



Investigaciones Geográficas (Mx)
ISSN: 0188-4611
edito@igg.unam.mx
Instituto de Geografía
México

Rodríguez Gamiño, María de Lourdes; López Blanco, Jorge; Vela Correa, Gilberto
Indicadores ambientales biofísicos a escala detallada para la planeación territorial en Milpa Alta,
Centro de México
Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 80, 2013, pp. 21-35
Instituto de Geografía
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56926151003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Indicadores ambientales biofísicos a escala detallada para la planeación territorial en Milpa Alta, Centro de México

Recibido: 16 de marzo de 2011. Aceptado en versión final: 31 de agosto de 2012.

María de Lourdes Rodríguez Gamiño*

Jorge López Blanco**

Gilberto Vela Correa***

Resumen. Para evaluar los recursos naturales en Milpa Alta, a escala detallada en el Centro de México, se determinaron indicadores ambientales biofísicos de estado. Se obtuvieron unidades ambientales biofísicas (UAB) a partir de las propiedades morfogenéticas del relieve, las cuales sirvieron de base como unidades sintéticas de referencia. Se determinaron indicadores de relieve, de cobertura vegetal y uso del suelo, clima y suelos. Las UAB predominantes son de origen endógeno volcánico acumulativo de laderas superiores, medias e inferiores de montaña de flujos lávicos de andesitas-basálticas pleisto-holocénicas. Las condiciones climáticas influyen en la distribución espacial de la cobertura vegetal y en el uso del suelo. El uso del suelo es de agricultura de temporal de cultivos anuales y semipermanentes con cultivo de nopal verdura. Existen áreas forestales con

Abies religiosa, *Pinus* spp y áreas de pastizal, que se emplean para la producción de ganado ovino. Los suelos presentan elevados contenidos de materia orgánica, son ligeramente ácidos, de textura migajón-arenosa y con un complejo de cambio dominado por Ca^{2+} . Los indicadores ambientales biofísicos de estado, de los grupos de UAB analizados, no muestran un deterioro para el área en estudio. El análisis estadístico, a partir del agrupamiento de las UAB por indicadores ambientales biofísicos, constituyen una referencia espacial que permitirá plantear estrategias de conservación y manejo de sus recursos naturales.

Palabras clave: Indicadores ambientales biofísicos, Unidades ambientales biofísicas, Planeación del territorio, Milpa Alta, Centro de México.

Environmental biophysical indicators at detailed scale for land management in Milpa Alta, Central Mexico

Abstract. In order to evaluate the present condition of natural resources of the Milpa Alta area (Central Mexico) Environmental Biophysical Indicators (EBI) of state at detailed scale were determined. Environmental Biophysical Units (EBU) from morphogenetic characteristics of relief were obtained, which served as base as synthetic-unit of

reference. EBI indicators of relief, land use/cover, climate and soil, factors were determined. The dominant EBU are from endogenous accumulative volcanic origin of upper, medium and lower mountain slopes of andesite-basalte lava flows of Pleistocene-Holocene. The dominant land use is of rain-feed agriculture of annual and semi permanent prickly

* Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México D.F. E-mail: lulugamino@hotmail.com

** Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF), República de Chile No.6, Col. Centro, CP 06010, México D.F., E-mail: jlopezblanco@hotmail.com

*** Departamento el Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, 04960, Coyoacán, México, D. F. E-mail: tepetate01@hotmail.com

pear, crops. There are forest areas with *Abies religiosa*, *Pinus* spp and grassland areas which are used for sheep production. Climate influences the spatial distribution of land use-cover. Soils presented high organic matter contents, slightly acid, loamy-sand texture, and a complex of change dominated by Ca^{2+} . The EBI indicators of state analyzed of EBU groups do not show deterioration for the study area. The statistical

analyses from the EBI clustering using the EBU represent a spatial reference that will allow proposing strategies for handling and conservation of natural resources.

Key words: Environmental biophysical indicators, Environmental biophysical units, Land management, Milpa Alta, Central Mexico.

INTRODUCCIÓN

Los indicadores ambientales permiten contar con fuentes de información que describen el estado en que se encuentra el ambiente biofísico y los recursos naturales. Se han considerado como indispensables dentro del diseño de políticas de manejo y planeación por los gobiernos locales; permiten generar información cuantificable, la cual ayuda a explicar cómo están cambiando las condiciones biofísicas a través del tiempo (Farrow y Winograd, 2001).

El desarrollo de los indicadores ambientales se inicia a finales de la década de los años ochenta en Canadá y en algunos países de Europa y tuvo un mayor impulso a partir de la Cumbre de la Tierra celebrada en Estocolmo (1972), Río de Janeiro (1992) y Johannesburgo (2002), en donde se derivaron recomendaciones para la creación y uso de los indicadores, con el propósito de medir los avances de la compatibilidad ambiental, social y económica en los países participantes (Quiroga, 2001).

La presión de las comunidades humanas sobre los recursos naturales ha ido en aumento en las últimas décadas, esto ha generado procesos de degradación en el ambiente biofísico, de diferentes tipos, magnitudes y ámbitos de influencia. Como una estrategia de evaluación de dichos procesos, se han determinado y aplicado indicadores ambientales generales a nivel nacional (SEMARNAT, 2012); sin embargo, en el ámbito local, es decir, a escala detallada, existe una carencia marcada para el desarrollo de indicadores que permita medir el grado de deterioro de los recursos naturales (Masera *et al.*, 2000).

Los indicadores ambientales proporcionan información y tendencias sobre las condiciones de los fenómenos naturales, económicos y sociales (INE, 1997). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2003) establece

que un indicador cuantifica y simplifica los fenómenos y ayuda a entender la realidad compleja, por tanto, un indicador puede dar seguimiento a los cambios que se presentan en un sistema socioambiental. Stein *et al.* (2001) establecen que el valor de los indicadores ambientales depende de su escala temporal-espacial y de su utilidad para los tomadores de decisiones, debido a que auxilian en la elaboración de propuestas de administración del capital natural y sobre todo porque son un instrumento de comunicación en general.

Los indicadores permiten contar con información sobre los factores biofísicos y socioeconómicos, que representan elementos clave en la problemática ambiental (CSIRO, 1998), debido a que no son solamente una pieza de información cuantitativa, sino que describen y evalúan los factores estructurales del paisaje, y es a través de los indicadores que se registran los avances en beneficio de la población (*Ibid.*).

Los trabajos de la OCDE (1997) y la *Environment Canada* (1994) desarrollaron: *a*) una terminología y un marco teórico comunes; *b*) un acuerdo sobre los indicadores básicos; *c*) la publicación de los indicadores y *d*) la utilización regular de estos indicadores para el análisis y la evaluación de los resultados ambientales. Con base en lo anterior es necesario contar con un marco metodológico para estructurar la información y hacerla más accesible.

Criterios de selección de los indicadores

La selección de los indicadores es una fase importante dentro del proceso de generación de bases de información ambientales para la planeación territorial. En primera instancia está la evaluación de los datos que deben ser de calidad, confiables, tener una escala temporal y espacial apropiada y los costos para su obtención y elaboración deben ser bajos. Por otra parte, en las características de los indicado-

res se deben considerar la posibilidad de medirlos, su pertinencia, representatividad, sensibilidad a los cambios, especificidad y conexiones causales. Asimismo, es importante la utilidad de los indicadores para el usuario, por eso deben tener validez, cantidad limitada, claridad en el diseño, fáciles de aplicar y tener capacidad de no ser redundantes.

Los indicadores basados en datos locales proveen información práctica para los procesos de seguimiento hacia el desarrollo sustentable. Siendo necesario contar con instrumentos que puedan medir y facilitar el progreso hacia los objetivos ambientales, sociales y económicos (Reed *et al.*, 2006).

Es fundamental que las comunidades locales participen en la identificación, selección y monitoreo de los indicadores, y además de manera activa en los procesos de planeación e implementación de proyectos (Corbiere-Nicollier *et al.*, 2003). Por otra parte, los métodos empleados en la colecta e interpretación de los indicadores deben ser de fácil manejo por especialistas y no especialistas (como las poblaciones locales), para que sean ellos los participantes activos dentro de los procesos de selección de indicadores, de esta manera los indicadores pueden ser utilizados de manera más eficiente por la población local (Carruthers y Tinning, 2003).

Modelo PER de indicadores

El modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) es el que más se ha aplicado en la evaluación de indicadores. Está basado en una lógica de causalidad, asume que las actividades humanas ejercen una *presión* sobre el ambiente y afectan la calidad de sus elementos y la cantidad de sus recursos (*estado*); ante lo cual la sociedad responde a través de políticas ambientales, económicas y sectoriales, así como cambios en la percepción y comportamiento (*respuesta social*), (OCDE, 1997; *Environment Canada*, 1994). El PER es la primera dimensión del marco teórico en el que se estructuran los trabajos de la OCDE (Avérous, 1997).

El objetivo de este estudio es determinar y evaluar los principales indicadores ambientales biofísicos en la delegación Milpa Alta, a escala detallada (1:20 000), que sirvan como información básica en la elaboración de programas y proyectos para un manejo de los recursos naturales y en el proceso

de planeación territorial, aplicando el modelo PER y considerando solo a los indicadores de estado.

METODOLOGÍA

Área en estudio

La delegación Milpa Alta se localiza al sur del Distrito Federal a los 19°03' y 19°13' N y 98°57' y 99°10' W. Su superficie es de 28 464 ha (Figura 1). Geológicamente se encuentra dentro de la Formación Chichinautzin que está conformada por un conjunto de conos monogenéticos de escoria, flujos lávicos y productos volcánicos del Holoceno (Martin, 1980, 1982). La secuencia de lavas y depósitos piroclásticos está compuesta por andesitas y dacitas de oxihornblenda y augita; andesitas basálticas y basalto de olivino y augita (Martin, 1980, 1982; Siebe *et al.*, 2004).

El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C(w₂)(w), con una temperatura media anual de 14.5° C y una precipitación de 901 mm anuales (García, 1988). Las unidades de suelos reportadas son: Andosoles, Leptosoles, Phaeozem háplico y Regosol eútrico (INEGI, 1984; WRB, 2006). Los tipos de vegetación son de bosque de coníferas, donde predominan las especies de *Pinus hartwegii*, *P. montezumae* y *P. leiophylla* y *Abies religiosa*. Dentro de los pastizales dominan las gramíneas como *Festuca tolucensis*, *Poa annua*, y *Muhlenbergia macroura* y los usos del suelo dominantes son el forestal, agrícola, pecuario y urbano.

Método

Para la elaboración de este estudio se consideraron las cartas topográficas y temáticas de Milpa Alta y Amecameca, a escala 1:50 000 (INEGI, 1984) y a escala 1:10 000 (DDF, 1984), las cuales sirvieron de base en la elaboración de los mapas del área en estudio. Se obtuvieron las fotografías aéreas a escala 1:25 000 (INEGI, 1971) y ortofotos a escala 1:20 000 (GDF, 2000). Con el fin de contar con una referencia territorial para presentar los resultados de los indicadores ambientales, se delimitaron unidades ambientales biofísicas (UAB), considerando a los factores estructurales del paisaje biofísico, principalmente a las características morfogenéticas del

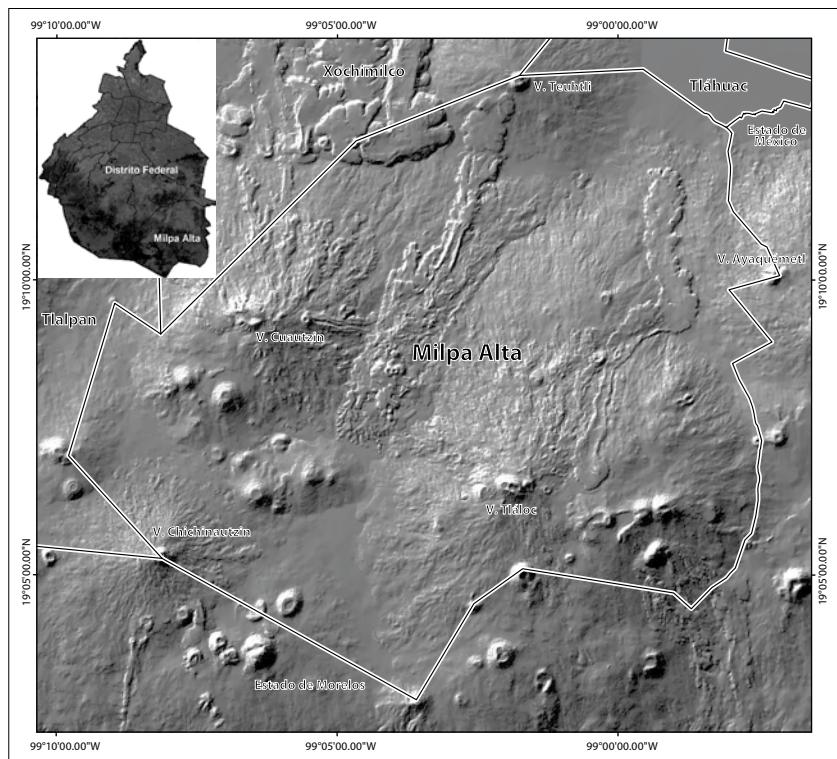


Figura 1. Localización del área en estudio, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal.

relieve (Verstappen y Van Zuidam, 1991). A partir de las grandes unidades morfoestructurales del área se delimitaron los sistemas geomorfológico morfogenéticos (SMG), esto con el fin de tener una forma simplificada de analizar los conjuntos de UAB.

Con apoyo de la cartografía topográfica a escala 1:10 000 se elaboró el modelo digital del terreno (MDT) y sus mapas derivados (intervalos de altitudes, relieve sombreado, pendiente, orientación, etc.), que sirvieron de base cartográfica para la delimitación de las unidades geomorfológicas, para ello se aplicaron técnicas de fotointerpretación utilizando fotografías aéreas a escala 1:75 000 (INEGI, 1994).

Los indicadores ambientales biofísicos corresponden con los factores estructurales del paisaje: clima (temperatura y precipitación), relieve (pendiente y altitud), suelo (humedad, porosidad, textura, materia orgánica y pH), y las clases de cobertura vegetal y uso del suelo.

Como indicadores de clima se obtuvieron los datos promedio anuales de temperatura y precipitación del periodo 1960-2002, de catorce estaciones

meteorológicas con influencia en el área en estudio (IMTA, 1996; CNA, 2000). Con esos datos se realizaron los mapas de isoyetas e isotermas a partir de aplicar técnicas de interpolación espacial (distancia cuadrática inversa) utilizando el programa *surfer* (*Golden Software*, 2002).

El indicador *cobertura vegetal y uso del suelo* se obtuvo a partir de fotointerpretación en quince ortofotos a escala 1:20 000 del 2000. Las clases de cobertura vegetal y uso del suelo que se consideraron a partir de las establecidas por el INEGI (1984) son: agricultura de riego, agricultura de temporal de cultivos anuales, agricultura de temporal de cultivos semipermanentes, bosque de coníferas (*Abies religiosa* y *Pinus* spp.), bosque de latifoliadas (*Quercus* spp.), matorral, pastizal y uso urbano.

Se aplicó un procedimiento de corrección fotogramétrica para eliminar la deformación intrínseca por proyección central y relieve, de lo trazado en las fotografías aéreas, y obtener con ello imágenes ortorectificadas. Posteriormente se digitizaron las unidades geomorfológicas y las de cobertura vegetal y uso del suelo. Con ello se obtuvo el mapa de

segmentos y polígonos, a partir del cual se generaron los mapas correspondientes. Esto se realizó utilizando el sistema de información geográfica (SIG) ILWIS (ITC, 2003).

Posterior a la etapa de fotointerpretación, se llevaron a cabo recorridos de campo para la verificación de la delimitación de las unidades geomorfológicas, las correspondientes ambientales biofísicas, y las de cobertura vegetal y uso del suelo. Se muestreó el suelo en 77 sitios a una profundidad de 0-30 cm, y se georeferieron con apoyo de un localizador geográfico (GPS).

De las propiedades físicas y químicas del suelo se consideró el contenido de humedad, porosidad, textura, porcentaje de materia orgánica y pH (Karlen y Stott, 1994; Larson y Pierce, 1991). Los suelos se secaron y se tamizaron utilizando una malla de 2 mm de abertura. Se obtuvo el porcentaje de humedad, por secado en estufa a peso constante, la porosidad por el *Soil Survey Staff* (1999) y la textura por el método de Bouyucos (SEMARNAT, 2002). El pH en agua, por el método del potenciómetro con electrodo de vidrio, el contenido de materia orgánica (MO) por Walkley y Black (1934).

Se realizó el análisis multivariado con el fin de conjuntar a los grupos de UAB de acuerdo con las dimensiones estadísticas de las trece variables o indicadores ambientales biofísicos. A partir de estos indicadores se llevó a cabo el análisis de componentes principales (ACP). Para obtener esta matriz se realizó la sobreposición cartográfica del mapa de los siete grupos de UAB, sobre el mapa de los doce sistemas morfogenéticas (SMG), resultando 52 casos de UAB-SMG, los cuales a su vez fueron sobrepuertos con los 13 mapas-variable-indicador de altitud, pendiente, porosidad, materia orgánica, pH, arenas, limos, arcillas, temperatura, precipitación, uso agrícola, bosque de pino. Estos datos se procesaron estadísticamente en el programa SYSTAT (*Systat Software*, 2003).

A partir del método gráfico, con el ACP se determinaron los factores y se generó un esquema de los dos primeros, considerando los eigenvalores contra su recíproco (Dallas, 1998; Salinas, 2005). Se fijaron las trece variables (indicadores ambientales) que más influyeron y que tienen mayor nivel de correlación con otras variables, y finalmente

se realizó el análisis de agrupamiento estadístico (*cluster*) de los 52 casos de UAB-SMG mediante distancias euclidianas y se analizaron los tres principales grupos estadísticos generados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se definieron siete grupos de UAB, las de mayor extensión fueron las de origen endógeno volcánico acumulativo de laderas de montaña de flujos lávicos, conformadas por andesitas basálticas, andesitas y dacitas, pleisto-holocénicas (Tabla 1 y Figura 2; Rodríguez, 2008).

Indicador de estado del factor relieve

El área en estudio presenta principalmente un relieve montañoso volcánico que se caracteriza altitudinalmente por los intervalos de 2240-2500 y >2500-2800 msnm, en las unidades de piedemonte acumulativo de los SMG, S02 Tláloc, S04 Cuautzin y S06 Teuhatlí, y en la planicies internas de los conos de escoria del S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S08 Acusacayo y en el S11 Planicie de Tláhuac.

Los intervalos de >2 800-3 100, >3 100-3 400, y >3 400-3 690 msnm se encuentran en las laderas superiores de montaña internas y externas de los conos cineríticos y en las laderas de montaña superiores, medias e inferiores, de flujos lávicos, de los S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S03 Otates, S04 Cuautzin, S05 Comalera, S06 Teuhatlí, S07 Ayaquémetl, S08 Acusacayo, y S09 Acopíaxco.

Los intervalos de pendiente 00-02°, >02-04° y >04-08° se presentan en las unidades de piedemonte acumulativo de los S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S06 Teuhatlí, en las planicies internas de los conos cineríticos del S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S08 Acusacayo, y en las planicies del S11 Planicie de Tláhuac.

Las pendientes más inclinadas están en los intervalos de >08-16°, >16-32° y >32-75°, se localizan en las laderas superiores internas y externas, de los conos cineríticos y en las laderas de montaña superiores y medias, de flujos lávicos de los S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S03 Otates S04 Cuautzin, S05 Comalera, S07 Ayaquémetl, S08 Acusacayo y S09 Acopíaxco.

Tabla 1. Grupos de unidades ambientales biofísicas y su extensión, Milpa Alta, Distrito Federal

Grupos de Unidades Ambientales Biofísicas	Superficie (ha)	%
1. Volcánico acumulativo de laderas superiores de montaña (internas y externas) de conos cineríticos pleisto-holocénicos (andesitas, basaltos y dacitas).	2 082	4.4
2. Volcánico acumulativo de laderas superiores de montaña de flujos lávicos pleisto-holocénicos (andesitas, basaltos y dacitas).	4 625	9.9
3. Volcánico acumulativo de laderas medias de montaña de flujos lávicos pleisto-holocénicos (andesitas, basaltos y dacitas)	11 946	25.5
4. Volcánico acumulativo de laderas inferiores de montaña de flujos lávicos pleisto-holocénicos (andesitas, basaltos y dacitas).	19 339	41.2
5. Volcánico acumulativo de laderas superiores, medias e inferiores de lomeríos de conos cineríticos del pleistoceno (andesitas y basaltos)	625	1.3
6. Exógeno acumulativo aluvial y mixto de piedemontes holocénicos de laderas de montaña y lomeríos	6 277	13.4
7. Exógeno acumulativo de planicies aluviales holocénicas, generales, intermontanas, e internas de cráter de cono cinerítico	2 001	4.3
Total	46 894	100.0

Fuente: Rodríguez (2008).

Indicador de estado de cobertura vegetal y uso del suelo

El mapa de cobertura vegetal y uso del suelo del año 2000 se muestra en la Figura 3. La agricultura de riego es dominante en el S11 Planicie de Tláhuac y en los piedemontes acumulativos del S06 Teuhtli, principalmente en el entorno del poblado de San Antonio Tecómitl, en donde se cultiva primordialmente alfalfa y hortalizas. Por el crecimiento de la población, las áreas urbanas se han incrementado y este tipo de agricultura ha venido perdiendo superficie, además de que los productores han abandonado esta actividad (*Ibid.*).

La agricultura de temporal de cultivos anuales se localiza en las laderas de montaña medias e inferiores, de flujos lávicos de los S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S06 Teuhtli, S09 Acopaxco, y en los piedemontes acumulativos del S05 Comalera, S04 Cuautzin y S06 Teuhtli, asimismo, en las planicies del S11 Planicie de Tláhuac. Los principales cultivos son la avena forrajera, maíz, papa, haba, chícharo y zanahoria, entre otros; éstos son de autoconsumo y los excedentes se venden en los mercados locales ya que se producen con bajos rendimientos.

La agricultura de temporal de cultivos semipermanentes corresponde con áreas de cultivo de nopal verdura que ocupa una superficie de 2 082 ha. Se ubica en las laderas de montaña inferiores de flujos lávicos y en el piedemonte del S02 Tláloc. Este cultivo representa una fuente de ingresos para la población local y tiene un peso importante en la economía regional y ha venido desplazando al maíz que es solo de autoconsumo. Milpa Alta tiene un importante peso económico debido a que produce cerca del 80% del nopal verdura que se consume en México y ha desarrollado toda una industria alrededor de esta cactácea.

En las laderas de montaña medias de flujos lávicos del S02 Tláloc se han establecido parcelas con ese cultivo, ahí se ha dado un proceso de cambio de cobertura de matorral a cultivo de nopal; asimismo, existen parcelas de ese cultivo conjugadas con áreas de crecimiento urbano. Esto se ha dado principalmente en las laderas inferiores del Tláloc y en los poblados de Villa Milpa Alta y Santa Ana Tlacotenco.

El uso de suelo forestal ocupa una superficie de 3 470 ha, estos bosques han estado sujetos a un proceso de deterioro provocado por la tala clandestina,

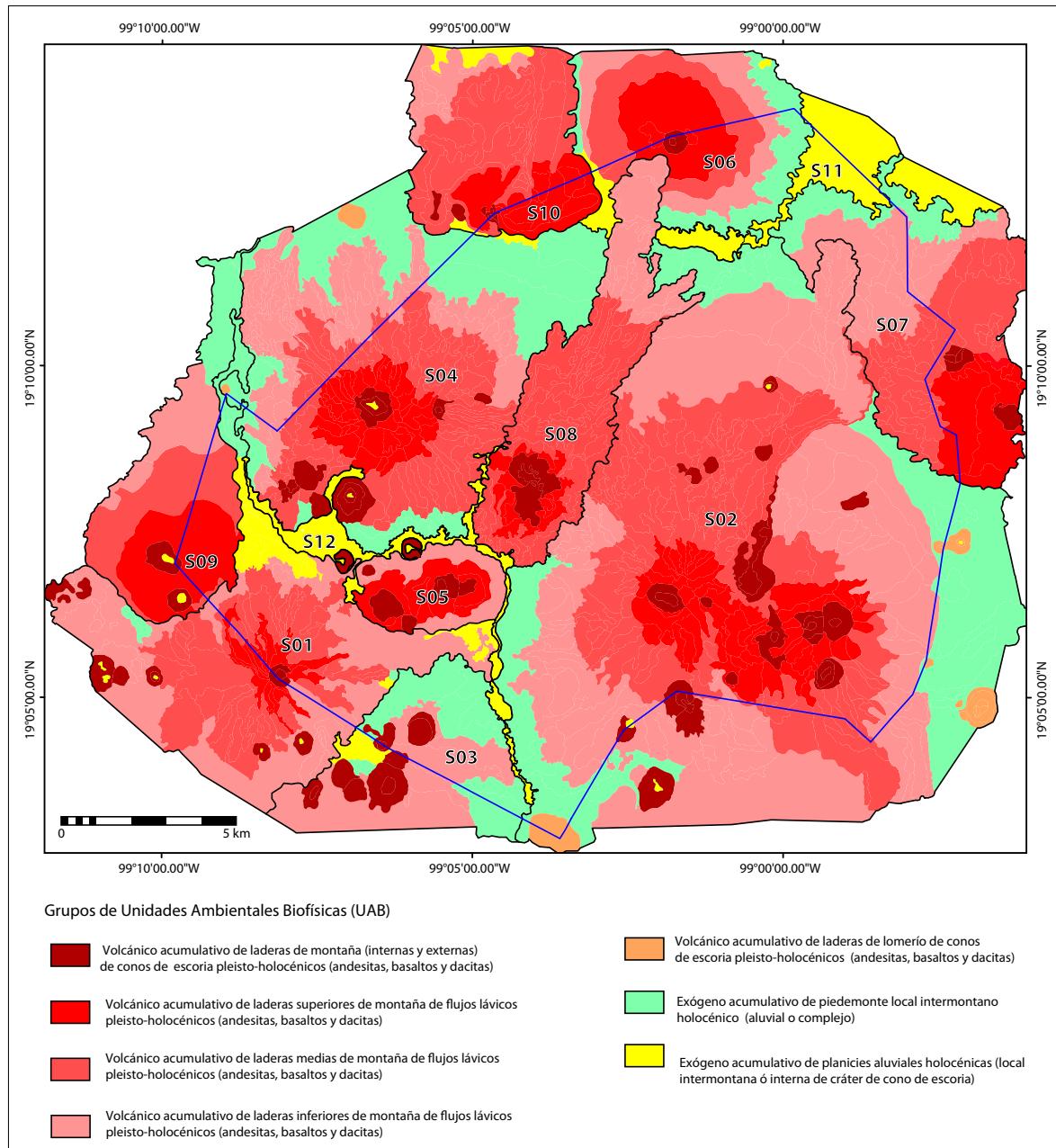


Figura 2. Los siete grupos de unidades ambientales biofísicas dentro de los doce sistemas morfogenéticos. Clave: S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S03 Otates, S04 Cuautzin, S05 Comalera, S06 Teuhatl, S07 Ayaquémel, S08 Acusacayo, S09 Acopíaxco, S10 Xochimilco, S11 Planicie Tláhuac y S12 Planicies Internas.

incendios forestales, plagas y enfermedades, que influye en la densidad arbórea. Por las condiciones climáticas y la altitud del área se presenta un bosque de coníferas en donde predominan los bosques de *Abies religiosa* y de *Pinus* spp.

El bosque de *Abies religiosa* ocupa una superficie de 1 561 ha, presenta una cobertura alta (>60%), se encuentra en las laderas de montaña superiores, medias e inferiores de flujos lávicos de los S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S04 Cuautzin y en el S09

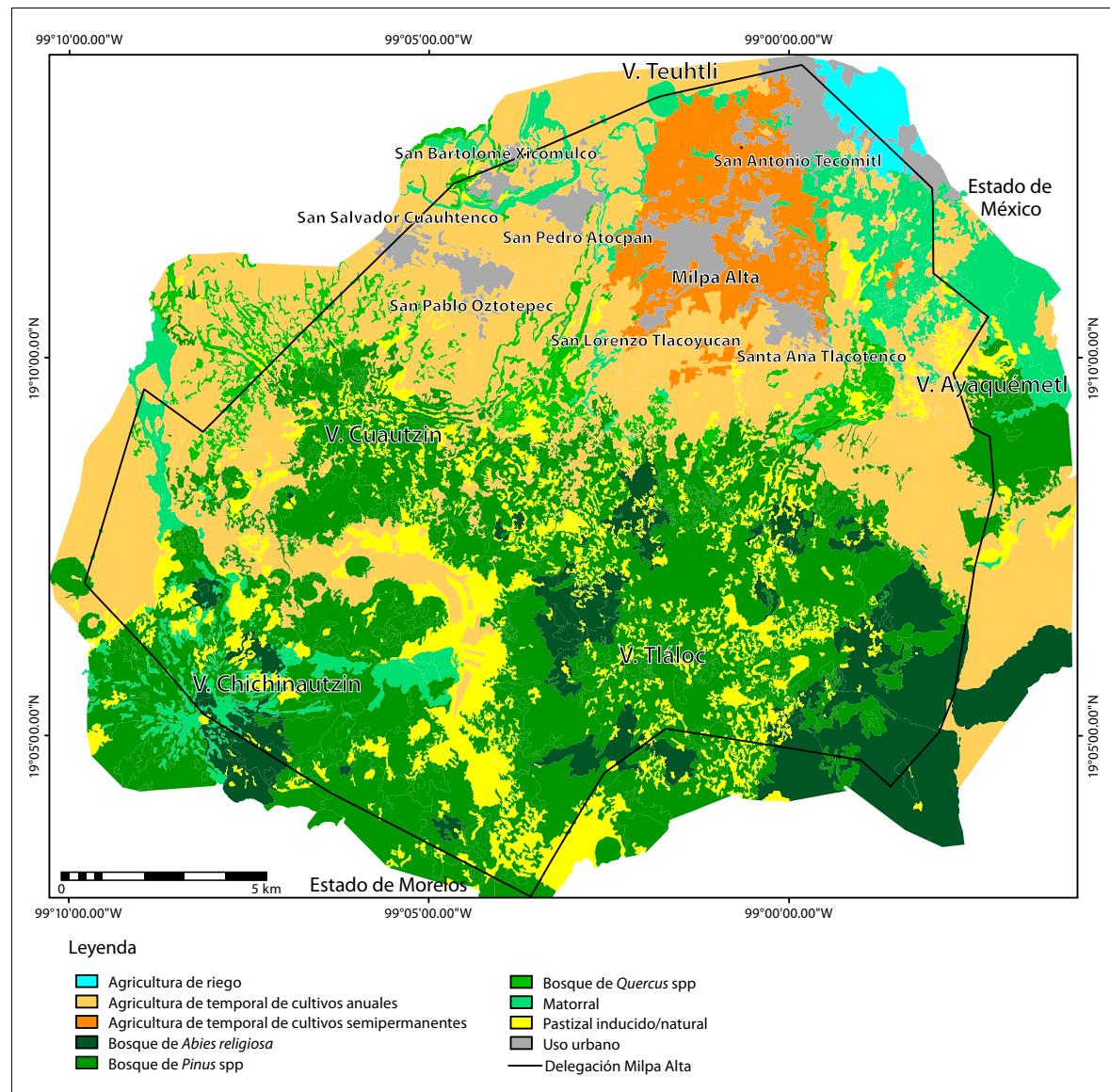


Figura 3. Clases de vegetación y uso del suelo para el 2000, en Milpa Alta, Distrito Federal.

Acopiaxco. En general, estos bosques se encuentran bien conservados a pesar de la presión que los campesinos ejercen sobre ellos y a los problemas de plagas y enfermedades a que han estado expuestos.

El bosque de *Pinus spp.* ocupa la mayor superficie en el área en estudio (8 633 ha), está representado por especies de *Pinus hartweggi*, *P. montezumae*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus*, presenta una cobertura media (50%) y se encuentra en las laderas de montaña superiores, medias e inferiores, de flujos

lávicos de los S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S03 Otates, S04 Cuautzin, S05 Comalera, S07 Ayaquémel, S08 Acusacayo y S09 Acopiaxco. Estos bosques se encuentran en un proceso de deterioro por la tala clandestina, incendios y pastoreo (*Ibid.*).

El bosque de latifoliadas, representado por el género *Quercus spp.*, se encuentra en áreas de cultivo de maíz y de nopal verdura cercanas a los poblados. Las especies representativas de este bosque son las *Quercus laurina*, *Q. cassipryss* y *Q. rugosa*. Se loca-

lizan principalmente en las laderas de montaña inferiores de flujos lávicos de los S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S08 Acusacayo, S09 Acopaxco y S10 Xochimilco, presentan una cobertura alta (>60%), y en algunos sitios solo quedan como relictos en los límites de parcelas.

El matorral se encuentra principalmente en las laderas de montaña medias e inferiores, de flujos lávicos del S01 Chichinatzin, S02 Tláloc y S07 Ayaquémel. Principalmente en áreas con derrames recientes de basalto, en donde no se ha formado suelo o éste es poco profundo. Algunas de las especies que se encuentran son: *Calliandra grandifolia*, *Juniperus deppeana*, *Opuntia* spp, *Sedum oxypetalum* y *Senecio praecox*.

Hay pastizales en las unidades de piedemonte acumulativo de los S02 Tláloc y S04 Cuautzin y en las planicies internas de los conos de escoria del S02 Tláloc, S04 Cuautzin y S08 Acusacayo. El aprovechamiento de los pastizales naturales en el área en estudio, en algunos casos, no es óptimo y, en muchos sitios, el sobrepastoreo (debido a la falta de organización y técnicas adecuadas) no permite obtener el máximo rendimiento. Por otra parte, el sobrepastoreo y el pisoteo excesivo del ganado impiden el buen desarrollo y la reproducción de las especies vegetales más nutritivas y apetecidas por el ganado, esto propicia el establecimiento de plantas que los animales no consumen y la exposición del suelo a los procesos erosivos. Las principales especies que constituyen este tipo de vegetación son: *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata*, *Calamagrostis tolucensis* y *Stipa ichu*.

El uso de suelo urbano ocupa una superficie de 1 359 ha, la cual está conformada principalmente por los pueblos originales que integran la delegación Milpa Alta. Las áreas urbanas se ubican en las unidades de piedemonte acumulativo del S02 Tláloc, S04 Cuautzin, y S06 Teuhtli, lo cual se explica principalmente, por el incremento de población en las últimas dos décadas.

Indicadores de estado del factor climático

En el área en estudio, la distribución espacial de la temperatura media anual está inversamente relacionada con la altitud. Las temperaturas bajas entre (menos de 7° C), abarcan altitudes que van

de los 3 200 a los 3 600 msnm, se presentan en las planicies internas de cráter de conos de escoria y en las unidades de laderas superiores y medias de montaña de flujos lávicos, en las laderas de montaña superiores internas y externas de conos de escoria de los S01 Chichinatzin, S02 Tláloc, S03 Otates, S04 Cuautzin y S09 Acopaxco.

Las temperaturas de 7 a 13° C abarcan altitudes que van de los 3 000 a los 3 200 msnm, se presentan en las laderas medias e inferiores de montaña de flujos lávicos de los S01 Chichinatzin, S02 Tláloc, S04 Cuautzin y S09 Acopaxco. Asimismo, en las planicies locales intermontanas y en el piedemonte acumulativo del S02 Tláloc y S04 Cuautzin.

De los 2 240 a 3 000 msnm se presentan intervalos de temperaturas que van de los 13 a los 17° C. Éstas están en los piedemontes acumulativos del S06 Teuhtli. En las laderas inferiores de montaña del S10 Xochimilco y en las planicies del S11 Planicie de Tláhuac, además abarcan las laderas superiores, medias e inferiores, de montaña del S06 Teuhtli y S07 Ayaquémel.

Este patrón de distribución de temperatura, al igual que la precipitación, influye en la distribución de la vegetación y en las actividades agrícolas, ya que la producción de nopal se distribuye de los 2 240 a los 3 000 msnm, en donde la temperatura es de 13.5 a 16° C.

El patrón de distribución de la precipitación se encuentra definido por dos pisos altitudinales, entre las altitudes de 2 240 a 3 000 msnm, en donde llueve de 600 a 900 mm anuales, y de los 3 000 a los 3 600 msnm, la precipitación es de 900 a 1 500 mm.

Se identificaron tres intervalos de precipitación de 600 a 900 mm, de 900 a 1 200 mm y de 1 200 a 1 500 mm. El primero se presenta en las laderas superiores medias e inferiores de montaña de flujos lávicos del S06 Teuhtli, en las laderas inferiores de montaña de flujos lávicos del S10 Xochimilco, y en la planicie acumulativa del S11 Planicie de Tláhuac. Además abarca el piedemonte acumulativo y las laderas inferiores y medias de montaña de flujos lávicos de los S02 Tláloc, S04 Cuautzin y S07 Ayaquémel.

El segundo está en las laderas medias e inferiores de montaña de flujos lávicos de los S01

Chichinautzin, S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S08 Acusacayo, S09 Acopaxco, y en el S12 Planicies Internas (locales intermontanas Cuautzin-Tláloc). El tercero se localiza en las laderas superiores internas y externas de montaña de conos cineríticos de los S02 Tláloc y S09 Acopaxco. De igual forma en las laderas superiores de montaña de flujos lávicos del S09 Acopaxco y S01 Chichinautzin.

La precipitación influye principalmente en la distribución de la vegetación, esto es, los bosques de coníferas que demandan más cantidad de agua, se localizan en donde la precipitación es superior a los 1 000 mm anuales, en cambio las latifoliadas están en el área en donde la cantidad de lluvia es menor a los 1 000 mm. Asimismo, influye en las propiedades del suelo y en las actividades agrícolas que se llevan a cabo en el área en estudio.

Indicadores de estado del factor suelo

Los intervalos de humedad en el suelo se presentaron con porcentajes bajos que van desde 10 hasta 40% y se localizan en las laderas superiores, medias, e inferiores de montaña de flujos lávicos y en el piedemonte acumulativo del S06 Teuhtli, en la planicie del S11 Planicie de Tláhuac, dentro de las laderas inferiores de montaña de flujos lávicos del S10 Xochimilco y en las laderas medias e inferiores de montaña del S07 Ayaquémel.

Los intervalos medios de humedad se encuentran entre 40 y 60% y están en las laderas medias e inferiores de montaña de flujos lávicos de los S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S08 Acusacayo, S09 Acopaxco y en el S12 Planicies Internas (locales intermontanas Cuautzin-Tláloc). Los porcentajes más elevados (61 a 78%) se encuentran en las laderas superiores internas y externas de montaña de conos de escoria de los S02 Tláloc, S09 Acopaxco, y en las laderas superiores de montaña de flujos lávicos del S01 Chichinautzin y S09 Acopaxco.

Lo anterior está influido por las condiciones de relieve y de clima, ya que a los 3 000 msnm la precipitación es superior a los 1 000 mm anuales. Por otra parte, los porcentajes más bajos de humedad en el área corresponden con las planicies, en ellas, las precipitaciones menores se presentan en el área lacustre y van de los 650 a los 1 000 mm.

Para todas las unidades ambientales biofísicas (UAB) la porosidad presentó intervalos que van de 18 a 73%, esto indica un buen nivel de porosidad, debido a los elevados contenidos de materia orgánica. Lo anterior se debe a que la densidad aparente, que oscila de 0.5 a 0.8 g/cm³, genera que los suelos tengan una alta retención de humedad y altos contenidos de materia orgánica, dado por la cobertura vegetal; sin embargo, donde la densidad aparente va de 0.9 g/cm³ a 1.0 g/cm³, los suelos presentan problemas de compactación provocada por el peso de la maquinaria que se emplea en las labores agrícolas.

En el área en estudio la textura dominante del suelo es migajón arenosa, con porcentajes de arenas que van de 24 a 90%. Los suelos se caracterizan por ser derivados de depósitos piroclásticos, en donde predominan los limos (10 a 51%), esto se debe principalmente a que los suelos son poco evolucionados, por lo reciente de los depósitos. Estos porcentajes de limos se presentan en el área forestal, principalmente en las laderas superiores y medias de montaña de flujos lávicos de los S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S04 Cuautzin, y S09 Acopaxco. Las arcillas son las que muestran menor proporción, van del 2 al 12%. Se observaron en áreas donde se han dado procesos de acumulación como en los piedemontes y planicies, acumulativos.

Los porcentajes altos de MO se presentan en los sitios ubicados en las laderas superiores, medias e inferiores, de montaña de los S02 Tláloc, S03 Otates, S04 Cuautzin, S05 Comalera, S08 Acusacayo, y S09 Acopaxco, lo anterior se debe a las buenas condiciones de conservación que presentan los bosques de pino, oyamel, aile y encino. Los porcentajes medios de materia orgánica están en los piedemontes acumulativos y en las laderas superiores, medias e inferiores de montaña del S02 Tláloc, S04 Cuautzin, S06 Teuhtli, S11 Planicie de Tláhuac, S12 Planicies Internas (locales intermontanas Cuautzin-Tláloc), donde se desarrolla la actividad agrícola, con bajos aportes de hojarasca.

Los bajos porcentajes de materia orgánica se localizaron en las laderas medias e inferiores de montaña de flujos lávicos del S01 Chichinautzin, en donde la cobertura vegetal es escasa, formada básicamente por matorrales, por lo que el aporte

de hojarasca al suelo es muy pobre, el espesor del suelo es menor a 10 cm, su formación es *in situ*, principalmente en las oquedades de las superficies de los flujos lávicos.

El pH es ligeramente ácido, debido a la cobertura vegetal de bosque mixto (pino, oyamel y encino). En las áreas agrícolas de temporal con cultivos semipermanentes, el pH es ácido, por el alto contenido de materia orgánica, debido a la aplicación de abonos y fertilizantes, para el cultivo de nopal verdura. Los valores de pH de 4.3 a 5.1 se localizan en las laderas superiores internas y externas de montaña de conos de escoria del S01 Chichinautzin, S02 Tláloc, S04 Cuautzin y S09 Acopiaxco.

El pH de 5.1 a 5.8 se presenta en las laderas superiores, medias e inferiores de montaña de los S02 Tláloc, S03 Otates, S04 Cuautzin, S05 Comalera, S08 Acusacayo y S09 Acopiaxco, lo anterior se debe a la presencia del bosque de pino, oyamel, aile y encino, y a los altos contenidos de materia orgánica en el suelo. Los valores de 5.8 a 7.0 se localizan en los piedemontes acumulativos y en las laderas superiores, medias e inferiores del S06 Teuhtli. Asimismo, en el S11 Planicie de Tláhuac y S12 Planicies Internas (locales intermontanas Cuautzin-Tláloc), los cuales tienen usos de suelo agrícola, debido al empleo de abonos orgánicos y fertilizantes y a una cobertura vegetal con una densidad baja, esto influye en la modificación de las propiedades del suelo, ya que presentan una densidad aparente cercana a 1 g/cm^3 , lo que indica menor porosidad y una mayor compactación del suelo.

Análisis de componentes principales (ACP)

El componente principal 1 (CP1) explicó el 37% del total de la varianza, el CP2 el 16% y el CP3 el 12% (Tabla 2). Los eigenvectores para los cuatro primeros factores que se obtuvieron con este análisis se muestran en la Tabla 3. En el factor uno, la variable que influye más y que tiene mayor nivel de correlación sobre las otras variables es la altitud (0.92), y se relaciona de manera inversa con la temperatura. La siguiente variable en importancia, por su influencia y nivel de correlación, es la temperatura (-0.90), posteriormente está el porcentaje de contenido de arcillas (-0.76), la presencia de bosque

de pino (0.74), la precipitación (0.72) y finalmente el pH (-0.66). Por lo tanto, este factor podría ser nombrado como Factor Altitud-Temperatura. En el mismo CP1, la altitud se relaciona directamente con la precipitación y con la presencia de bosque de pino, esto es, a mayor altitud, mayor cantidad de precipitación y de áreas con bosque de pino. Esto se presenta de forma evidente en las áreas con laderas superiores, medias e inferiores de montaña.

Las mayores cargas negativas del CP1 fueron las de la temperatura, el contenido de arcillas y el pH, esto es, se presentan simultáneamente áreas con valores bajos de temperatura, en suelos con poco contenido de arcillas y con valores bajos de pH. De

Tabla 2. Los tres primeros componentes principales, sus eigenvalores y la varianza explicada

Componente	Eigenvalores	Varianza explicada (%)
1	4.804	37.0
2	2.050	15.8
3	1.579	12.1

Tabla 3. Eigenvectores para los cuatro primeros factores resultado del ACP considerando las trece variables-indicadores. Se resaltan las cargas estadísticas ± 0.5

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Altitud	0.919	0.194	-0.048	-0.056
Pendiente	0.301	0.563	0.264	0.221
Porosidad	0.488	-0.341	-0.102	-0.431
Materia orgánica	0.444	-0.008	-0.061	-0.660
pH	-0.667	0.557	0.021	-0.127
Arenas	-0.157	0.464	-0.787	0.232
Limos	0.466	-0.518	0.598	0.275
Arcillas	-0.759	0.070	0.143	-0.456
Temperatura	-0.904	-0.244	0.045	0.047
Precipitación	0.717	-0.071	-0.253	0.378
Agricultura	-0.357	-0.671	-0.430	0.114
Bosque de Pino	0.745	0.385	0.036	-0.201
Matorral	-0.396	0.344	0.493	0.184

esta forma, el suelo que está en las porciones altas de las laderas de montaña (superiores internas y externas de conos de escoria) tiende más a la acidez. Por otro lado, el mayor porcentaje de arcillas está en los piedemontes y planicies aluviales acumulativas.

En el CP2, la primer variable en importancia por su influencia y por su nivel de correlación con respecto al resto de las variables, es la presencia del uso agrícola del suelo (-0.67), la inclinación de la pendiente (0.56), el pH (0.56) y el contenido de limos (-0.52). Por ello, este factor podría ser nombrado como Factor Agricultura-Pendiente. En este componente, la presencia de agricultura se relaciona inversamente con la pendiente, es decir, en áreas agrícolas hay menor inclinación del terreno. La mayor presencia de la agricultura está en los piedemontes y planicies aluviales acumulativas del holoceno. En el CP2, la variable de presencia de uso agrícola tiene una relación directa con el valor de porcentaje de contenido de limos en el suelo, esto es, que en las áreas en donde hay poca presencia de agricultura, también se presenta poca cantidad de limos.

De acuerdo con los resultados del ACP, los indicadores que permitieron diferenciar mejor las condiciones biofísicas de los grupos de UAB en Milpa Alta y que pueden ser consideradas, para el área evaluada, como buenos indicadores de estado son: del factor relieve, la altitud y la pendiente; del factor suelo, la textura dentro de la propiedades físicas, y el pH como propiedad química; con respecto al factor clase de vegetación/uso del suelo, la agricultura de temporal y la presencia del bosque de pino, son las variables que influyeron más en diferenciar a esas unidades.

La variable contenido de materia orgánica en el suelo, a pesar de que presentó bajos valores de cargas estadísticas, es una variable que influye de manera directa en el pH y la textura del mismo. Estas variables se pueden considerar como los principales indicadores de suelo, además de que pueden estimarse directamente en campo. Asimismo, las variables de los factores relieve y clase de vegetación/uso del suelo, se pueden obtener de una forma expedita y sencilla a partir del uso del modelo digital de elevación y de las ortofotos aéreas con fecha reciente de registro. Estas variables se pueden

seguir utilizando como indicadores de estado para el área de Milpa Alta.

Análisis de agrupamiento estadístico (cluster)

En el dendrograma de la Figura 4 se muestran los diferentes niveles de agrupamiento estadístico de los 52 casos de UAB-SMG, considerando las trece variables o indicadores ambientales de estado. Se agruparon por medio de su grado de similitud (distancia estadística euclíadiana), formando tres grupos principales y siete secundarios. Para fines de una simplificación en la interpretación de sus resultados, se analizan solo los tres primeros grupos.

En el Grupo 1 se encuentran las unidades que se caracterizan por estar entre los 2 300 a los 2 900 msnm, con valores altos de temperatura, valores bajos de precipitación, mayor presencia de actividades agrícolas, en grupos de UAB de laderas inferiores de montaña, piedemontes y planicies aluviales acumulativas, como la del S10 Xochimilco, S06 Teuhtli, S07 Ayaquémel y S11 Planicie de Tláhuac, los cuales se encuentran en la parte norte de la delegación y tienen amplias áreas con agricultura de temporal.

El Grupo 2 integra a las laderas de montaña inferiores, piedemontes y planicies internas de los sistemas morfogenéticos S01 Chichinautzin, S03 Otates y S04 Cuautzin, los cuales se caracterizan por tener altitudes entre los 3 000 a los 3 600 msnm, presentan valores bajos de temperatura y altos de precipitación, amplias áreas con presencia de bosques de pino, asimismo, en algunas zonas se llevan a cabo actividades de agricultura de temporal de cultivo de avena, de igual forma se caracterizan porque sus suelos presentan valores bajos de pH.

El Grupo 3 conjunta a los casos de laderas de montaña superiores internas y externas de conos de escoria, laderas de montaña superiores y medias, como en los sistemas S01 Chichinautzin, S02 Tláloc y S05 Comalera, en donde las variables que caracterizan a este conjunto de unidades es, en altitud, entre los 3 000 a los 3 600 msnm, con alta presencia de áreas con bosque de pino, en el suelo, con valores bajos de pH y ricos en materia orgánica.

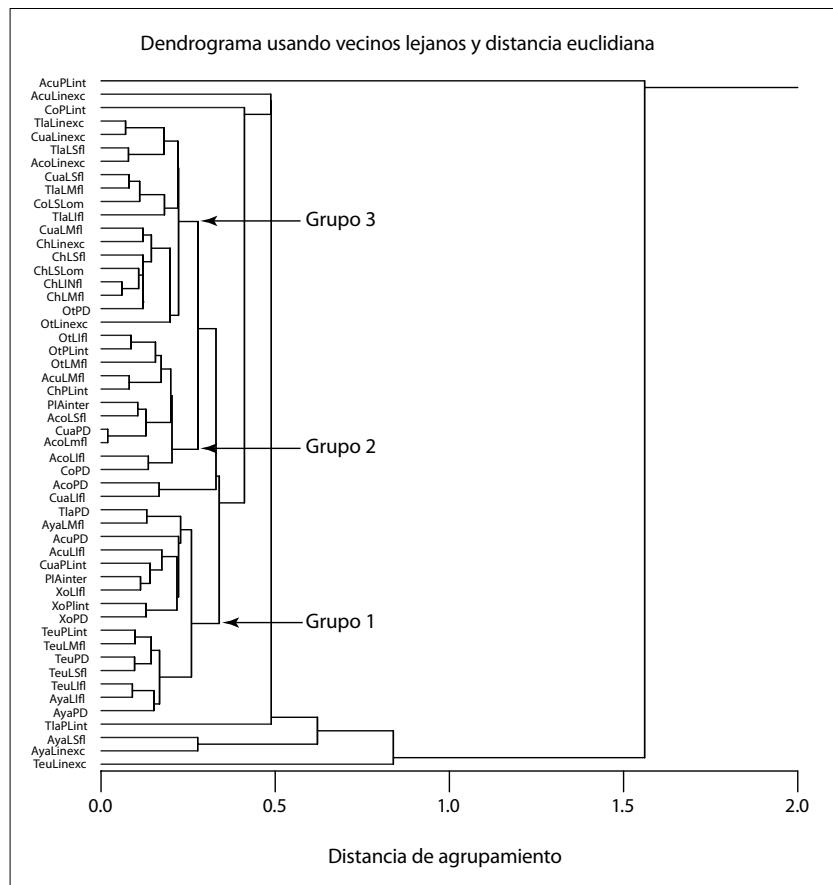


Figura 4. Dendrograma de los grupos formados por el análisis cluster entre los 52 casos de UAB-SMG, considerando trece variables o indicadores ambientales de estado.

CONCLUSIONES

Los indicadores ambientales biofísicos de estado, determinados y evaluados a escala detallada o local, aportan información fundamental sobre el estado actual en que se encuentran los recursos naturales de la delegación Milpa Alta, del Distrito Federal. Asimismo, permiten contar con bases científicas y metodológicas para la planeación territorial, para la toma de decisiones y para dar seguimiento al desarrollo sustentable.

Los grupos de unidades ambientales biofísicas determinados son una referencia cartográfica indispensable para la evaluación de los indicadores ambientales, ya que la heterogeneidad del relieve (altitud y pendiente) tienen una clara influencia sobre la temperatura y precipitación, que determinan los patrones de distribución de la vegetación, las propiedades físicas y químicas del suelo, así

como las actividades agropecuarias que se realizan en Milpa Alta.

El indicador de estado de clase de vegetación/uso de suelo, mostró que los principales usos son el forestal, agrícola y pastizal. Este indicador permitió identificar con claridad los patrones espaciales de cobertura/uso existente en el 2000, en el área en estudio.

La temperatura y la precipitación influyen en la distribución de la vegetación, esto es, los bosques de coníferas que demandan más cantidad de agua se localizan donde la precipitación es superior a los 1 000 mm anuales, en cambio las latifoliadas se encuentran en el área en donde la cantidad de lluvia es menor a los 1 000 mm. Además, influye en algunas de las propiedades del suelo y en las actividades agrícolas que se llevan a cabo en el área de Milpa Alta.

Los indicadores de suelo mostraron que son de buena calidad, tanto en las UAB con uso de suelo

forestal como en el agrícola. Las características físicas y químicas de los suelos en el área están determinadas por los factores formadores de suelo y por su origen volcánico. Sin embargo, algunas UAB de laderas de montaña de flujos lávicos, en donde la cobertura vegetal es escasa, formada principalmente por matorrales, y en donde el aporte de hojarasca al suelo es muy pobre, los suelos son de formación *in situ*, en las oquedades de las superficies rugosas de las coladas de lava.

De acuerdo con los resultados del análisis de componentes principales, los indicadores que permitieron diferenciar mejor las condiciones biofísicas de los grupos de UAB en Milpa Alta y que pueden ser consideradas, para el área evaluada, como buenos indicadores de estado son: del factor relieve, la altitud y la pendiente; del factor suelo, la textura dentro de la propiedades físicas, y el pH como propiedad química; del factor clase de vegetación/uso del suelo, la agricultura de temporal y la presencia del bosque de pino, esas fueron las variables que influyeron más en diferenciar a los grupos de UAB por sistema morfogenético.

Con el análisis estadístico de formación de cúmulos mediante similitud, se dio el agrupamiento de las 52 UAB-SMG con respecto a las 13 variables-indicadores de estado analizadas y permitió contar con información consistente sobre sus características biofísicas.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación Tecnológica (PAPIIT: IN-102503) del proyecto *Determinación y aplicación de indicadores ambientales a escala detallada para la evaluación biofísica y la planeación del territorio, el caso de Milpa Alta, Distrito Federal*.

REFERENCIAS

Avérous, Ch. P. (1997), “Evaluación del desempeño ambiental”, en *Desarrollo Sustentable: estrategias de la OCDE para el siglo XXI*, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), pp. 41-52.

- Carruthers, G. and G. Tinning (2003), “Where, and how, do monitoring and sustainability indicators fit into environmental management system?”, *Australian Jour. of Experim. Agric.*, no. 43, pp. 307-323.
- Corbiere-Nicollier, T., Y. Ferrari, C. Jemelin and O. Jolliet (2003), “Assessing sustainability: an assessment framework to evaluate Agenda 21 actions at the local level”, *Int. Jour. of Sustainable Development and World Ecology*, no. 10, pp. 225-237.
- CNA (2000), *Observaciones Climatológicas*, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, Comisión Nacional del Agua (CNA), México.
- CSIRO (1998), *A Guidebook to Environmental Indicators*, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australian.
- Dallas, E. J. (1998), *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*, International Thomson, Ed. ITP, México.
- DDF (1984), *Cartas topográficas a escala 1:10 000*, Tesorería del Departamento del Distrito Federal (DDF), México.
- Environment Canada (1994), *The State of Canada's Environment*, Minister of Supply and Services, Ottawa.
- Farrow, A. and M. Winograd (2001), “Land use modeling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America”, *Agric., Ecos. and Environment*, no. 85, pp. 249-268.
- García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- GDF (2000), *Fotografías aéreas a escala 1:20 000 de Milpa Alta*, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, Gobierno del Distrito Federal (GDF), México.
- Golden Software (2002), *Surfer Ver. 8. A Powerful Contouring, Gridding, and Surface Mapping Package*, Golden, Colorado, USA.
- IMTA (1996), *Extractor rápido de información climatológica (ERIC)*, Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México [CD'S].
- INE (1997), *Avances en el desarrollo de indicadores para la evaluación del desempeño ambiental en México, 1997*, SEMARNAP, Instituto Nacional de Ecología, México, pp. 11-21.
- INEGI (1984), *Cartas Edafológicas, y de Uso de Suelo-Tipos de Vegetación de Milpa Alta (E14-A49) y Amecameca (E14-B41) a escala 1:50 000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1971), *Fotografías aéreas de Milpa Alta a escala 1:20 000 de 1970-1971*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.

- INEGI (1994), *Fotografías aéreas de Milpa Alta a escala 1:75 000*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- ITC (2003), *ILWIS 3.0 Academic. User's Guide*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Karlen, D. L. and D. E. Stott (1994), "A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality", in Doran, J. W., D. C. Coleman, D. F. Bezdick and B. A. Stewart (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*, Soil Sc. Soc. of America, Spec. Publ., no. 35, pp. 53-72.
- Larson, W. E., and F. J. Pierce (1991), "Conservation and enhancement of soil quality", in *Evaluation for sustainable land management in the developing world*, IBSRAM Proc., vol. 2, Int. Board for Soil, Res. and Manage, Thailand, pp.175-203.
- Martin, P. A. (1980), *Vulcanología de la Sierra Chichinautzin*, tesis de Maestría en Geología, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Martin, P. A. (1982), "Monogenetic vulcanism in Sierra Chichinautzin", *Bull. Volcano*, vol. 45-1, pp. 9-24.
- Masera, O., M. Astier y R. S. López (2000), *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*, Ed. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada (GIRA, A.C.), Michoacán, México.
- OCDE (1997), *Desarrollo Sustentable. Estrategias de la OCDE para el siglo XXI*, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.
- OECD (2003), *Environmental Indicators. Development measurement and use*, Organization for Economic Cooperation and Development.
- Quiroga, R. M. (2001), *Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas*, CEPAL-Serie Manuales, núm. 16.
- Reed, M. S., E. D. G. Fraser and A. J. Dougill (2006), "An adaptative learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities", *Ecol. Econom.*, no. 59, pp. 406-418.
- Rodríguez Gamiño, M. de L. (2008), *Determinación y aplicación de indicadores ambientales en Milpa Alta, Distrito Federal*, tesis de Doctor en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Salinas, S. S. (2005), *Mapeo morfogenético y análisis cuantitativo del depósito de avalancha de detritos del volcán Jocotitlán, Estado de México*, tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Siebe, S., V. Rodríguez Lara, P. Schaaf and M. Abrams (2004), "Geochemistry, Sr-Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City", *J. Volc. Geotherm Res.*, no. 130, pp. 197-226.
- SEMARNAT (2002), Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, *Diario Oficial de la Federación* 31-12-2002, 2a Sección, México.
- SEMARNAT (2012), *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México 2010*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General de Estadística e Información Ambiental [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores_201_cd/pdf/Version_completa.pdf].
- Soil Survey Staff (1999), *Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*, Agriculture handbook 436. 2nd ed. US Department of Agriculture and Natural Resources Conservation Service, Washington.
- Stein, A., J. Riley and N. Halberg (2001), "Issues of scale for environmental indicators", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 87, pp. 215-232.
- Systat Software (2003), *Systat Ver.9*, Chicago, IL, USA.
- Verstappen, H. Th. and R. A. van Zuidam, (1991), *The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards*, ITC Publication 10.
- Walkley, A. and I. A. Black (1934), "An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method", *Soil Science*, no. 37, pp. 29-38.
- WRB (2006), *World Reference Base for Soil Resources*, 2nd edition, World Soil Resources Reports, no. 103, FAO, Rome.