

Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México

María de Lourdes Rodríguez Gamiño*
Jorge López Blanco*

Recibido: 24 de junio de 2005
Aceptado en versión final: 10 de marzo de 2006

Resumen. En este trabajo se delimitaron y caracterizaron a las unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México. Se trazaron las unidades geomorfológicas morfogenéticas que sirvieron de base para la caracterización de las unidades ambientales biofísicas (UAB). Se llevaron a cabo recorridos de campo para la verificación de las UAB y para la toma de muestras de suelos y levantamientos botánicos. En laboratorio se determinaron las propiedades físicas y químicas de los suelos. Se determinaron los indicadores de los factores de relieve, suelo, cobertura vegetal y uso de suelo. Las UAB se caracterizaron considerando los indicadores de relieve, pendiente y altitud; clima, temperatura y precipitación; suelo, humedad, materia orgánica, densidad aparente, pH; vegetación, densidad de la cobertura vegetal y uso de suelo. Las unidades se caracterizan por ser de origen endógeno volcánico acumulativo de flujos lávicos. Los tipos de relieve que predominan en los sitios muestreados son laderas de montaña superiores, medias e inferiores, de flujos lávicos; laderas de montaña superiores, internas y externas, de cono cinerítico; laderas superiores e inferiores de lomeríos medios y bajos; piedemonte acumulativo local; piedemonte acumulativo de lomeríos medios y bajos y planicie aluvial. La caracterización de las UAB mediante los indicadores ambientales permite contar con información básica para la toma de decisiones en el manejo adecuado de los recursos naturales y en la planeación socioambiental.

Palabras claves: Indicadores ambientales, Unidades ambientales biofísicas, morfogénesis, toma de decisiones, Milpa Alta, México.

Characterization of biophysical units by means of environmental indicators in Milpa Alta, Central Mexico

Abstract. The environmental biophysical units (EBU) were delineated and characterized by means of environmental indicators in Milpa Alta, Central Mexico. At the first stage the Geomorphogenetics units which served as a base to obtain the EBUs were delineated. In order to check EBU's delineation and taking of soil/vegetation samples surveys fieldwork campaigns were carried out. By means of laboratory analysis, soils were characterized

*Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F. E-mail: lulugamino@hotmail.com; jlopezblanco@hotmail.com

considering physical and chemical properties. Environmental indicators of relief, climate, soils, vegetation and land use factors were obtained. EBU's were characterized considering elevation, slope, temperature, rainfall, soil humidity, organic matter, bulk density, pH, and land use/cover. Dominant relief types of EBU's in the sampling sites were high, medium and lower mountain slopes constituted by lavas flows, external and internal high mountain slopes of cinder cone, high and lower hill slopes of high and medium hills, local accumulative piedmont, local accumulative piedmont of medium and lower hill slopes and alluvial plain. EBU's characterization by means of environmental indicators allows with basic information in the making decision process for adequate natural resources management and environmental planning.

Key words: Environmental indicators, environmental biophysical units, morphogenesis, decision making process, Milpa Alta, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Existen diversas instituciones a nivel mundial, entre ellas el Banco Mundial, que han planteado algunas estrategias para la conservación de los recursos naturales, basándose en la consulta e integración de volúmenes amplios de información fidedigna. Las instituciones nacionales y los tomadores de decisiones de todos los niveles requieren de información específica para las propuestas de planeación del territorio. Además, con el uso de las tecnologías geográficas de análisis territorial y con la posibilidad de procesar información de una manera más rápida, se ha hecho un esfuerzo por parte de la comunidad científica para mejorar y perfeccionar las técnicas de administración de la información, que permitan una delimitación y caracterización clara de las unidades ambientales (Eswaran *et al.*, 2000).

Las unidades ambientales biofísicas (UAB) se definen como una unidad espacial que ofrece oportunidades para la identificación, la aplicación de opciones de manejo de los recursos naturales y son una herramienta base para la toma de decisiones durante el proceso de planeación. Estas unidades se derivan de la información biofísica y socioeconómica disponible y su dinámica está dada por las intervenciones humanas en el paisaje (Dumaski y Craswell, 1998). También son un común denominador para sintetizar información desde la perspectiva de las diferentes subdisciplinas cuyo objeto de estudio es el ambiente (Eswaran *et al.*, 2000).

Dentro del proceso de planeación territorial, las UAB permiten ser caracterizadas y evaluadas estadísticamente en función de sus propiedades, con el fin de establecer sus aptitudes de uso de suelo para hacer propuestas socioeconómicas sustentables, a partir del uso del suelo y de las características socioambientales de la población local (López y Villers, 1998).

Los indicadores ambientales se definen como estadísticas o parámetros que proporcionan información y tendencias sobre las condiciones de los fenómenos ambientales (INE, 1997). La Organización para la Cooperación del Desarrollo Económico (OCDE, 1997) establece que un indicador cuantifica y simplifica los fenómenos y ayuda a entender la realidad compleja, por lo tanto, un indicador dice algo sobre los cambios que se presentan en un sistema socioambiental. Stein y Riley (2001) establecen que el valor de los indicadores ambientales depende de su escala temporal/espacial y de su utilidad para los tomadores de decisiones para establecer propuestas de administración del capital natural y sobre todo porque son una herramienta de comunicación general, asimismo, deben tener una sólida justificación científica.

Los indicadores permiten contar con información sobre los factores biofísicos y socioeconómicos, que representan los dos elementos claves del complejo ambiental (CSIRO, 1998). No son solamente una pieza de información cuantitativa, sino que describen un factor ambiental y registran sus tendencias de progreso para conseguir un objetivo esta-

blecido (*Ibid.*). Asimismo, los indicadores ambientales representan un método de evaluación y deben: *a)* explicar lo referente a un problema o a una cuestión de interés; *b)* unir el sistema con el problema mismo en una forma transparente; *c)* ser aplicables a varios sistemas y ser capaces de mostrar cambios a través del tiempo, y *d)* ser viables para registrarse o calcularse a un costo razonable. Esto permite múltiples medidas en varios sistemas y el monitoreo del estado del ambiente, la comparación de diferentes subsistemas y el mantenimiento de los indicadores (Gaunt *et al.*, 1997).

Los indicadores cuantifican información que ayuda a explicar cómo están cambiando las cosas en el tiempo y se deben diseñar para usarse dependiendo del área por evaluar (escala regional, nacional y local; Farrow y Winograd, 2001). También los indicadores ambientales se establecen con el fin de evaluar e identificar áreas con recursos naturales que estén en riesgo de degradación (Huffman *et al.*, 2000).

Los criterios principales que permiten la selección de los indicadores son: el ser relevantes y ser aceptados científicamente, ser entendibles para los tomadores de decisiones, flexibles en el tiempo y espacio, ser viables para obtenerse y desarrollarse, ser fácilmente medibles, ser representativos, sensitivos a cambios, específicos, y tener claras sus causas y efectos (Huffman *et al.*, 2000; Farrow and Winograd, 2001).

En este trabajo se ha considerado a un indicador ambiental como un parámetro que proporciona información con suficiente resolución espacial (escala detallada) sobre las condiciones del ambiente biofísico de un espacio geográfico delimitado localmente.

Los indicadores del relieve son parte esencial del ambiente, ya que ese factor representa el soporte dinámico de todos los demás factores, tanto biofísicos como socioeconómicos, asimismo, es un factor condicionante para el desarrollo y distribución de los rasgos biológicos y de las actividades humanas

(Rivas *et al.*, 1997). De igual forma, las geoformas y los procesos geomorfológicos que suceden en ellas, representan peligros y riesgos que pueden contribuir al desequilibrio y a la degradación ambiental. La morfología es un elemento básico que se debe estudiar para establecer una relación entre el territorio y las actividades a desarrollar, mediante la planeación ambiental del territorio.

En el factor suelo, la textura, la composición química, la pedregosidad y la riqueza nutritiva, forman el conjunto de parámetros físicos y químicos del suelo. Por lo que es necesario determinarlos para establecer las relaciones con todas las formas de vida vegetal y limitar el uso de suelo para determinadas actividades. El conocimiento de los caracteres, cualidades y procesos del suelo es necesario para cualquier estudio sobre el medio biofísico (Stephen, 2002; Schloter *et al.*, 2003).

Dentro del factor vegetación, la definición de indicador es importante para conocer las condiciones ambientales del paisaje, ya que la vegetación resulta de la interacción entre los demás componentes del medio y es un elemento del cual dependen directa o indirectamente todos los demás organismos que conforman el ecosistema. Los indicadores de diversidad florística ayudan a identificar los valores del hábitat y en la evaluación de prácticas de manejo con propósitos de conservación (Waldhardt *et al.*, 2003).

Enmarcado en lo anterior, el objetivo de este estudio es delimitar a las unidades ambientales biofísicas y caracterizarlas a partir de indicadores ambientales, obtenidos a partir de información espacial detallada (escala 1:20 000) en Milpa Alta, en el Centro de México.

ÁREA EN ESTUDIO

La delegación Milpa Alta se localiza entre los 19°04' y 19°12' de latitud norte y los 98°57' y 99°08' de longitud oeste. La superficie que cubre el área es de 28 464 ha. Políticamente se

ubica al sur del Distrito Federal y sus límites son: al norte con las delegaciones Xochimilco y Tláhuac, al este con el Estado de México, al oeste con las delegaciones Xochimilco y Tlalpan y al sur con el estado de Morelos (Figura 1).

El área se caracteriza por una topografía montañosa con un intervalo altitudinal que va de los 2 230 a los 3 680 msnm, con pendientes que van de 1 hasta 28°. Geológicamente se encuentra dentro de la Formación Chichinautzin, la cual está conformada por un conjunto de conos monogenéticos y productos volcánicos asociados de formación reciente (Cuaternario), lo cual es posible detectar fácilmente al observar la morfología del área en estudio (Martín, 1980). El clima que presenta, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), es C (w₂) (w) que significa templado subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura media anual de 14.4° C y una precipitación anual de 878.9 mm. La precipitación es heterogénea en su distribución, ya que se presentan precipitaciones de 1

200 mm anuales en las partes altas y en las áreas más bajas se registran 580.6 mm anuales, en promedio (IMTA, 1996).

En lo que se refiere a la hidrología, el área está muy poco disecada por corrientes fluviales debido a lo reciente de la conformación de su relieve y a la naturaleza del material volcánico, pues la mayor parte de la precipitación se infiltra, constituyendo una importante área de recarga de acuíferos (Martín, 1980).

Los suelos son de origen volcánico, presentándose las unidades siguientes: Litosol, Andosol, Regosol y Phaeozem (INEGI, 1984a). Los principales tipos de vegetación están representados por bosque de pino, bosque de oyamel, bosque mixto (pino-aile-encino), pastizal y matorral. Los usos del suelo son el forestal, agrícola, pecuario y urbano, y las principales actividades económicas son, la agricultura de temporal con cultivos de avena forrajera y nopal verdura, además se siembra papa, haba, frijón, chícharo, calabacita y maíz (INEGI, 2001).

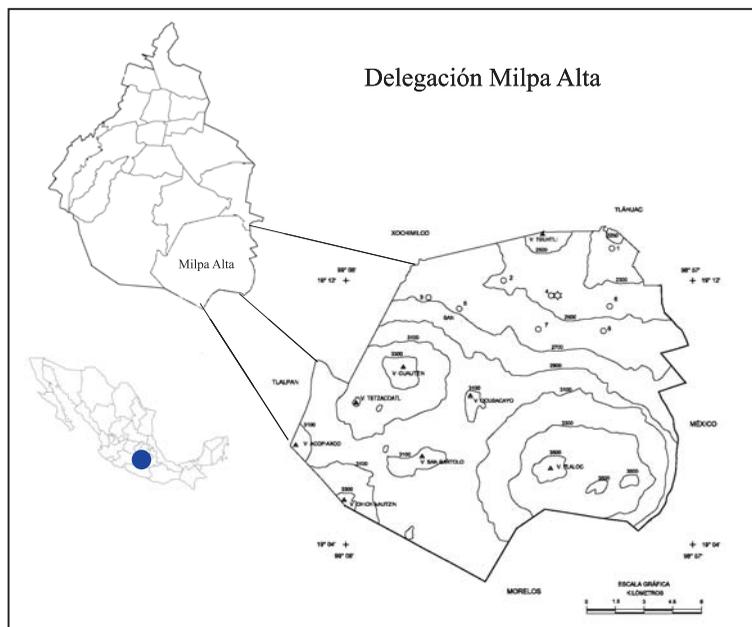


Figura 1. Localización del área en estudio.

METODOLOGÍA

El método consistió, en primera instancia, en la revisión bibliográfica y en la obtención de cartas topográficas a escala 1:10 000 del Departamento del Distrito Federal (1984), fotografías aéreas a escala 1:20 000, del Gobierno del Distrito Federal (2000) y fotografías aéreas a escala 1:75 000 del INEGI (1994). Con apoyo de la cartografía topográfica a escala 1:10 000, se elaboró el modelo digital del terreno (MDT) que sirvió de base cartográfica para la delimitación de las unidades geomorfológico morfogenéticas (Tapia y López, 2002). Con el respaldo del MDT y de las fotografías aéreas a escala 1:75 000 se definieron las unidades geomorfológico-morfogenéticas. Con el apoyo de un sistema de información geográfica (SIG) se realizó la corrección fotogramétrica al digitalizar a las unidades geomorfológicas. Se establecieron 34 sitios de muestreo de suelo y vegetación, tratando de cubrir la variabilidad espacial de los tipos de unidades geomorfológicas morfogenéticas presentes en el área en estudio. La información de estos sitios sirvió de base en la caracterización de las unidades ambientales biofísicas.

El enfoque geomorfológico que se empleó en este trabajo, ha sido utilizado en diversas disciplinas, particularmente durante las últimas dos décadas (Verstappen and Van Zuidam, 1991). Se consideró este enfoque como el apropiado para este trabajo, debido a que el análisis geomorfológico concibe el establecimiento de las relaciones ecológicas del paisaje, es decir, las características de las formas del relieve respecto a los diferentes parámetros ambientales. Este tipo de análisis se lleva a cabo a partir de la información sintética y sistemática, que se aplica en un esquema de análisis multidisciplinario.

Las unidades geomorfológico morfogenéticas se delimitaron a partir de cuatro aspectos fundamentales del relieve: *a)* origen general y específico, *b)* tipo de relieve, *c)* edad-

litología y *d)* clase geométrica del relieve (Tapia y López, 2002). Se obtuvo para cada unidad geomorfológica los datos sobre origen general y específico, geometría del relieve, principalmente la altitud y la pendiente. Se realizó trabajo de fotointerpretación en fotografías aéreas a escala 1:25 000 de 1970 y de escala 1:20 000 del 2000, en donde se delimitaron los tipos de vegetación, cobertura vegetal y el uso del suelo, considerando la clasificación del INEGI (1984b), quedando como categorías principales: *a)* bosques de *Abies* sp., *Pinus* sp., y *Alnus* sp.; *b)* la agricultura de temporal de cultivos anuales y semipermanentes; *c)* los pastizales naturales e inducidos, *d)* los matorrales, y *e)* el uso urbano (habitacional; INEGI, 1984b). La densidad de la cobertura vegetal se determinó en función de la información fotográfica, quedando de la siguiente forma: alta (> 50%), media (entre 25-50%), baja (entre 5-25%) y nula (entre 0-5%). Sobre los aspectos climáticos se obtuvieron los datos de temperatura y precipitación de 18 estaciones meteorológicas, a partir de la consulta en el programa ERIC 2 (IMTA, 1996), considerando el periodo 1960-1999, se realizó un análisis estadístico para obtener el promedio anual de la temperatura y de la precipitación. Para conocer las características físicas y químicas de los suelos se definieron los indicadores siguientes: humedad, densidad aparente, pH y materia orgánica (Tabla 1).

Se llevaron a cabo varios recorridos de campo con el fin de verificar los tipos de vegetación y el uso de suelo de las unidades ambientales biofísicas, que se delimitaron en las fotografías aéreas. Se tomaron muestras simples de suelo en los 34 sitios de muestreo entre 0 a 30 cm de profundidad. Cada uno de los sitios de muestreo de suelos y vegetación fue georreferido con apoyo de un GPS, para posteriormente pasar los datos a una base de información dentro de un SIG.

En laboratorio, las muestras de suelo fueron secadas, posteriormente se tamizaron utilizando una malla de 2 mm de abertura.

Tabla 1. Indicadores considerados para caracterizar a las unidades ambientales biofísicas del área en estudio

Factores	Indicadores	Fuente/Técnica
Clima	Precipitación y temperatura	Procesamiento propio a partir de IMTA (1996).
Relieve	Origen y tipo	Revisión bibliográfica y fotointerpretación.
	Altitud	Se obtuvo con el altímetro y el GPS.
Suelo	Pendiente	Datos tomados con el clisímetro en campo.
	Humedad	Secado en estufa a peso constante.
	Densidad aparente	Soil Survey Staff, 1999.
	pH	Potenciómetro con electrodo de vidrio.
Vegetación	Materia orgánica	Walkley y Black, 1934.
	Tipos de vegetación	INEGI, 1984.
	Cobertura vegetal	Moncayo, 1970.
	Uso del suelo	INEGI, 1984.

Con el suelo ya seco se realizaron los análisis físicos y químicos. Con ellos se determinaron las siguientes propiedades: humedad por secado en estufa, densidad aparente (Soil Survey Staff, 1999), pH en agua 1:2.5 con el potenciómetro Corning 220 con electrodo de vidrio y materia orgánica por Walkley y Black (1934).

Con la información bibliográfica, de campo y laboratorio se determinaron los indicadores ambientales para caracterizar las unidades biofísicas. Las unidades biofísicas se definieron a partir del origen, tipo de relieve, edad y litología y su caracterización se realizó a partir del factor relieve, clima, suelo y cobertura vegetal. Con respecto al clima se obtuvieron los promedios de temperatura y precipitación de las 18 estaciones meteorológicas que tienen una influencia en el área en estudio. En la Figura 2 se presenta el diagrama metodológico para la caracterización de las unidades ambientales biofísicas y la definición de los indicadores ambientales.

RESULTADOS

Los 34 sitios de muestreo fueron agrupados de acuerdo con las características geomorfológico morfogenéticas y sus propiedades específicas del relieve (Figura 3), quedando seis unidades ambientales biofísicas (UAB).

Las UAB son de origen endógeno volcánico acumulativo de fines del Pleistoceno y principios del Holoceno, conformadas por andesitas-basálticas y andesitas a dacitas (Martin, 1980). Los tipos de relieve que predominan son de laderas de montaña superiores, medias e inferiores de flujos lávicos, laderas de montaña superiores internas y externas de conos cineríticos; laderas superiores e inferiores de lomeríos medios y bajos; piedemontes locales acumulativos y planicies. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las características de las unidades ambientales biofísicas a partir de los indicadores ambientales seleccionados. A continuación se describen las UAB caracterizadas en este trabajo.

Unidad 1. Relieve endógeno volcánico acumulativo de laderas superiores de montaña (internas y externas) de conos cineríticos Pleisto-Holocénicas de composición andesítico-basáltico-dacítico. Esta unidad se encuentra a una altitud entre 2 752 y 3 534 msnm, las pendientes van de los 5 a los 28°. La humedad del suelo se encuentra entre los 29 y 66.7%, la densidad aparente es de 0.62 y 0.97 g/cm³, respectivamente, el pH tiende a la neutralidad y presenta un alto contenido de materia orgánica (Figura 3).

El uso de suelo en 1970 era forestal, con una densidad en su cobertura de media en la mayoría de los sitios y en el 2000 el uso del

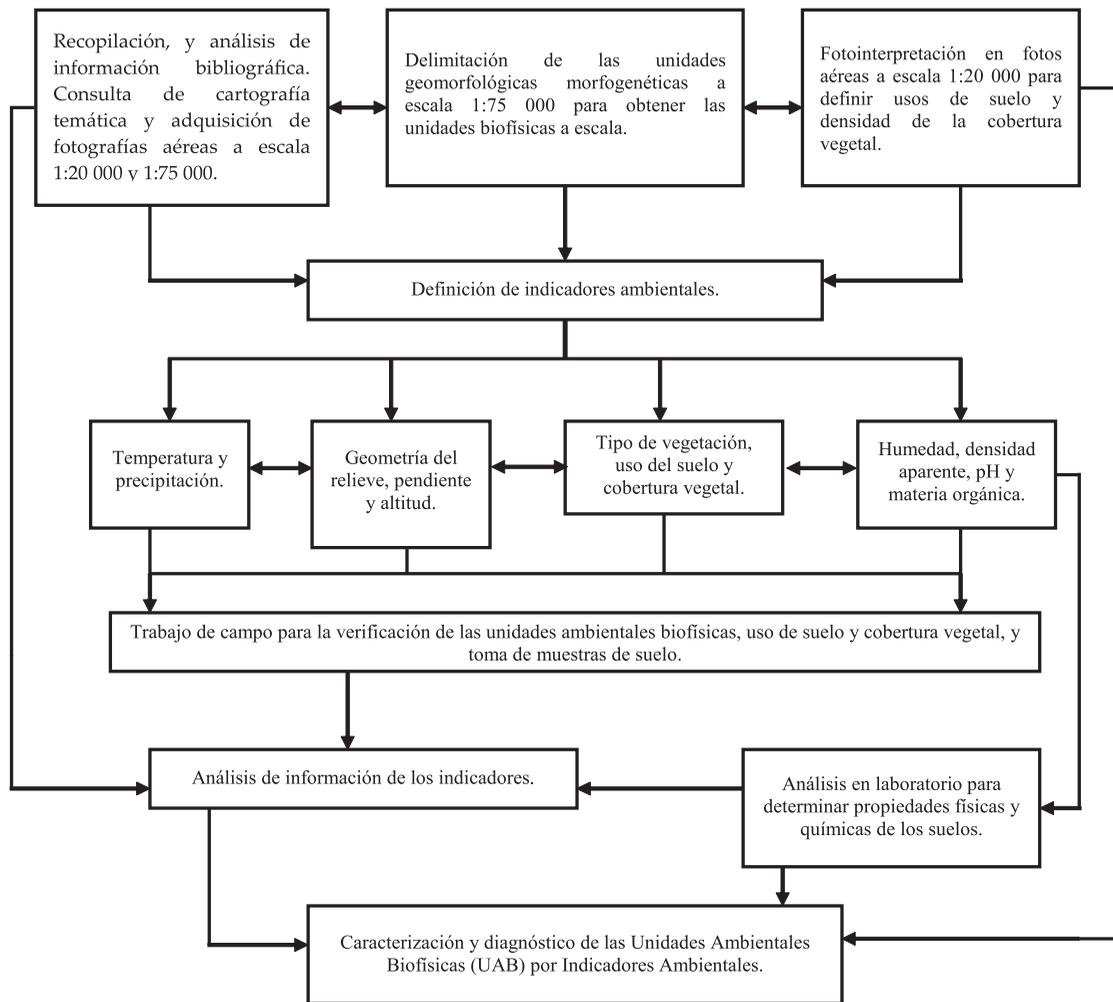


Figura 2. Diagrama metodológico para la caracterización de las unidades ambientales biofísicas.

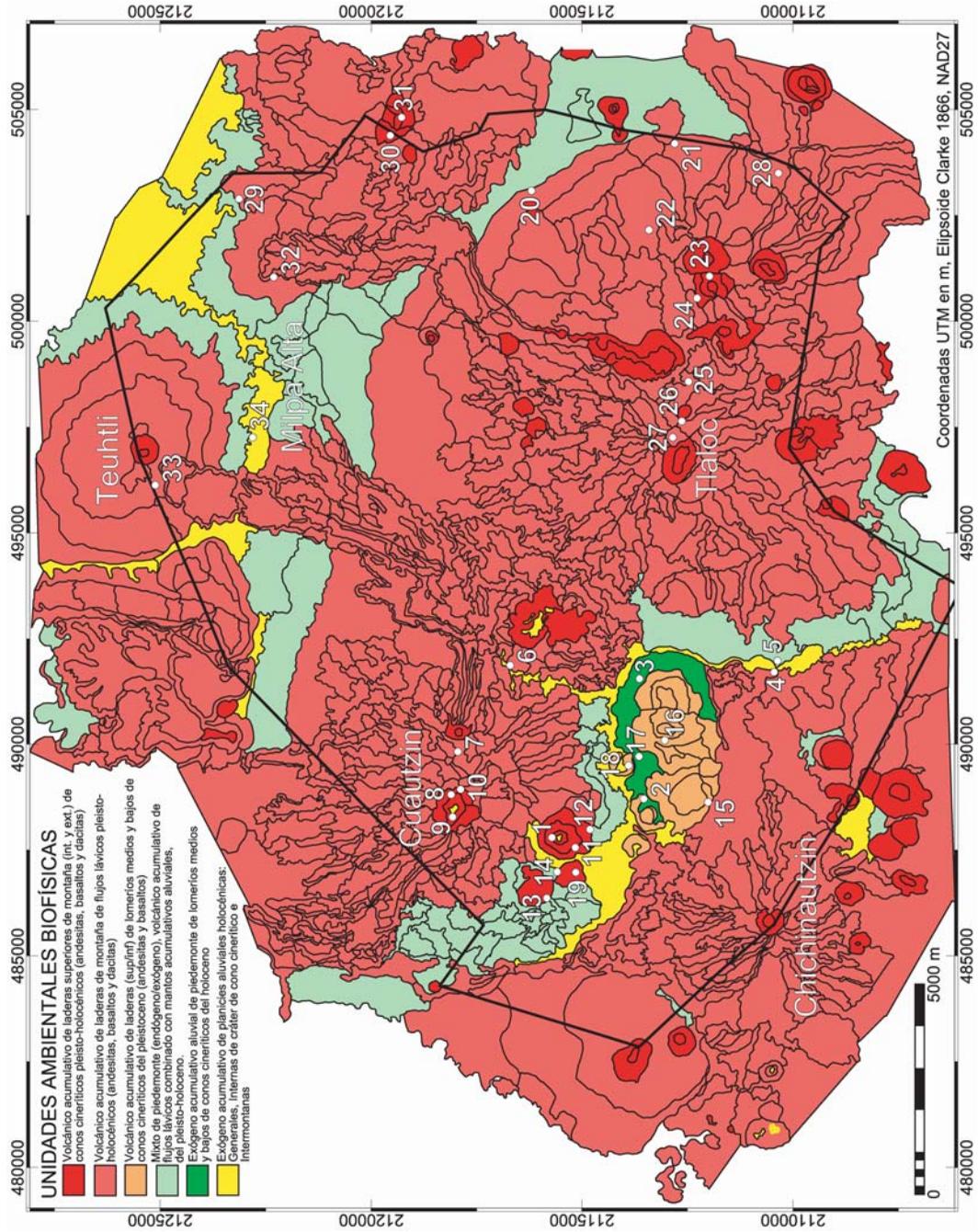


Figura 3. Mapa de las unidades ambientales biofísicas (UAB), donde se señalan los sitios de muestreo que sirvieron de base para su caracterización. Se señala con una línea el límite de la delegación Milpa Alta.

Tabla 2. Características de las unidades ambientales biofísicas

Unidad Ambiental Biofísica (UAB)	Indicadores de relieve			Indicadores de clima			Indicadores de suelo					Indicadores de uso de suelo y cobertura vegetal			
	Altitud (msnm)	Pendiente (°)	Tem °C	PP (mm)	Humedad (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	pH (agua 1:2.5)	M.O. en %	Uso de suelo en 1970	Cobertura vegetal en 1970	Uso de suelo en 2000	Cobertura vegetal en 2000	Cobertura vegetal en 2000		
Unidad 1. Endógeno volcánico acumulativo de laderas superiores de montaña (internas y externas) de conos cónicos (Pleistocénicas de composición andesítico-basáltico-dacítico)	1	3315	7.0	12.3	1054	35.3	0.74	6.8	9.5	Forestal	Alta	Forestal	Media		
	8	3490	19.0	13.0	950	66.7	6.8	11.3	Forestal	Alta	Forestal	Baja	Baja		
	10	3438	17.0	13.1	959	36.8	0.77	6.5	8.5	Forestal	Alta	Forestal	Baja		
	11	3209	21.0	12.5	1073	42.9	0.76	6.8	10.0	Forestal	Media	Forestal	Media		
	12	3119	9.0	12.0	1066	31.3	0.78	5.8	2.8	Forestal	Media	Forestal	Media		
	13	3236	28.0	11.6	1106	47.4	0.70	6.7	9.7	Forestal	Alta	Forestal	Media		
	19	3193	7.0	11.6	1095	36.4	0.72	6.2	10.0	Agricultura de temporal	Baja	Agricultura de temporal	Baja		
	23	3534	16.0	14.9	884	61.0	0.64	6.7	10.1	Forestal	Media	Forestal	Media		
	24	3419	23.0	14.9	877	40.0	0.62	5.7	15.2	Forestal	Media	Forestal	Media		
	26	3509	5.0	14.7	906	63.2	0.67	6.6	10.3	Forestal	Media	Forestal	Baja		
	30	2752	13.0	15.2	734	29.0	0.97	6.5	2.8	Agricultura de temporal	Baja/Nula	Agricultura de temporal	Baja/Nula		
	31	2921	13.0	15.2	737	31.3	0.79	7.0	8.3	Forestal	Alta	Forestal	Alta		
	4	2989	1.0	14.0	1235	50.0	0.73	6.8	12.1	Matorral/Forestal	Baja	Matorral/Forestal	Baja		
	6	3063	3.0	13.7	910	50.0	0.60	5.1	12.6	Forestal	Media	Forestal	Media		
	7	3309	9.0	13.2	950	52.4	0.60	6.7	12.1	Forestal	Alta	Forestal	Baja		
	20	2789	12.0	15.1	754	41.2	0.76	6.9	6.9	Agricultura de temporal	Baja	Agricultura de temporal	Baja		
	21	2970	13.0	15.0	840	50.0	0.70	6.7	8.1	Forestal	Alta	Forestal	Baja		
	22	3260	7.0	15.0	829	53.8	0.54	6.2	13.6	Forestal	Media	Forestal	Alta		
	25	3438	4.0	14.8	895	36.4	0.58	6.4	9.6	Forestal	Alta	Forestal	Baja		
27	3610	16.0	14.7	904	50.0	0.61	6.3	13.4	Forestal	Media	Forestal	Baja			
28	2975	12.0	15.2	938	48.0	0.72	6.6	11.2	Forestal	Alta	Forestal	Alta			
29	2279	4.0	15.5	707	26.3	0.67	5.9	10.7	Agricultura de temporal	Baja/Nula	Agricultura de temporal	Baja/Nula			
32	2377	17.0	15.5	719	48.0	0.57	6.3	14.5	Agricultura de temporal	Baja/Nula	Agricultura de temporal	Baja/Nula			
33	2560	4.0	15.9	740	23.5	0.94	7.1	3.0	Agricultura de temporal	Baja/Nula	Agricultura de temporal	Media			
2	3056	6.0	12.5	1076	55.6	0.81	6.2	8.5	Pastizal	Baja	Agricultura de temporal	Baja			
15	3065	15.0	12.6	1134	32.0	1.00	7.0	5.9	Forestal	Media	Forestal	Media			
16	3150	11.0	13.1	1070	57.0	0.76	6.6	7.2	Forestal	Media	Forestal	Media			
18	3065	9.0	12.9	1048	41.0	0.66	6.2	7.0	Forestal/Pastizal	Baja	Forestal/Pastizal	Baja			
5	2995	4.0	14.0	1233	50.0	0.59	6.2	14.1	Pastizal	Media	Pastizal	Media			
14	3199	3.0	11.8	1087	45.0	0.72	6.4	10.6	Agricultura de temporal	Baja/Nula	Agricultura de temporal	Baja/Nula			
3	3028	12.0	13.6	1012	38.5	0.65	6.8	10.0	Pastizal	Baja	Agricultura de temporal	Baja/Nula			
17	3080	7.0	13.0	1052	55.0	0.67	6.5	11.4	Agricultura de temporal	Baja	Agricultura de temporal	Baja			
9	3417	9.0	13.0	1000	68.4	0.71	6.8	9.0	Pastizal	Baja	Agricultura de temporal	Baja			
34	2378	0.6	15.8	753	18.0	0.98	5.6	3.2	Agricultura de temporal	Baja/Nula	Agricultura de temporal	Baja/Nula			

suelo que predominaba era el forestal, con una cobertura vegetal con una densidad de media a baja, lo que indica que se ha reducido la cobertura en algunas áreas. Los tipos de vegetación están representados por bosque de pino donde predomina los *Pinus montezumae* y *P. hartwegii* y *Abies religiosa*.

En esta unidad la mayoría de los sitios se caracterizan por tener uso de suelo forestal con una cobertura vegetal de media a baja de *Abies religiosa*, *Pinus montezumae* y *Alnus firmifolia* (Sitios 8, 10, 11, 12, 13, 23, 24, 26, y 31). El sitio 1 corresponde a un bosque de *Abies religiosa* de cobertura alta, es un sitio bien conservado, a pesar de las alteraciones por incendios, como lo muestra la presencia de un sotobosque de *Senecio salignus* y *S. barbajohanis* como indicadoras de incendios forestales.

El sitio 19 es una parcela agrícola donde se cultiva *Avena sativa*, "avena forrajera" que al dejar residuos, después de la cosecha, son incorporados al suelo e influyen para que se tenga un mayor porcentaje de materia orgánica. Por lo que respecta al sitio 30 presenta un porcentaje de materia orgánica bajo, debido a que es una parcela agrícola que no se ha cultivado desde hace tres años, por lo cual el proceso de evaporación es más alto ya que el suelo está desprovisto de cobertura vegetal.

Unidad 2. Relieve endógeno volcánico acumulativo de laderas de montaña de flujos lávicos Pleisto-Holocénicos de composición andesítica-basáltica-dacítica. Esta unidad está conformada por sitios que se encuentran en laderas de montaña superiores, medias e inferiores de flujos lávicos y laderas de montaña de flujos lávicos no diferenciadas. Se localizan en un intervalo altitudinal de los 2 279 hasta los 3 610 msnm y presentan una pendiente que va de 1 a 17°. Los suelos presentan un porcentaje de humedad de los 23.5 a los 53.8%. La densidad aparente es de 0.54 a 0.94 g/cm³, respectivamente, el pH es neutro y con un elevado contenido de materia orgánica, por la influencia de la vegetación de bos-

ques de *Pinus montezumae*, *P. hartwegii*, *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*.

El uso de suelo para 1970 era forestal con una densidad en su cobertura de alta a media, para el 2000 la mayoría de los sitios presentan también cobertura forestal, sin embargo, esta cobertura presenta una densidad de media a baja, lo que indica que se ha reducido la cobertura en algunas áreas.

Los sitios 6, 25 y 27 de la Figura 3 se encuentran bien conservados en cuanto a su cobertura forestal, ya que se ubican en áreas más alejadas de la población y están menos sujetos a la actividad antrópica a pesar de que en ellos se presentan algunos árboles quemados en su corteza y hay presencia de *Lupinus spp.*, género que se considera indicador de incendios forestales.

En esta unidad se presentan afloramientos rocosos de basalto cubiertos de musgos y líquenes, por la altitud a la que se encuentra, se presentan lluvias abundantes lo cual influye sobre los contenidos de humedad en el suelo, la vegetación está representada por matorral de *Juniperus sp.* y bosque de *Pinus montezumae* los cuales se encuentran dispersos en el terreno, debido que éste es muy rocoso (sitio 4) y éstos se establecen en las oquedades y huecos donde se acumula el suelo.

En los sitios 20, 32 y 33 existe un uso de suelo agrícola de temporal con cultivo semipermanente de *Opuntia ficus indica* "nopal verdura" con una cobertura baja donde los porcentajes de materia orgánica son bajos debido a que los productores cultivan en terrazas donde los suelos son pedregosos y poco profundos.

En el sitio 29 la agricultura es de temporal, donde se cultiva en pequeñas parcelas donde se ha formado suelo que es aprovechado para cultivar maíz por los campesinos. Las parcelas están delimitadas por rocas donde se encuentran matorrales de *Eysenhardtia polystachya*, *Opuntia streptacantha*, *Senecio praecox*, *Prunus capulli* y *Crataegus pubescens*.

Los sitios 21, 22 y 28 han estado sujetos a diversos programas de reforestación, por lo

que se observa una gran cantidad de árboles pequeños de *Pinus* spp y *Cupressus lindleyi*, además se realizan actividades como el retirado de biocombustibles y de la vegetación herbácea (*chaponeo*), saneamiento forestal y control de incendios mediante la apertura de brechas cortafuego.

Unidad 3. Relieve endógeno volcánico acumulativo de laderas superiores e inferiores de lomeríos medios y bajos de conos cineríticos del Pleistoceno de composición andesítico-basáltico. Esta unidad está conformada por cuatro sitios que se encuentran a una altitud que va de los 3 056 a los 3 150 msnm y una pendiente que va de un intervalo de los 6 a los 15°. Los suelos presentan una humedad de 41 a 57%, una densidad aparente que va de 0.66 a 1 g/cm³, el pH es moderadamente ácido y tienen un porcentaje medio de materia orgánica.

En 1970 el uso de suelo que predominaba era forestal y pastizal con densidades de cobertura de media a baja, en el 2000 las áreas de pastizales fueron reemplazadas para un uso de suelo agrícola de avena forrajera, por lo tanto las coberturas pasaron de medias a bajas, lo que indica que se ha reducido la cobertura en las áreas que antes ocupaban los pastizales. Los tipos de vegetación están representados por bosque de pino con una cobertura vegetal baja de *Pinus montezumae* y de pastizales. Lo anterior influye en las características del suelo, por lo que se tiene la densidad aparente de >1 g/cm³, en los terrenos agrícolas, debido al empleo de maquinaria en la preparación de los terrenos agrícolas.

Los sitios de esta unidad (2, 15, 16 y 18) están sujetos a una incidencia muy alta de incendios forestales durante la temporada de estiaje, los campesinos queman el pasto con el fin de obtener renuevos para el ganado ovino, lo cual trae como consecuencia que no exista regeneración natural del bosque.

Unidad 4. Relieve mixto de piedemonte (endógeno/exógeno), volcánico acumulativo de flujos lávicos combinado con mantos acu-

mulativos aluviales, del Pleisto-Holoceno. Esta unidad está conformada por los sitios 5 y 14, que se encuentran a una altitud 2 995 a 3 199 msnm, con una pendiente de 3° y 4°. Los suelos presentan una humedad de 45 al 50%, una densidad aparente que va de lo 0.59 a los 0.72 g/cm³, el pH es moderadamente ácido y tienen un porcentaje alto de materia orgánica.

El uso de suelo en 1970 era agrícola con cultivo de avena forrajera y pastizales que se emplean en el pastoreo de ganado ovino con una densidad baja en su cobertura vegetal. Para el 2000 las áreas que eran de pastizales pasaron a ser áreas agrícolas dedicadas al cultivo de avena forrajera. Sus residuos influyen para que se tengan altos porcentajes de materia orgánica, además de que los sitios de esta unidad se localizan en un piedemonte acumulativo formado principalmente por material mineral y orgánico que proviene de las partes altas de las laderas de montaña.

Unidad 5. Exógeno acumulativo aluvial de piedemonte de lomeríos medios y bajos de conos cineríticos del Holoceno. Esta unidad se encuentra a una altitud de 3 028 a 3 080 msnm y una pendiente de 7 a 12°. Con respecto a los suelos, éstos se caracterizan por tener una humedad de 38.5 hasta 55%, respectivamente, una densidad aparente de 0.65 a 0.67 g/cm³, el pH es moderadamente ácido y tienen un alto porcentaje de materia orgánica, esto se debe a que esta unidad es de origen acumulativo y por otra parte a la aplicación de fertilizantes y a la incorporación de los residuos de las cosechas obtenidas del cultivo de avena forrajera. En los años de 1970 y 2000 el uso de suelo ha sido de agricultura de temporal con cultivo de avena forrajera que se emplea principalmente como alimento para ovinos y equinos (Sitios 3 y 17).

Unidad 6. Relieve exógeno acumulativo de planicies aluviales Holocénicas: generales, internas de cráter de cono cinerítico e intermontanas. El sitio 9 de esta unidad se encuentra a una altitud de 3 417 msnm y una pen-

diente de 9°. El sitio 34 se encuentra a una altitud de 2 378 msnm y con una pendiente de 0 a 6°. La humedad del suelo es del 18 al 68.4%, la densidad aparente de los suelos es de 0.71 a 0.98 g/cm³, el pH es neutro y presenta porcentajes de medios a bajos de materia orgánica.

El uso de suelo en 1970 era de agricultura de temporal con cultivo de maíz y para el 2000 el cultivo principal en este sitio fue de nopal verdura. Sin embargo, cuando se realizó el muestreo de suelos (2004) esta parcela ya no estaba cultivada. Por otra parte, el sitio 34 se encuentra cercano al área urbana del poblado de Villa Milpa Alta, con un alto riesgo a la urbanización. El sitio 9 corresponde a una planicie de cráter cubierta de pastizal, el cual influye en un alto porcentaje de materia orgánica.

DISCUSIÓN

Para este trabajo la pendiente y la altitud se consideraron como indicadores del relieve y son factores importantes que influyen en la distribución de la vegetación y en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Tsui *et al.*, 2004). Los sitios, según su posición topográfica, presentan modificaciones en las propiedades del suelo y en los patrones de distribución de la vegetación (*Ibid.*). Gerrad (1992) menciona que las propiedades de los suelos están relacionadas con el gradiente, altitud y longitud de la pendiente. Esto resulta de la interacción entre la forma de la ladera y los procesos de erosión y depositación.

Verstappen (1983) menciona que la geomorfología influye en el desarrollo de los ecosistemas, en el caso de la vegetación teóricamente en los patrones de distribución, aunque actualmente estos patrones están influenciados por las actividades humanas que interfieren en el ambiente biofísico en general y particularmente en la cobertura vegetal.

Los patrones de vegetación están influenciados por factores climáticos como la precipi-

tación, temperatura y humedad que a veces muestran una relación con la situación topográfica (*Ibid.*). La razón de esto es que el relieve, y principalmente la altitud, afectan al clima o al microclima e influyen en las condiciones ambientales para el crecimiento de las plantas (*Ibid.*)

Por otra parte, los indicadores de suelo están relacionados con el relieve, así se tiene que los mayores contenidos de humedad son afectados por la pendiente y su posición en el relieve. Birkeland (1999) argumenta que la topografía es el factor principal que explica la variación del suelo de acuerdo con su situación en el terreno. La pendiente afecta la distribución de la materia orgánica y las diferencias de los porcentajes de materia orgánica probablemente resultan de una gran cantidad de humedad y de la cobertura vegetal sobre las unidades.

Los mayores porcentajes de humedad se presentan en los sitios (2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 16, 21, 23, 26 y 27), que corresponden con las laderas superiores de montaña y laderas de lomeríos que se encuentran a altitudes mayores a los 3 000 msnm. El clima juega un papel importante ya que a los 3 000 msnm de altura, la temperatura promedio anual de 12° C y la precipitación es de 1 250 mm anuales, lo que influye directamente en los altos porcentajes de humedad. Los porcentajes medios de humedad se localizan en los sitios 11, 13, 14, 18, 20, 24, 28, y 32 que corresponden a las laderas superiores, inferiores y piedemonte. Estos porcentajes de humedad se deben a que los sitios se encuentran a una altitud promedio de 2 700 msnm donde las precipitaciones son de 900 mm y la temperatura promedio es de 14° C.

Los porcentajes más bajos de humedad se ubican en los sitios 29, 33 y 34, debido a que se encuentran a una altitud promedio de 2 300 msnm, donde las precipitaciones son de 700 mm y la temperatura es mayor de 15.5° C. Aunado a lo anterior, el uso de suelo dominante es agrícola, por lo que las parcelas

se encuentran sin cultivar durante seis meses y desprovistas de vegetación, por lo tanto, la cobertura vegetal durante una época del año presenta una densidad baja debido a que la vegetación sirve para delimitar las parcelas agrícolas.

La densidad aparente en la mayoría de los sitios de las unidades oscila en un intervalo que va de 0.54 a 1 g/cm³, esto significa en términos generales que los suelos tienen una buena estructura, una alta retención de humedad y altos contenidos de materia orgánica, influenciado por la cobertura vegetal de pinos, oyameles y ailes. Por otra parte, en las unidades donde los terrenos son agrícolas, éstos presentan una mayor compactación de suelos, provocada principalmente por el peso de la maquinaria que se emplea en las actividades agrícolas para el cultivo de la avena forrajera y de nopal verdura, reflejándose en que la porosidad sea más sensitiva a las diversas prácticas de manejo (Dexter, 2003).

El uso de suelo agrícola y la cobertura vegetal con una densidad baja influyen en la modificación de las propiedades del suelo, esto se observó en las unidades con actividades agrícolas y pecuarias donde la acumulación de materiales y el empleo de abonos y fertilizantes modifican las propiedades del suelo, presentando altos contenidos de materia orgánica, con una densidad aparente cercana a 1 g/cm³, lo que indica menor porosidad y mayor compactación del suelo. Los cambios en la materia orgánica son una función directa de los remanentes de residuos de los cultivos y del clima, como en las unidades en donde se práctica la agricultura y se presentaron altos contenidos de materia orgánica.

Los suelos en la mayoría de las unidades tienen una buena cantidad de materia orgánica y agregación, lo que permite la infiltración de agua y aire, son resistentes a la erosión y ayudan a proveer favorablemente el hábitat. Sin embargo, en las unidades donde se está dando la conversión de suelos forestales a suelos agrícolas o pastizales, se reduce la

materia orgánica y por lo tanto su nivel de mantenimiento es bajo en cuanto a productividad (OCDE, 2001).

Con respecto al pH y la saturación de bases tienden a ser paralelos con la profundidad y esto se explica en términos de vegetación y presencia de incendios (Birkeland, 1999). El pH en el suelo determina la disponibilidad de nutrimentos y está generalmente en función del contenido de materia orgánica. Generalmente los altos contenidos de materia orgánica están asociados con las propiedades físicas y la productividad del suelo, este fenómeno se presenta en la mayoría de las unidades ambientales biofísicas caracterizadas en este estudio (Browman *et al.*, 2002).

Los suelos son neutros en las unidades donde la cobertura vegetal es alta, principalmente de bosque mixto de pino, oyamel y aile. El pH moderadamente ácido se presenta en las unidades donde el contenido de materia orgánica es bajo y la cobertura vegetal es media (de bosque de pino y matorral). La unidad que corresponde a una planicie aluvial presenta un pH fuertemente ácido con un alto contenido de materia orgánica, debido a la aplicación de abonos orgánicos, para realizar actividades agrícolas.

La mayoría de las UAB presentaron un uso de suelo forestal por lo que son fuente importante de nutrimentos por parte de la vegetación, incluyendo N, P, S, K, Na, Ca, Mg y algunos micronutrientes. En algunos casos, el relieve influye en las propiedades físicas y químicas de los suelos que afectan el crecimiento y distribución de la vegetación, ya que controlan la disponibilidad de nutrientes del suelo (Tsui *et al.*, 2004). Esto se observa en las unidades con una cobertura vegetal de densidad alta, en donde el bosque mixto de pino, oyamel y aile presenta un buen estado de conservación, la densidad baja se localiza donde existen bosques de pino y matorrales cuyas especies vegetales se encuentran dispersas en el terreno. La densidad media de cobertura vegetal se presenta en el bosque de pino, el

cual se encuentra disperso en los sitios que conforman la unidad y donde además predominan los pastizales.

Las unidades con uso de suelo forestal y pastizal, están sujetas a incendios frecuentes, aunque éstos constituyen un elemento importante en el proceso sucesional del bosque (Naranjo *et al.*, 2002), para el área en estudio, dado el mal manejo que se ha hecho de él, éste se ha vuelto el principal destructor de los bosques, afectando vegetación, fauna, suelo y aire, entre otros elementos fundamentales para la vida. Para el área en estudio el empleo de pastizales para el ganado ovino es la principal causa de destrucción del bosque, ya que los campesinos provocan incendios a fin de propiciar el renuevo de pastizales.

Otro factor de destrucción que se observó en la mayoría de las unidades con uso de suelo forestal son los árboles ocoteados, que son expuestos a incendios, plagas y enfermedades, lo cual disminuye su sanidad y estado nutricional del árbol (*Ibid.*)

Los indicadores que se consideraron para caracterizar a las unidades ambientales biofísicas permiten contar con información sobre los procesos que se están presentando en cada una de las unidades, generados por los cambios en el uso de suelo y por las prácticas de manejo que determinan la productividad y sustentabilidad de los recursos naturales (Browman *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

Las unidades biofísicas se caracterizan por ser de origen endógeno volcánico de andesita basáltica del Pleistoceno y del Holoceno, los principales tipos de relieve que se definieron son laderas de montaña superiores, medias e inferiores de flujos lávicos, laderas superiores internas y externas de cono cinerítico, laderas superiores e inferiores de lomerío medio y bajo, piedemonte acumulativo y planicies intermontanas.

Con respecto a los indicadores de suelo, en la mayoría de las unidades, el contenido de materia orgánica es alto, debido a que la cobertura vegetal es mayor del 50%, principalmente de bosque de pino y mixto, los cuales son los principales generadores de hojarasca, que mediante su descomposición forman humus y por lo tanto propician que el pH sea ligeramente ácido, contribuyendo así a que exista una buena actividad microbiana en el suelo.

En las unidades donde se practica agricultura, la densidad aparente del suelo es mayor que en donde se encuentra la vegetación de bosque, esto se debe a que están sujetas a un manejo con maquinaria agrícola, la cual compacta al suelo, disminuyendo su porosidad y su porcentaje de humedad. Estas unidades presentan altos contenidos de materia orgánica por los aportes de estiércol y fertilizantes para la producción de nopal verdura y avena forrajera.

Los contenidos menores de materia orgánica se localizaron en los escarpes y superficies cumbrales de flujos lávicos, ya que la cobertura vegetal es escasa, formada básicamente de matorrales, por lo que el aporte de hojarasca al suelo es muy pobre, caracterizándose éstos por tener menos de 10 cm de espesor, siendo de formación *in situ* en las oquedades que se presentan en los afloramientos rocosos.

La información obtenida a partir de la evaluación realizada en los sitios de muestreo, permitió caracterizar a las unidades biofísicas a partir de los indicadores ambientales de relieve, suelo y cobertura vegetal. Como consecuencia de ello, esa información servirá de base en el proceso de toma de decisiones durante el establecimiento de los programas de manejo de los recursos naturales en el área en estudio.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo de beca al primer autor. Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación Tecnológica (IN102503) y al Instituto de Geografía de la UNAM, por el apoyo recibido para la realización de este trabajo. Se reconoce la ayuda brindada por Gilberto Vela Correa, Adriana Guzmán Cansino y Enrique Saucedo Plata por su colaboración en los diferentes aspectos de este trabajo. Asimismo, al Vivero de San Luis Tlaxialtemalco del Gobierno del Distrito Federal.

REFERENCIAS

- Birkeland, W. P. (1999), *Soils Geomorphology*, 3a. ed., Oxford University Press, Inc.
- Bowman, R., M. Sucik, M. Rosales and J. Saunders (2002), *Soils quality indicators for whole-farm management in the Central Great Plains*, Conservation Tillage Fact Sheet No. 2-98. USA-ARS, USDA-NRCS and Colorado.
- CSIRO (1998), "A Guidebook to environmental indicators", *Commonwealth Scientific Industrial Research Organization*, Australia, pp. 1-20.
- DDF (1984), *Cartas topográficas a escala 1:10 000*, Tesorería de Departamento del Distrito Federal, México.
- Dexter, A. R. (2003), "Soils physical quality. Part I. Theory, effects of soils texture, density and organic matter, and effects on root growth", *Geoderma* 120, pp. 204-214.
- Dumanski, J. and E. Craswell (1998), "Resource management domains for evaluation and management of agro-ecological system", in Syers, J. K. (ed.), *Proceedings of Conference on Resources Management Domains, Kuala Lumpur*, International Board for Soil Research and Management (IBSRAM), Proceedings 16, pp. 1-16.
- Dumanski, J. (2000), "Land quality indicators: research plan", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, pp. 93-102.
- Eswaran, H., F. Beinroth H. and S. M. Virmani (2000), "Resource management domains: a biophysical unit for assessing and monitoring land quality", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, pp. 155-162.
- Farrow, A. and M. Winograd (2001), "Land use modeling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, pp. 249-268.
- García, E. (1988), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, 5ª ed., Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gaunt, J. L., J. Riley, A. Stein and F. W. T. Penning de Vries (1997), "Requirements for effective modeling strategies", *Agriculture Systems*, vol. 54, no. 2, pp. 153-168.
- Gerrard, J. (1992), *Soils geomorphology: and integration of pedology and geomorphology*, Ed. Chapman & Hall, London, pp. 1-68.
- GDF (2000), *Fotografías aéreas a escala 1:20 000 de Milpa Alta*, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Huffman, E., R. G. Eiler, G. Padbury and G. Wall (2000), "Canadian agri-environmental indicators related to land quality: integrating census and biophysical data to estimate soil cover, wind erosion and soil salinity", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, pp. 113-123.
- IMTA (1996), *Extractor rápido de información climatológica*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- INE (1997), *Avances en el desarrollo de indicadores para la evaluación del desempeño ambiental en México*, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, México, pp. 11-21.
- INEGI (1994), *Fotografías aéreas de Milpa Alta a escala 1:75 000*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1984a), *Carta Edafológica de Milpa Alta (E14-A49) y Amecameca (E14-B41) a escala 1:50 000*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.

- INEGI (1984b), *Carta de Uso del suelo y vegetación de Milpa Alta (E14-A49) y Amecameca (E14-B41) a escala 1:50 000*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (2001), *Cuaderno estadístico delegacional Milpa Alta, Distrito Federal*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, p. 156.
- López-Blanco J. y L. Villers-Ruiz (1998), "Delimitación de unidades ambientales biofísicas aplicando un enfoque geomorfológico y SIG, para el ordenamiento territorial de los Cabos, Baja California Sur", *Geografía y Desarrollo* 16, México, pp. 85-99.
- Martín, P. A. (1980), *Vulcanología de la Sierra Chichinautzin*, tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Moncayo, R. F. (1970), *Manual para uso de fotografías aéreas en dasonomía*, Subsecretaría Forestal y de la Fauna, Dirección General del Inventario Nacional Forestal, México.
- Naranjo Arias J. L., J. Jiménez Mendoza, R. Ramírez Hernández, V. Tena Carranza, E. Robles Becerril Montiel, R. Pérez R. y E. Molina Ramos (2002), Programa de manejo forestal persistente para Pino (*Pinus hartweggi* y *Pinus montezumae*) y oyamel (*Abies religiosa*) en 5 000.00 ha de bosque comunal en Milpa Alta, Servicios Forestales y Ambientales, México.
- OCDE (1997), *Desarrollo Sustentable, Estrategias de la OCDE para el siglo XXI*, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.
- OCDE (2001), *Environmental indicators for agriculture: methods and results*, vol. 3, Organization for Economic Cooperation and Development.
- Rivas, V. Rix, K. Francés, E. and A. Cendrero (1997), "Geomorphology indicators for environmental impact assessment: consumable and non-consumable geomorphological resources", *Geomorphology* 18, pp. 169-182.
- Schloter, M., O. Dilly and J. C. Munc (2003), "Indicators for evaluating soil quality", *Agriculture, Ecosystems and Environmental* 98, pp. 255-262.
- 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, DC.
- Stephen, N. (2002), "Standardization of soil quality attributes", *Agriculture, Ecosystems and Environmental* 88, pp. 161-168.
- Stein, A. J. and N. H. Riley (2001), "Issues of scale for environmental indicators", *Agriculture, Ecosystems and Environmental* 87, pp. 215-232.
- Tapia-Varela, G. y J. López-Blanco (2002), "Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100 000", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 19, núm. 1, pp. 50-65.
- Tsui C. C., Z. S. Chen and C. F. Hsieh (2004), "Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan", *Geoderma* 123, pp. 131-143.
- Verstappen, H. Th. (1983), *Applied geomorphology; geomorphological surveys for environmental development*, Amsterdam, Elsevier, p. 437.
- 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, p. 89.
- Waldhardt, R., D. Simmering and H. Albrecht (2003), "Biodiversity and landscape-summary, conclusions and perspectives", *Agriculture, Ecosystems and Environmental* 98, pp. 79-85.
- 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 Sci.* 37, pp. 29-38.