*, El Colegio de México-Gobierno del Distrito Federal, México, pp. 54-60.
- Cotler, H. y C. Siebe (2000), "Suelos y medio ambiente", en Garza, G. (coord.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*, El Colegio de México-Gobierno del Distrito Federal, México, pp. 469-473.
- Cotler, H., Á. Priego y E. Insunza (2002), "Mapa morfoedafológico del Distrito Federal", en Mazari, H. M., S. Cram y F. Rojo, *Programa de manejo integral del suelo. Informe Técnico Final*, UNAM-Gobierno del Distrito Federal/Comisión Ambiental Metropolitana), México.
- Cotler, H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones (2007), "La conservación de suelos: un asunto de interés público", *Gaceta Ecológica*, núm. 83, México.
- Craul, P. J. (1999), *Urban soils: applications and practices*, John & Wiley Sons, New York.
- De la Lanza-Espino, G. and L. García-Calderón (1995), "Historical summary of the geology, climate, hydrology, culture, and natural resource utilization in the basin of Mexico", in Fenn, M. E., L. I. de Bauer and T. Hernández-Tejeda (eds.), *Urban Air Pollution and Forest. Resources at risk in the Mexico City Air Basin*, Springer, Cap. 1, pp. 3-19.
- Effand, W. R. and R. V. Puyat (1997), "The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas", *Urban Ecosystems*, 1, pp. 217-228.
- ESRI (1999a), *Arc View Ver 3.2*, GIS, Environmental Systems Research, Institute Inc.
- ESRI, (1999b), *Arc/Info Ver. 8.0*, GIS, Environmental Systems Research, Institute Inc.
- Ezcurra, E., M. Mazari, I. Pisanty y A. G. Aguilar (2006), *La cuenca de México. Aspectos ambientales críticos y sustentabilidad*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Fenn, M. E., L. I. de Bauer and T. Hernández-Tejeda (eds.; 1995), *Urban air pollution and forest. Resources at risk in the Mexico City Air Basin*, Springer.
- García, E. (1998), *Climas (modificado de Köppen por García)*, CONABIO, escala 1 000 000, México.

- Garza, G. (coord.; 2000), *La Ciudad de México en el fin del milenio*, Gobierno del Distrito Federal y El Colegio de México, México.
- Geissert, D. (2002), *La cartografía morfoedafológica: un método integral para la evaluación del recurso suelo*, en López-Olguín, J. F., A. Aragón y M. A. Valera (eds.), *Métodos de investigación en las Ciencias Ambientales*, Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, pp. 1-14.
- GDF-Secretaría de Medio Ambiente (2000), *Informe Anual de la calidad del aire y precipitaciones ácidas en el valle de México*, México, D. F., http://www.sma.df.gob.mx/simat/anuales/inf_anual2000.pdf.
- González-Morán, T., R. Rodríguez and S. A. Cortés (1999), "The basin of Mexico and its metropolitan area: water abstraction and related environmental problems", *Journal of South American Earth Sciences*, no. 12, pp. 607-613.
- Grajales, G. (2000), "Uso del suelo y conformación territorial", en Garza, G. (coord.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*, Gobierno del Distrito Federal y El Colegio de México, pp. 511-520.
- Guevara, S. y P. Moreno (1987), *Áreas verdes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, Departamento del Distrito Federal y El Colegio de México, Plaza y Valdés, México.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T., J. González Sánchez y J. J. Zamorano Orozco (2006), La Cuenca de México y sus cambios demográficos-espaciales. Cap. I. Formas del relieve en la cuenca de México. *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM, pp. 17-42.
- Huinink, J. Th. M. (1998), "Soil quality requirements for use in urban environments", *Soil and Tillage Research*, no. 47, pp. 157-162.
- INEGI (1984), *Mapa edafológico*, escala 1:250 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1997), *Mapa topográfico* (cartas E14 A39, E14A28, E14A38, E14A48, E14A29, E14A49, E14B211, E14B31 y E114B41) escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Instituto de Geografía-UNAM (2002), Fotomosaico del área en estudio escala 1:50 000.
- IUSS Working Group WRB (2006), "World reference base for soil resources 2006" (2nd ed.), *World Soil Resources Report 103*, FAO, Rome.
- Jim, C. Y. (1998), "Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong", *Landscape and Urban Planning*, vol. 40, Issue 4, pp. 235-249.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris and G. E. Schuman (1997), "Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation", *Soil Science Society of America Journal*, no. 61, pp. 4-10.
- Kern, J. S. and M. G. Johnson (1993), "Conservation tillage impacts on national and atmospheric carbon levels", *Soil Science Society of America Journal*, no. 57, pp. 200-210.
- Lal, R. (1999), "Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use, 45-55", *World Soils Resources Report*, Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean, *Proceedings of an IFAD/FAO Expert Consultation*, FAO.
- Lal, R., (ed.; 2002), *Encyclopaedia of Soil Science*, Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 1362-1365.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005), *Ecosystems and human well-being synthesis*, Island Press, Washington, [<http://www.millenniumecosystem.org>].
- Marín, L. E., O. Escolero-Fuentes and A. Trinidad-Santos (1995), "Physical geography, hydrogeology, and forest soils of the basin of Mexico", in Fenn, M. E., L.I. de Bauer and T. Hernández-Tejeda (eds.), *Urban Air Pollution and Forest. Resources at risk in the Mexico City Air Basin*, Springer, Cap. 3, pp. 44-65.
- Mooser, F., A. Montiel y A. Zúñiga (1996), *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla*, CFE, México.
- Pisanty, I. (2000), "Ecosistemas y áreas verdes", en Garza G. (coord.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*, Gobierno del Distrito Federal-El Colegio de México, México, pp. 134-139.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente; 2000), *Annual Review*, Nairobi, Kenia.
- Rossiter, D. G. (2007), "Classification of urban and industrial soils in the world referent base for soil resources", *J. Soils Sediments*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Sanders, R. A. (1986), "Urban vegetation impacts on the hydrology of Dayton, Ohio", *Urban Ecology*, vol. 9, issues 3-4, pp. 361-376.
- Sombroek, W. G., F. O. Nachtergaele and A. Hebel (1993), "Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils", *Ambio* (12)7, pp. 417-426.
- Stasch, D., O. Beck and K. Stahr (1999), "Entwicklung von Bewertungssystemen für Bodenressourcen in Ballungsräumen", *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 91(2), pp. 1112-1115.

- Stasch, D., K. Holland, O. Beck and K. Stahr (2000), "Evaluation of soil resources in urban areas", *Proceedings of the First International Conference on soils of urban, industrial, traffic and mining areas*, pp. 125-130.
- Stroganova, M. N. and M. G. Agarkova (1993), "Urban soils: experimental study and classification (exemplified by soils of southwestern Moscow)", *Eurasian Soil Science*, vol. 25, Issue 3, pp. 59-69.
- Stroganova, M. and T. Prokofieva (2000), "Urban soils-concept, definitions, classification", *Proceedings of the First International Conference on soils of urban, industrial, traffic and mining areas*, vol. I: The unknown urban soil, detection, resources and faces, pp. 235-239.
- Vegter, J. (2007), "Urban soils -an emerging problem?", *J. Soils Sediments*, 2:63.