

Efecto del manejo integral de la cuenca del río Texcoco, sobre la producción de agua y sedimentos

Salvador Adame Martínez*
Mario Roberto Martínez Menez**

Recibido: 27 de octubre de 1998
Aceptado en versión final: 16 de marzo de 1999

Resumen. En la cuenca del río Texcoco se realizó un manejo integral, con los propósitos de rehabilitar las zonas erosionadas y reducir la magnitud de los escurrimientos superficiales y sedimentos, a través de la construcción de terrazas de banco, presas de control de azolves y reforestación. Los objetivos fueron analizar la variación del uso de suelo y la vegetación, y evaluar el impacto de las obras de rehabilitación de suelo, en las variables hidrológicas, antes y después del manejo. Para ello, se realizó un análisis estadístico de datos anuales. Los resultados indican una significativa disminución de las variables cercana a 80% y la prueba *t* de Student indicó diferencias significativas entre las medias de cada variable.

Palabras clave: Manejo integral de cuencas, cartografía, erosión de suelos, tepetate, variables hidrológicas.

Abstract. In the Texcoco river basin it has been elaborated an integral management of basins with the intention of rehabilitation of the eroded zone, water runoff control and sediment yield, through the construction of bench terraces, silt-controlled dams and reforestation. The objectives were to analyze variations in vegetation and soil use, to evaluate the impact of rehabilitation works on soils and hydrological variables, before and after management. A statistical analysis was performed using yearly data. Results indicate a significant reduction of variables under analysis in a magnitude very close to 80% while the t-Student test showed significant difference between means of variables.

Key words: Integral management of basins, mapping, soil erosion, tepetate, hydrological variables.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Texcoco, con una superficie de 2940.2 ha, fue sometida a un manejo integral por la Comisión del Lago de Texcoco (actualmente Gerencia del Lago de Texcoco), con el objeto de recuperar cerca de 400 ha de terrenos severamente erosionados en los que se encontraba expuesto el material subyacente, denominado "tepetate", mismas que se habían vuelto improductivas debido a las características de este material, como son su dureza y su escasa fertilidad.

El manejo integral de la cuenca consistió en la reincorporación a la producción agrícola de los suelos erosionados, mediante la roturación mecánica de tepetates, rasamientos y construcción de terrazas de banco; el control de avenidas y de movimiento

de sedimentos, con la construcción de presas de control de azolves, y la reforestación, con especies forestales de la región.

Actualmente, este proyecto no ha sido evaluado en términos hidrológicos, por lo que se desconoce cómo las prácticas de conservación de suelos, las presas de control de azolves, las reforestaciones y el establecimiento de zonas de cultivo en áreas degradadas, han impactado tanto la productividad de la zona como la producción de agua y de sedimentos, y cómo el manejo integral de la cuenca, mediante obras y prácticas de conservación de suelo y agua, ha sido un medio para la conservación de los recursos naturales.

En la realización de este estudio se efectuó, primero, un análisis multitemporal del uso del suelo con

* Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F.

** Programa de Edafología, Colegio de Posgraduados, 56230 Montecillo, Estado de México.

(1992), se han originado a partir de brechas volcánicas y flujo piroclástico fino, bajo diferentes condiciones climáticas. Según García (1978), en la cuenca el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una precipitación anual entre 700 a 1 000 mm y una temperatura media anual de 14.5° C.

En la parte baja y media de la cuenca se practica la agricultura de temporal, los cultivos principales son maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), cebada (*Hordeum vulgare*) y haba (*Vicia faba*). En la parte alta se ubican los bosques de encino (*Quercus sp.*), de oyamel (*Abies religiosa*) y de pino (*Pinus hartwegii*), que cubren casi 60% de la superficie total de la cuenca.

Es importante señalar que en la cuenca se localizaron áreas de reforestación o de plantaciones forestales, tanto en cepa común como en zanjas trincheras. Las principales especies arbóreas con las que se reforestaron las zonas erosionadas fueron: *Pinus radiata*, *Pinus montezumae* y *Cupressus lindleyi* (Arias et al., 1990).

Cartografía del área en estudio

La cartografía de la cuenca del río Texcoco se elaboró con fotografías aéreas de 1974, para conocer la situación que guardaba el uso de suelo y la vegetación antes del manejo integral, y con fotografías de 1989, para determinar la situación después del manejo, para así evaluar el efecto de los trabajos realizados en la cuenca.

Recopilación de la información

Para elaborar la cartografía, se recopiló la información cartográfica y fotográfica disponible para la cuenca. Con relación a la primera, se manejaron las cartas topográficas, geológicas, edafológicas y de uso de suelo y vegetación, a escala 1:50 000, editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Por lo que respecta a las fotografías aéreas disponibles, éstas fueron pancromáticas blanco y negro a escala 1:28 000 y 1:15 000 de septiembre de 1974 y marzo de 1980, respectivamente, de la empresa "Aerofoto". También se emplearon fotografías a escala

1:30 000 de marzo de 1979 del INEGI y fotos a escala 1:19 500 y 1:21 500 de mayo de 1989 de la Subdirección de Estudios y Consulta del Territorio Nacional del Gobierno del Estado de México.

Fotografías aéreas

Para el mapa de la situación del uso del suelo sin proyecto, se emplearon fotografías aéreas de 1974, y para el plano después del proyecto, las de 1989. Las fotografías de los años restantes se utilizaron para verificar la variación de los períodos de construcción de los trabajos, así como para dar seguimiento a las prácticas de conservación de suelos, a través del tiempo.

Interpretación de fotografías aéreas y verificación de campo

Se efectuó una primera interpretación de las fotografías aéreas, para identificar y delimitar los diferentes usos del suelo y de la vegetación, usando para ello un estereoscopio de espejos y apoyándose en los elementos de fotointerpretación reportados por Terrazas (1991), que son: *forma*, *tamaño*, *tono*, *textura* y *localización*.

En campo se revisaron los diferentes usos del suelo y vegetación, además de sus respectivos linderos delimitados en la fotointerpretación, sobre todo donde había duda o no estaban definidos claramente; posteriormente, se hizo una segunda interpretación de fotografías para corregir las líneas de contacto entre los diferentes usos del suelo.

Mapa base

Para producir el mapa base se empleó el método de triangulación radial mecánica, por medio del cual fue posible establecer el control horizontal y vertical suplementario a través de las relaciones geométricas de las fotografías aéreas continuas, y como lo señala Palma (1989), esto permite determinar la posición planimétrica correcta de una serie de puntos de las fotografías aéreas, eliminando las deformaciones geométricas encontradas en cada punto por intersección de dos o más rectas radiales a partir del punto principal.

Este procedimiento consta de dos etapas. En la primera se preparó el material fotográfico, las cartas topográficas, el número de puntos de control de apoyo terrestre, la construcción del caneavá geográfico, y se ubicaron los puntos de control en el caneavá geográfico o cuadrícula plana; en la segunda etapa se procedió al armado de las plantillas o arañas metálicas para cada una de las fotografías aéreas, al armado de la red de plantillas que se integraron al caneavá geográfico por medio de la unión de las plantillas, y a la elaboración del mapa base, el cual sirvió para vaciar la información de las fotografías aéreas.

Restitución

La restitución o transferencia Herrera (1987) la define como el proceso de llevar información de interés obtenida de las fotografías al mapa base, esto es, se transfirió la información de las fotografías aéreas al mapa base, a escala 1:20 000, utilizando para ello el instrumento fotogramétrico denominado Zoom Transfer Scope.

Mapa final

Finalmente, transferida la información de las fotografías aéreas al mapa base, se procedió a pasar este mapa en limpio, dando por resultado el mapa de uso de suelo y vegetación.

Identificación y cuantificación de los trabajos de rehabilitación del suelo

Elaborada la cartografía, se cuantificó la superficie que cubrían los diferentes usos del suelo y de cobertura vegetal, entre las que se encuentran las áreas terracadas y reforestadas. En lo referente a las presas de control de azolves, no fue posible identificarlas todas en las fotografías aéreas, por lo que se realizaron recorridos de campo por cada uno de los cauces de la cuenca, para ubicarlas geográficamente.

Determinada la información sobre los trabajos de conservación del suelo y el agua (terrazas, presas de control de azolves y reforestaciones), fue corroborada con la reportada por la Comisión del Lago de Texcoco (1985), Pedraza (1987) y Pimentel (1992).

Análisis estadístico de datos hidrológicos en la cuenca del río Texcoco

Para medir el impacto de las obras y prácticas de conservación del suelo y agua, las reforestaciones y los cambios de uso del suelo, se analizaron los datos anuales de los escurrimientos superficiales, escurrimientos máximos instantáneos y el coeficiente de escurrimiento y producción de azolves. Para el análisis de escurrimientos y sedimentos se utilizaron los datos reportados por la Comisión de Aguas del Valle de México (actualmente Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, dependiente de la Comisión Nacional del Agua) en el período de 1946-1990, con las técnicas que a continuación se describen.

La información se agrupó en dos períodos, el de los escurrimientos (medios, máximos instantáneos) y coeficiente de escurrimiento fue de 1946-1977, esto es, antes del proyecto, y de 1978-1990 después del proyecto. Para ambos períodos se calcularon las estadísticas básicas en el procedimiento de medias (MEANS) del paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS), éstas consistieron en obtener la media, la desviación estándar, y el valor máximo y mínimo, con el objeto de contrastar y conocer la variación de los escurrimientos en el período en estudio. Posteriormente se efectuó una prueba de medias usando para ello la técnica estadística *t* de Student, el valor absoluto de *t* se comparó con el valor de la distribución *t* de Student de dos colas, con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y con un 5% de nivel de significancia.

Este análisis estadístico también se aplicó de manera similar para los datos de producción de sedimentos en suspensión o azolves, pero para los períodos de 1961-1977 antes del proyecto, y de 1978-1990 para después del proyecto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación de uso del suelo en la cuenca del río Texcoco

De acuerdo con la metodología aplicada, se determinó el uso del suelo de la cuenca para 1974 y 1989,

que corresponden a la condición antes y después del proyecto, respectivamente. Los resultados se presentan en el cuadro 1. La variación espacial de los usos del suelo con y sin manejo integral de la cuenca, obtenida a partir de fotografías aéreas, se muestra en las figuras 2 y 3, donde claramente se identifican las zonas con prácticas de conservación de suelos.

Cuadro 1. Variación de uso del suelo y vegetación en la cuenca del río Texcoco

Uso del suelo y vegetación	1974	1989	Variación en el período
	Superficie (ha)	Superficie (ha)	
Bosque de pino	538.3	538.3	-
Bosque de oyamel	823.5	823.5	-
Bosque de encino	359.8	359.8	-
Pastizal natural	86.4	83.1	-3.3
Reforestación	3.6	50.1	46.5
Agricultura	705.4	947.7	242.3
Erosión	396.4	26.0	-370.4
Zona urbana	26.8	99.4	72.6
Otros	0	12.3	12.3
Total	2940.2	2940.2	-

Fuente: Levantamiento usando fotografías aéreas de 1974 y 1989.

Zonas de bosques de Pino (*Pinus sp.*) Oyamel (*Abies religiosa*) y Encino (*Quercus sp.*)

Las zonas de bosque de pino localizado y cuantificado en 1974 fueron de 538.3 ha, y es un bosque disperso de *Pinus hartwegii* con un estrato herbáceo de pastizal natural o zacatonal. El bosque de oyamel (*Abies religiosa*) se identificó en la parte media y húmeda de la cuenca, cubriendo una superficie de 823.5 ha y la zona de encino (*Quercus sp.*) abarcó una superficie de 359.8 ha. La extensión de los bosques cuantificados en la cuenca es de 1721.2 ha, que representa 58.5% del área total de la misma.

Cabe destacar que las zonas de bosque no sufrieron cambios en superficies en el período en estudio, información que también se reporta en los trabajos presentados de uso actual de la cuenca del río Texcoco, por Figueroa (1975) y Ortiz (1986). Debe señalarse que, a la fecha, esta zona no pre-

senta cambio de uso, debido a que a partir de 1974 se declaró una zona de veda, (como área de reserva forestal) y ésta ha sido respetada con el cuidado de las autoridades forestales, de los dueños y los poseedores del bosque en esta región. Sin embargo, no se descarta que exista un aprovechamiento forestal para producción de carbón y leña, que no ha incidido en deforestaciones totales, pero sí ha modificado la densidad forestal, ya que en el análisis de la fotointerpretación se muestra una reducción en la densidad de la vegetación estimada en 10% para bosque de pino, 10% para bosque de oyamel y 15% para bosque de encino. Esto indica que a pesar de las vedas forestales, existen talas dirigidas que reducen la masa forestal y es precisamente el aprovechamiento parcial del bosque el que es muy difícil de controlar, y paulatinamente va deteriorando los bosques, sobre todo si se combina con el pastoreo.

Pastizal natural

Los pastizales naturales compuestos de pastos y zacatonales se localizaron en alturas mayores de los 2 900 m sobre el nivel del mar y el levantamiento efectuado reportó una superficie de 86.4 ha al inicio del estudio y se redujo a 83.1 ha al final del mismo. De acuerdo con el análisis fotointerpretativo, las 3.3 ha se convirtieron de pastizales a zonas reforestadas. Es importante mencionar que Figueroa (1975) encontró un área de 51.9 ha de pastizal natural, superficie inferior a la determinada en este estudio, pero es posible que se deba a que consideró el resto del área como pastizal degradado, que se modificó para utilizarlo en agricultura. En cambio, Ortiz (1986) reportó una superficie de 92.9 ha de pastizales, superficie mayor a la localizada en este trabajo.

Cabe aclarar que estas variaciones reportadas en los estudios previos, indican que la metodología de fotointerpretación y la concepción de zonas erosionadas y de pastizales degradados fue diferente; sin embargo, en esta investigación se trató de cuantificar la variabilidad temporal, por lo que el método fue acotado con los parámetros de mayor aproximación.

Reforestaciones

Se incluyeron las plantaciones forestales llevadas a cabo en cepa y zanja trinchera en la cuenca del río Texcoco. En 1974 se identificó una superficie reforestada de 3.6 ha y, para 1989, la extensión se incrementó en 46.5 ha, dando un total de 50.1 ha reforestadas, lo que representó 1.7 % del área de la cuenca.

En su estudio sobre el programa de reforestación en el período de 1974 a 1989, Arias *et al.*, (1990) reportan para la cuenca del río Texcoco reforestaciones en zanjas trincheras y cepas. En relación con la reforestación en zanjas trincheras, que cubren una superficie de aproximadamente siete hectáreas, se muestreó un sitio de 1 000 m² y se encontraron dos especies forestales, la primera fue de cedro (*Cupressus lindleyi*), el número de árboles fue de cinco, los cuales presentaban un diámetro medio de 16 cm, y una altura media de 6.4 m. La segunda especie fue de pino (*Pinus radiata*), el número de árboles fue de 19, con un diámetro medio de 11 cm y una altura media de 5.1 m. El sustrato fue material degradado con mezclas de tepetate rojo y suelo, donde se desarrollaron las reforestaciones.

Para la reforestación en cepa, que cubría una superficie de casi 15 ha, se establecieron dos sitios de muestreo en la parte conocida como "El Cedral" (reforestada con *Cupressus lindleyi*); en el primer sitio el número de árboles vivos contabilizados fue de 146, y el número de árboles muertos fue de 2 y 69 cepas vacías, y en el segundo sitio el número de árboles muertos fue de 134, con una sobrevivencia de 0%, esto es, la mortalidad total.

Esta información refleja el gran esfuerzo que ha realizado la Gerencia del Lago de Texcoco en sus programas de reforestación, ya que hasta 1990 el número de árboles de las cinco principales especies forestales plantadas era de 5.6 millones de plantas (Arias *et al.*, 1990), y para la cuenca del río Texcoco se tienen al menos 50.1 ha reforestadas, disminuyendo así las zonas degradadas de tepetates que existían en 1974, como lo reportó Figueroa (1975).

Agricultura

La superficie dedicada a la agricultura en la cuenca del río Texcoco fue de 705.4 ha, que representan 24% de la superficie total de la misma en 1974. Para 1989, la superficie agrícola aumentó a 947.7 ha (32.3 % del total), lo que representa un aumento de la superficie agrícola de 242.3 ha, equivalente a un 8.1% de la superficie total. Lo anterior indica que, en esta cuenca, gran parte de los trabajos de recuperación de suelos como terrazas, subsoleos y rasamientos, fueron realizados para convertir las zonas erosionadas en zonas de producción de cultivos.

Erosión

Para 1974, en la parte media de la cuenca se presentaba un fuerte proceso erosivo, manifestado por la presencia de suelos esqueléticos fuertemente erosionados, caracterizados por colores blanquecinos y rojizos conocidos como tepetates y pastizales degradados. Complementariamente, existía la presencia de cárcavas profundas y frecuentes, que hacían de los terrenos zonas con pastizales degradados y que cubrían una superficie de 396.4 ha, lo que equivale a 13.5% de la superficie total de la cuenca.

Para 1989, la zona erosionada se redujo a 26.0 ha (menos de 1.0% de la superficie total de la cuenca) y las 370.4 ha restantes fueron rehabilitadas a través de obras y prácticas de conservación del suelo y el agua, que consistieron en roturación profunda, subsoleos, bordos y terrazas de banco; una pequeña porción se recuperó con reforestaciones.

La superficie erosionada y rehabilitada con terrazas fue de 349.2 ha, lo que significa que 12% de la superficie total de la cuenca del río Texcoco se trabajó con terrazas y 21.2 ha fueron subsoleadas y reforestadas en la zona. Estos terrenos erosionados fueron destinados a la agricultura, la reforestación y otros se convirtieron en áreas urbanas y en otros usos, como se reporta en los valores (+) que aparecen en el cuadro 1.

La construcción de las terrazas se inició en 1978 y se concluyó en 1982, los avances alcanzados

fueron analizados a través de los reportes de la Gerencia del Lago de Texcoco y de la interpretación de las fotografías aéreas de 1974, 1978, 1980 y de 1989.

Cabe señalar que el problema de producción de sedimentos y la degradación de la cuenca del río Texcoco se daba en la parte media de la misma y representaba 13.5% de su superficie total, por lo que el trazo y construcción de terrazas ayudó a reducir el proceso erosivo. Para apoyar el proceso de recuperación de suelos y la reducción de sedimentos, se construyeron 29 presas de control de azolves en el período en estudio, lo que contribuyó a consolidar el programa de rehabilitación de suelos de la cuenca del río Texcoco.

Zona urbana

En las fotografías de 1974, el total de la superficie urbana cuantificada fue de 26.8 ha, para 1989 ésta se incrementó a 99.4 ha, lo que representa un incremento de 72.6 ha. Lo anterior se debe principalmente al crecimiento del área urbana del poblado de Tequexquinahuac y de los barrios de La Trinidad y San Sebastián, de la ciudad de Texcoco.

Otros

En otros usos se incluye a los cuerpos de agua, localizados en la parte media de la cuenca, donde se construyeron varios bordos de almacenamiento. Después de las obras, se localizó una superficie total de 9.5 ha. En las fotografías aéreas de 1989 se identificó también una mina de material para construcción, actualmente abandonada, que abarca una extensión de 2.8 ha.

El análisis fotogramétrico como herramienta, permitió concluir que no hubo un cambio en la superficie forestal que cubre casi 60% del área total de la cuenca. Se considera que la zona forestal no debe haber influido en los cambios producidos en los escurrimientos superficiales y en la producción de sedimentos; sin embargo, podría haber un efecto en la disminución de la recarga del acuífero que es difícil de predecir, por la reducción en la densidad vegetal reportada.

La zona más importante que afectaba las variables hidrológicas de la cuenca fue la superficie erosionada, ya que a pesar de cubrir sólo 396.4 ha, o sea 13.5% del área total, aportaba la mayor parte de los escurrimientos superficiales, los escurrimientos máximos instantáneos y los sedimentos, además de lo que contribuían las cárcavas y los sistemas de drenaje. Esto se soporta con los resultados obtenidos por Figueroa (1975), Rey (1979) y Arias (1992), quienes señalan que las áreas de tepetates generan la mayor cantidad de sedimentos, llegando a producir hasta 16 t/ha/año. Asimismo, Oropeza *et al.*, (1990) reportaron que las zonas de cárcavas en la cuenca llegan a producir hasta 267 t/ha/año.

Al ser rehabilitada la parte erosionada, se mejoraron las condiciones de los suelos y los sistemas de producción. Las modificaciones a la superficie del terreno a través de las terrazas, y la reducción del proceso erosivo con la presencia de cultivos, permitió reducir la producción de sedimentos y la disminución de los escurrimientos máximos, medios y mínimos.

En este artículo se analizó el efecto de los cambios de uso del suelo, las prácticas mecánicas y las presas de control de azolves, en la reducción de los escurrimientos medios, máximos instantáneos y sedimentos, como estaba propuesto en los objetivos planteados por la Comisión del Lago de Texcoco.

Para confirmar estos supuestos se realizó un análisis de la variabilidad temporal de los datos de las variables hidrológicas, desde el inicio de los trabajos de conservación y hasta 1990; de esta forma se podrá conocer el impacto y la eficiencia técnica de las obras y prácticas de conservación del suelo y el agua, para antes y después del proyecto de manejo integral de la cuenca del río Texcoco.

Análisis estadístico hidrológico anual en la cuenca del río Texcoco

La información hidrológica reportada a partir de 1946 y hasta 1990, permitió realizar un análisis de la va-

Cuadro 2. E scorrimiento superficial en la estación de aforo de la cuenca del río Texcoco (1946-1990)

Sin manejo integral			Con manejo integral		
Número	Años	Miles m ³	Número	Años	Miles m ³
1	1946	3 641	1	1978	844
2	1947	3 211	2	1979	534
3	1948	3 742	3	1980	181
4	1949	884	4	1981	1 156
5	1950	1 540	5	1982	954
6	1951	3 162	6	1983	293
7	1952	3 160	7	1984	494
8	1953	844	8	1985	65
9	1954	2 742	9	1986	200
10	1955	3 213	10	1987	242
11	1956	2 112	11	1988	124
12	1957	1 355	12	1989	90
13	1958	3 230	13	1990	0
14	1959	2 184			
15	1960	857			
16	1961	2 141			
17	1962	1 109			
18	1963	2 601			
19	1964	993			
20	1965	2 280			
21	1966	1 937			
22	1967	919			
23	1968	1 856			
24	1969	1 324			
25	1970	803			
26	1971	753			
27	1972	1 931			
28	1973	1 130			
29	1974	1 231			
30	1975	1 226			
31	1976	2 897			
32	1977	695			

Fuente: Datos reportados por la Gerencia de Aguas del Valle de México (1990).

riación temporal de los escurrimientos superficiales, gastos máximos instantáneos, coeficientes de escurrimiento y producción de sedimentos, para la situación sin manejo (1946-1977) y para el manejo integral de la cuenca (1978-1990).

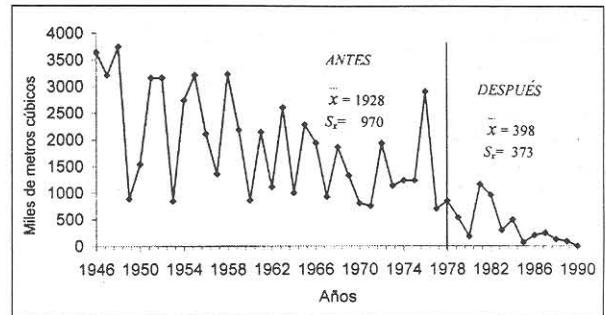


Figura 4. Variación de los escurrimientos anuales en la cuenca del río Texcoco para los periodos de 1946 a 1977 (antes del manejo) y de 1978 a 1990 (después del manejo integral).

Variación de los escurrimientos superficiales en el área en estudio

Los escurrimientos anuales en el período de 1946-1990, se agruparon en los períodos anteriores y posteriores al manejo, como se muestra en el cuadro 2 y en la figura 4. El volumen escurrido de mayor magnitud en el período en estudio fue de 3 742 mil m³ en 1948, lo que equivale a una lámina de 127.3 mm y representa un 22% de la precipitación media (583.9 mm) que se presentó en dicho año en la cuenca del río Texcoco. El volumen mínimo registrado fue de 0 en 1990.

El rango de variación de los escurrimientos superficiales sin el proyecto fue de 695 000 a 3 742 000 m³, que corresponde a una lámina escurrida de 23.6 a 127.3 mm, y los escurrimientos reportados después de la implementación del proyecto disminuyeron a un rango de 0 a 1 156 000 m³, que corresponden a una lámina escurrida de 0 a 39.3 mm, respectivamente.

Al examinar los escurrimientos medios para antes y después del manejo, se observa que estos disminuyeron de 1 928 000 m³ a 398 000 m³, lo que indica que existe una diferencia de 1 530 000 m³ que son atribuibles a las obras construidas. Este volumen de agua se suma a la recarga de acuíferos que anualmente se almacena en la cuenca, suponiendo que la evapotranspiración y la evaporación de cuerpos de agua permanecen constantes. Por consiguiente, si se toma el escurrimiento medio anual para los 13 años de análisis después de las obras, se estima que hubo

Cuadro 3. Esguerrimiento máximo anual en la estación de aforo de la cuenca del río Texcoco (1946-1990)

Sin manejo integral			Con manejo integral		
Número	Años	m ³ /s	Número	Años	m ³ /s
1	1946	40.8	1	1978	12.8
2	1947	35.5	2	1979	14.0
3	1948	53.4	3	1980	2.0
4	1949	27.7	4	1981	14.4
5	1950	22.0	5	1982	9.9
6	1951	30.3	6	1983	5.6
7	1952	24.2	7	1984	8.3
8	1953	28.6	8	1985	0.7
9	1954	45.4	9	1986	5.7
10	1955	33.1	10	1987	0.5
11	1956	20.1	11	1988	2.1
12	1957	28.6	12	1989	1.4
13	1958	41.7	13	1990	0
14	1959	30.9			
15	1960	30.8			
16	1961	40.5			
17	1962	38.7			
18	1963	24.3			
19	1964	26.3			
20	1965	21.5			
21	1966	41.8			
22	1967	28.7			
23	1968	33.7			
24	1969	29.3			
25	1970	14.2			
26	1971	14.4			
27	1972	35.0			
28	1973	26.3			
29	1974	42.2			
30	1975	13.6			
31	1976	11.5			
32	1977	12.5			

Fuente: Datos reportados por la Gerencia de Aguas del Valle de México (1990).

una recarga de 19 890 000 m³ que corresponde a una lámina de 676.5 mm.

Observando la figura 4, se aprecia que existe una tendencia a la baja de los esguerrimientos, a partir

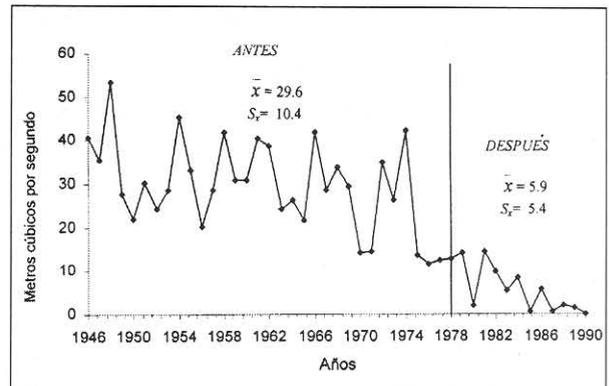


Figura 5. Esguerrimiento máximo instantáneo de la cuenca del río Texcoco para los períodos de 1946 a 1977 (antes de las obras) y de 1978 a 1990 (después de las obras).

de la construcción de los trabajos de rehabilitación de suelos, las reforestaciones y los cambios de uso del suelo, hasta tal grado que para 1990 no se reportan esguerrimientos. Por esta razón, de 1991 a la fecha, la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México no realiza aforos hidrológicos en la cuenca.

La prueba estadística de medias, a través de la *t* de Student calculada para los esguerrimientos fue de 5.4, mientras que la *t* de tablas es de 1.68 con un nivel de significancia de 5%, lo que indica que las medias son diferentes. Es importante mencionar que el resultado se debe tomar con reservas, ya que la prueba de *t* es aplicable cuando las observaciones de cada muestra son independientes, y aquí los datos son dependientes a través del tiempo.

Análisis de los esguerrimientos máximos instantáneos

Los gastos máximos instantáneos para el período de 1946-1990 se muestran en el cuadro 3 y en la figura 5. Esta información señala que el gasto máximo reportado fue de 53.4 m³/s y se presentó en 1948, y corresponde a un período de retorno de 46 años si no se hubieran realizado obras de manejo en la cuenca. Estudiando el gasto máximo por períodos se observa que, para antes de las obras, fue de 53.4 m³/s con un período de retorno de 33 años y para después de las obras, de 14.4 m³/s

Cuadro 4. Análisis de la relación precipitación/escorrimento en los períodos observados

Sin manejo integral de cuencas				Con manejo integral de cuencas			
Año	Precipitación (mm) ¹	Escurrimiento (mm) ²	Coefficiente de escurrimiento	Año	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Coefficiente de Escurrimiento
1946	580	123.8	0.21	1978	672	28.7	0.04
1947	578	109.2	0.19	1979	655	18.2	0.03
1948	707	127.3	0.18	1980	581	6.2	0.01
1949	395	30.1	0.08	1981	727	39.3	0.05
1950	487	52.4	0.11	1982	442	32.4	0.07
1951	519	107.6	0.21	1983	518	10.0	0.02
1952	742	107.5	0.14	1984	694	16.8	0.02
1953	375	28.7	0.08	1985	586	2.2	0.00
1954	721	93.3	0.13	1986	474	6.8	0.01
1955	644	109.3	0.17	1987	533	8.2	0.02
1956	586	71.8	0.12	1988	543	4.2	0.00
1957	389	46.1	0.12	1989	381	3.1	0.00
1958	773	109.9	0.14	1990	632	0	0.00
1959	782	74.3	0.10				
1960	584	29.1	0.05				
1961	512	72.8	0.14				
1962	621	37.4	0.06				
1963	695	88.5	0.13				
1964	664	33.8	0.05				
1965	600	77.6	0.13				
1966	599	65.9	0.11				
1967	615	31.3	0.05				
1968	636	63.1	0.10				
1969	594	45.0	0.08				
1970	517	27.3	0.05				
1971	514	25.6	0.05				
1972	512	65.7	0.13				
1973	595	38.4	0.06				
1974	653	41.9	0.06				
1975	497	41.7	0.08				
1976	634	98.5	0.16				
1977	523	23.6	0.05				

1) Datos reportados en la estación del río Texcoco.

2) Estimada al dividir el escurrimiento anual entre el área de drenaje.

para un período de retorno de 14 años. Por tanto, la avenida máxima para diferentes períodos de retorno de un área de drenaje, depende del manejo que se le dé a la misma.

Si se analizan los gastos máximos por períodos, se encuentra que, previo a las obras, el rango de variación fue de 53.4 a 11.5 m³/s, y que para el período posterior a las obras fue 14.4 a 0.0 m³/s. Como

resultado, se puede inferir que en el período de análisis el escurrimiento máximo fue disminuido en 53.4 m³/s, lo que da congruencia a los objetivos del manejo integral que fue reducir los escurrimientos y aumentar la recarga del acuífero.

La figura 5 muestra que en el período anterior al proyecto, los escurrimientos máximos fluctuaban aleatoriamente con tendencia a decrecer, y para el período posterior a los trabajos, el escurrimiento máximo decrece significativamente y se reporta una media de 5.9 m³/s.

Si se comparan los escurrimientos máximos medios por períodos, se reporta un abatimiento de 23.7 m³/s, que en términos porcentuales es de 80%, pero realizando una comparación de medias con una prueba estadística *t* de Student, se reporta que la *t* calculada fue de 7.6 superior a la *t* de las tablas de 1.7, con un nivel de significación de 5%, lo que confirma que las medias entre los dos períodos son diferentes.

Variación de los coeficientes de escurrimiento en la cuenca

Al considerar la precipitación anual en la estación climatológica del río Texcoco y asumiendo que ésta se distribuye uniformemente en la cuenca, y al relacionarla con el escurrimiento anual en milímetros, se calcularon los coeficientes de escurrimiento para los períodos con y sin el proyecto de rehabilitación de suelos, mismos que se muestran en el cuadro 4 y la figura 6.

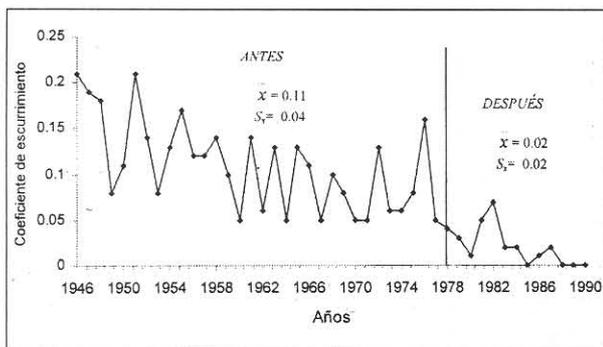


Figura 6. Coeficiente de escurrimiento en la cuenca del río Texcoco para el período 1946-1990.

Los datos examinados indican que para el período sin proyecto, el coeficiente de escurrimiento varió de 0.05 a 0.21 con un promedio de 0.11, y con el manejo integral de la cuenca el coeficiente de escurrimiento fluctuó de 0 a 0.07, con valor medio de 0.02. Al comparar las medias se observa una diferencia de 0.09 y con una prueba *t* de Student resulta que la *t* calculada es de 7.55 y que la *t* de tablas es de 1.68, a un nivel de significancia de 5%, por lo que se concluye que las medias son diferentes.

Para la situación sin el proyecto, el coeficiente de escurrimiento osciló entre 0.05 y 0.21, de lo que se infiere que, para una precipitación anual, se puede estimar el volumen anual escurrido, y la diferencia representa el volumen del agua infiltrado en el suelo, que es utilizado para evapotranspiración y recarga del acuífero, como producto de las obras y prácticas implementadas en el manejo integral de la cuenca del río Texcoco.

En los datos del cuadro 4 se observa que para el primer período (sin el proyecto), la precipitación media anual que se presentó fue de 588 mm y el coeficiente de escurrimiento medio de 0.11, lo que permite inferir que la lámina escurrida anual fue de 64.68 mm y la lámina infiltrada de 532.32 mm. Ahora bien, se supone que el volumen infiltrado es utilizado para evapotranspiración y podría esperarse una recarga de acuíferos, si la evapotranspiración de los cultivos y la vegetación no rebasa la lámina infiltrada anual.

En contraste, para el período con manejo, la precipitación media anual fue de 572 mm y el coeficiente de escurrimiento promedio fue de 0.02, lo que permite estimar un escurrimiento medio anual de 11.4 mm. Al comparar la lámina infiltrada anual, que fue de 560.4 mm, con la lámina infiltrada anual del período sin manejo (532.32 mm), se obtiene una diferencia de 28.08 mm de lámina infiltrada, que sería la posible ganancia en la recarga anual del acuífero, si se considera que la evapotranspiración permanece constante.

Variación de la producción de sedimentos en el período de 1961-1990

Los sedimentos en suspensión reportados por la Gerencia de Aguas del Valle de México (1990), en

Cuadro 5. Producción de sedimentos y degradación de los suelos, en la cuenca del río Texcoco

Sin manejo integral					Con manejo integral				
Núm.	Años	Producción sedim. (m ³) ¹	Producción sedim. (ton) ²	Deg. espec. t/ha ³	Núm.	Años	Producción sedim. (m ³)	Producción sedim. (ton)	Deg. espec. t/ha
1	1961	7 961	9 553	3.25	1	1978	4 380	5 256	1.79
2	1962	11930	14316	4.87	2	1979	3 770	4 524	1.54
3	1963	17641	21169	7.20	3	1980	110	132	0.04
4	1964	5829	6995	2.38	4	1981	6 160	7 392	2.51
5	1965	13268	15922	5.42	5	1982	2 170	2 604	0.89
6	1966	9832	11798	4.01	6	1983	600	720	0.24
7	1967	6272	7526	2.56	7	1984	1 090	1 308	0.44
8	1968	14540	17448	5.93	8	1985	210	252	0.09
9	1969	4190	5028	1.71	9	1986	320	384	0.13
10	1970	4710	5652	1.92	10	1987	130	156	0.05
11	1971	3480	4176	1.42	11	1988	60	72	0.02
12	1972	16460	19752	6.72	12	1989	0	0	0.00
13	1973	6090	7308	2.49	13	1990	0	0	0.00
14	1974	5290	6348	2.16					
15	1975	3030	3636	1.24					
16	1976	1430	1716	0.58					
17	1977	1410	1692	0.58					

1) Datos reportados por la Gerencia de Aguas del Valle de México (1990).

2) Obtenido al multiplicar la producción de azolves (m³) por 1.2 t/m³

3) Producción de azolves (ton) entre la superficie de la cuenca.

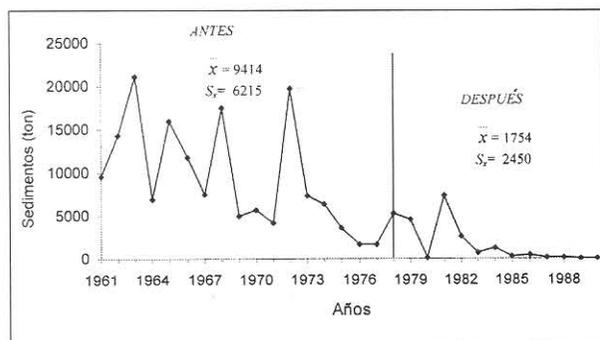


Figura 7. Producción de sedimentos en la cuenca del río Texcoco (antes y después del proyecto).

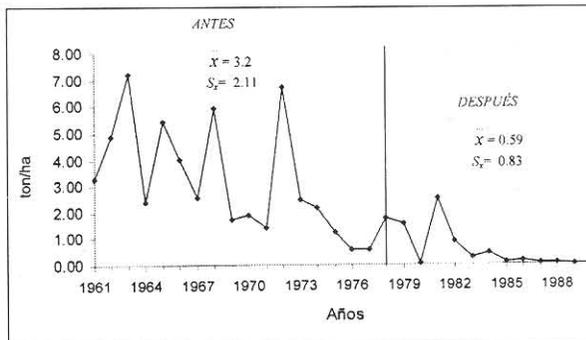


Figura 8. Degradación específica de la cuenca del río Texcoco (antes y después del proyecto).

la estación de aforo de la cuenca del río Texcoco, se agruparon por períodos sin manejo (1961-1977) y con manejo integral de la cuenca (1978-1990), y considerando el peso específico de las partículas de 1.2 t/m³ se obtuvo la producción de sedimentos en toneladas. La degradación específica se calculó dividiendo

la producción de sedimentos en toneladas entre el área de drenaje. Esta información se presenta en el cuadro 5 y en las figuras 7 y 8.

Los sedimentos en suspensión que salen fuera de la cuenca del río Texcoco, en el período sin mane-

jo, variaron de 17 641 m³ (21 169.1 ton) a 1 410 m³ (1 692 ton), con un promedio de 7 845 m³ (9 414 ton), lo que indica que la degradación específica varió de 7.2 t/ha/año a 0.58 t/ha/año y con un promedio de 3.2 t/ha/año, valores que concuerdan con los reportados por Martínez y Fernández (1983) para las cuencas del Altiplano Mexicano.

En contraste, para el segundo período (con manejo), la producción de sedimentos varió de 6 160 m³ (7 392 ton) a 0 m³ con un promedio de 1 461 m³ (1 754 ton) y la degradación específica fluctuó de 0 a 2.51 t/ha/año con un promedio de 0.59 t/ha/año. Esta información se muestra en las figuras 7 y 8.

Si se compara la producción de sedimentos promedio para antes y después de las obras, se observa que variaron de 9 436 ton a 1 754 ton, lo que significa que, en promedio, las obras tuvieron una eficiencia para reducir los azolves en 7 682 ton anuales. La degradación específica de la cuenca del río Texcoco fue de 3.2 t/ha en el primer período y de 0.6 t/ha en el segundo, lo que indica que las obras y prácticas de conservación del suelo y agua tuvieron la capacidad de reducir en 2.6 t/ha/año en promedio la degradación de los suelos de la cuenca del río Texcoco, valor comparable a la degradación media de los suelos de México que es de 2.67 t/ha/año.

Los sedimentos que la cuenca del río Texcoco aportó al vaso fue de 182 835 ton, lo que se traduce en una degradación de 62 ton/ha (6.2 mm) en el período en estudio (1961-1990). Sin embargo, debe destacarse que según reportes de Figueroa (1975), las áreas forestales que cubren 60% del área en estudio no reportan producción de sedimentos, por lo que la erosión proviene de una superficie estimada de 1 176 ha, donde la degradación estimada sería de 155 t/ha (1.5 cm) en el período en estudio.

Debe señalarse que con la rehabilitación de los suelos erosionados en un 13.5% del área total de la cuenca y con las obras y prácticas de conservación, se logró reducir a un mínimo la erosión de los suelos y las partículas removidas son depositadas en diferentes zonas de la cuenca. Además de que ya no existen aportaciones de azolves del área de drenaje del río Texcoco, lo que confirma la bondad de las obras realizadas por la Comisión del Lago de Texcoco.

Finalmente, la prueba *t* de Student realizada para comparar las medias de las dos situaciones (con y sin manejo) fue de 4.0 y la *t* de tablas de 1.7, para un nivel de significancia de 5%, lo que significa que las medias son diferentes y, por tanto, se puede concluir que las obras y prácticas de conservación del suelo y agua redujeron la degradación específica de los suelos de la cuenca del río Texcoco.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados presentados indican que la metodología utilizada permitió cuantificar los cambios en el uso del suelo, la evaluación de la vegetación y la cuantificación de las prácticas de conservación del suelo y el agua, realizadas como parte del manejo integral de la cuenca. El tratamiento dado a la información hidrológica disponible, permitió analizar la variabilidad temporal y espacial de la degradación de los suelos, y la bondad de las obras y las prácticas de conservación del suelo y el agua para reducir los escurrimientos superficiales, gastos máximos instantáneos y la producción de los sedimentos.

Con base en esto, se recomienda que esta metodología se aplique al menos a los once ríos del oriente de la Cuenca de México, para evaluar la bondad de los trabajos realizados y complementarlos con un análisis económico, con el objeto de conocer la rentabilidad de los trabajos de rehabilitación de suelos.

REFERENCIAS

- 📖 Arias R., H. M., A. Gómez G., S. Adame M., y M.E. Miranda M. (1990), *Evaluación del Programa de Reforestación del Proyecto Lago de Texcoco*, INEISACH- Proyecto Lago de Texcoco, Montecillo, México.
- 📖 Arias R., H. M. (1992), "Rehabilitación de tepetates: una alternativa para la producción agropecuaria y forestal", Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos, *Terra*, vol. 10, núm. especial, pp. 309-317.
- 📖 Figueroa S., B. (1975), *Pérdida de suelo y nutrientes y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco*, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- 📖 García A., E. (1978), *Los climas del Valle de México*, Instituto de Geografía, UNAM, sobretiros 6, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- 📖 Gerencia de Aguas del Valle de México (1990), *Boletín hidrológico* No. 32, Comisión Nacional del Agua, México.
- 📖 Herrera-H., B. (1987), *Elementos de fotogrametría, uso de materiales aerofotográficos*. Limusa, México.
- 📖 Martínez M., M. R. y J. Fernández V. (1983), *Evaluación de la degradación específica a nivel nacional a partir de cuencas hidrológicas*, Dir. Gral. de Conservación del Suelo y Agua, México.
- 📖 Miehlich, G. (1992), "Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico", Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos, *Terra*, vol. 10, núm. especial, pp. 137-144.
- 📖 Oropeza M., J. L.; M. R. Martínez M. y D. Ríos B. (1990), "Metodología para la evaluación de sedimentos en terrenos degradados mediante muros de control de azolves", sobretiro de *Agrociencia*, vol. I, núm. 3.
- 📖 Ortiz, M. de la L. (1986), *Evaluación de la velocidad de desertificación en la cuenca del río Texcoco (efecto de la tecnología aplicada, inversiones y factor humano)*, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México.
- 📖 Palma T., A. (1989), *Manual para elaborar el mapa base por el método de aerofototriangulación radial mecánica apoyada en cartas topográficas*, División de Ciencias Forestales, UACH, Chapingo, México.
- 📖 Pedraza C., L. (1987), "Síntesis del proceso de establecimiento y construcción de los trabajos de conservación de suelos, agua y reforestación, en áreas erosionadas de la cuenca oriental del ex-lago de Texcoco", *Primer Simposio Nacional sobre Uso y Manejo de Tepetates para el Desarrollo Rural*, Chapingo, México, pp. 182-191.
- 📖 Peña H., D. y C. Zebrowski (1992), "Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada", Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos, *Terra*, vol. 10, núm. especial, pp. 156-163.
- 📖 Pimentel B., L. (1992), "Cómo hacer productivos a los tepetates en México", Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos, *Terra*, vol. 10, núm. especial, pp. 293-301.
- 📖 Rey C., J.A. (1979), *Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K*, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- 📖 Terrazas D., S. (1991), *Interpretación automática de tipos de erosión a partir de la digitación de ortofotografías*, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Posgraduados, Montecillo, México.
- 📖 Zebrowski, C. (1992), "Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina", Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos, *Terra*, vol. 10, núm. especial, pp. 15-23.

la interpretación de fotografías aéreas, se localizaron y cuantificaron las áreas con obras y prácticas de conservación del suelo y agua, se analizaron los datos hidrológicos de escurrimientos y de producción de sedimentos existentes y, posteriormente, se llevó a cabo un análisis estadístico.

Este artículo busca señalar, por un lado, la identificación y cuantificación de la variación del uso del suelo y la vegetación, con y sin proyecto de rehabilitación de suelos y, por otro, determinar el impacto que el cambio en el uso del suelo, y las obras y prácticas de conservación del suelo y el agua, tuvieron en los datos reportados de producción de escurrimientos superficiales, gastos máximos instantáneos y producción de sedimentos o azolves.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la cuenca del río Texcoco, localizada en la porción oriente de la Cuenca de Méxi-

co, entre los 19° 25' 00" y 19° 30' 08" de latitud norte, y 98° 43' 25" y 98° 51' 43" de longitud oeste, y comprende una superficie de 2 940.2 ha. En la figura 1 se muestra la ubicación del área estudiada. Geográficamente se ubica en el municipio de Texcoco, y comprende principalmente las poblaciones de San Pablo Ixayoc y Tequexquinahuac; la primera comunidad juega un papel determinante en el uso y manejo de los recursos naturales de la parte media y alta de la cuenca, y la segunda de la parte baja.

El área se caracteriza por un relieve accidentado representado por laderas escarpadas, lomeríos y cañadas, suelos delgados y erosionados y con afloramiento de tepetate. Miehlich (1992) y Zebrowski (1992) mencionan que los tepetates de la zona en estudio son suelos volcánicos que presentan en sus perfiles horizontes endurecidos, y en América Latina se les conoce como talpetate o cangahua. La superficie de tepetates dentro de la cuenca se localiza en el piedemonte, y según Peña y Zebrowski

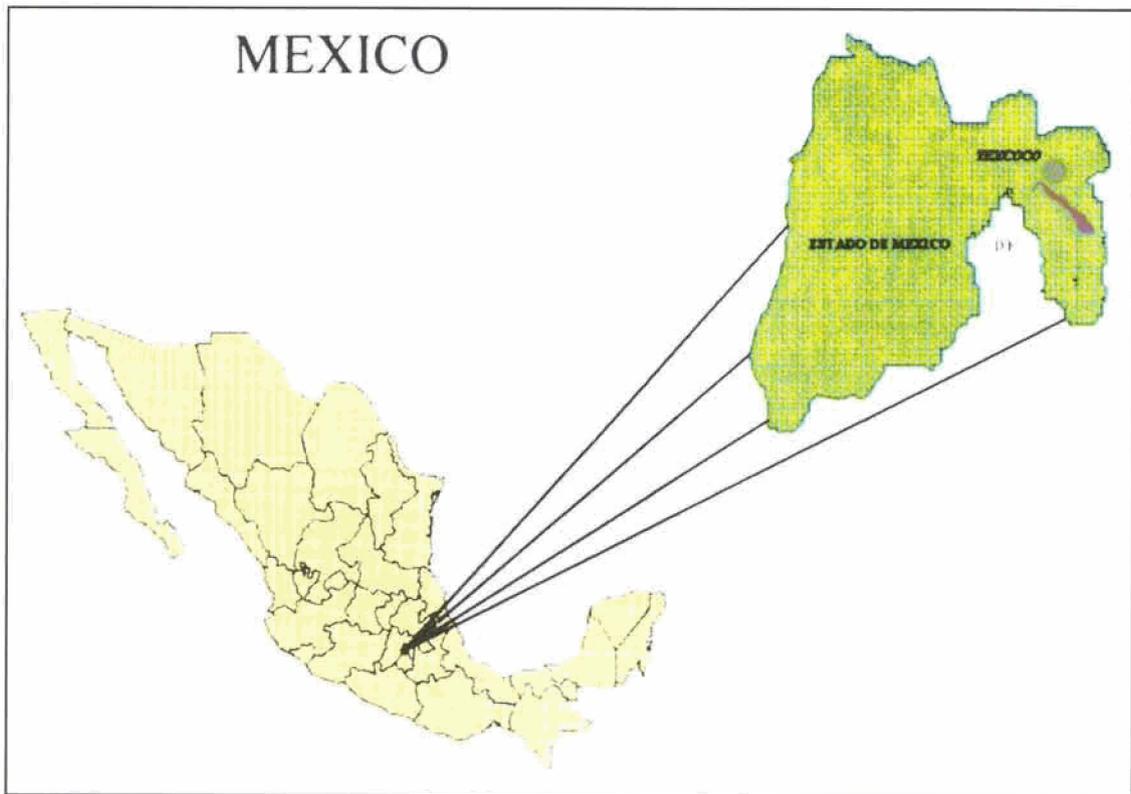


Figura 1. Localización del área en estudio.

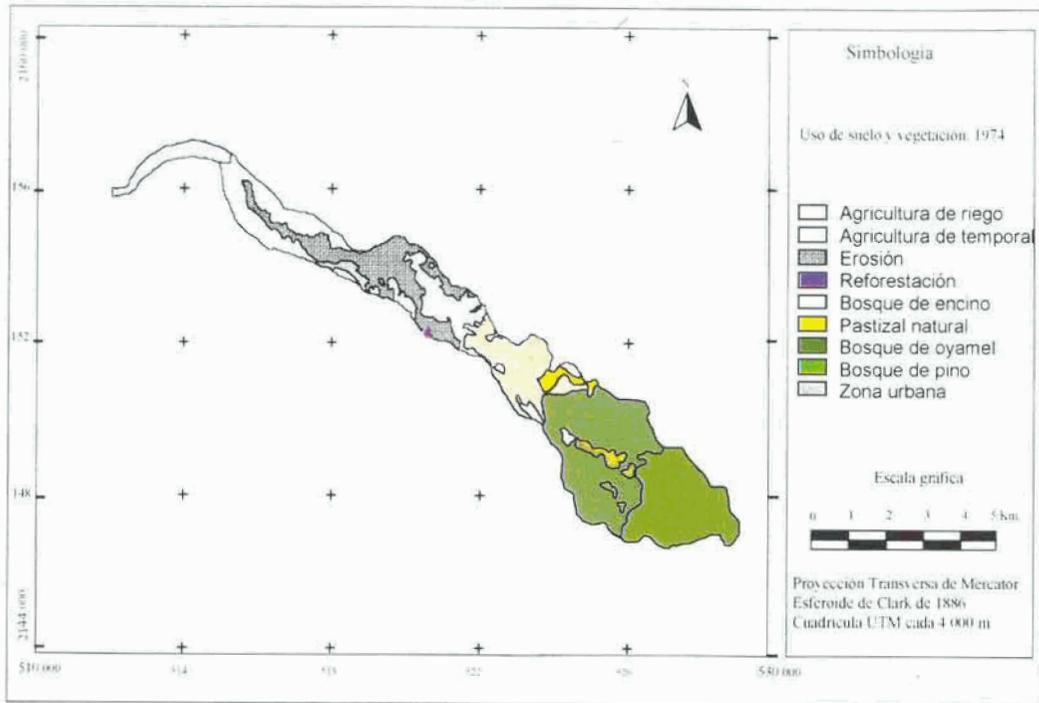


Figura 2. Uso de suelo y vegetación, sin manejo.

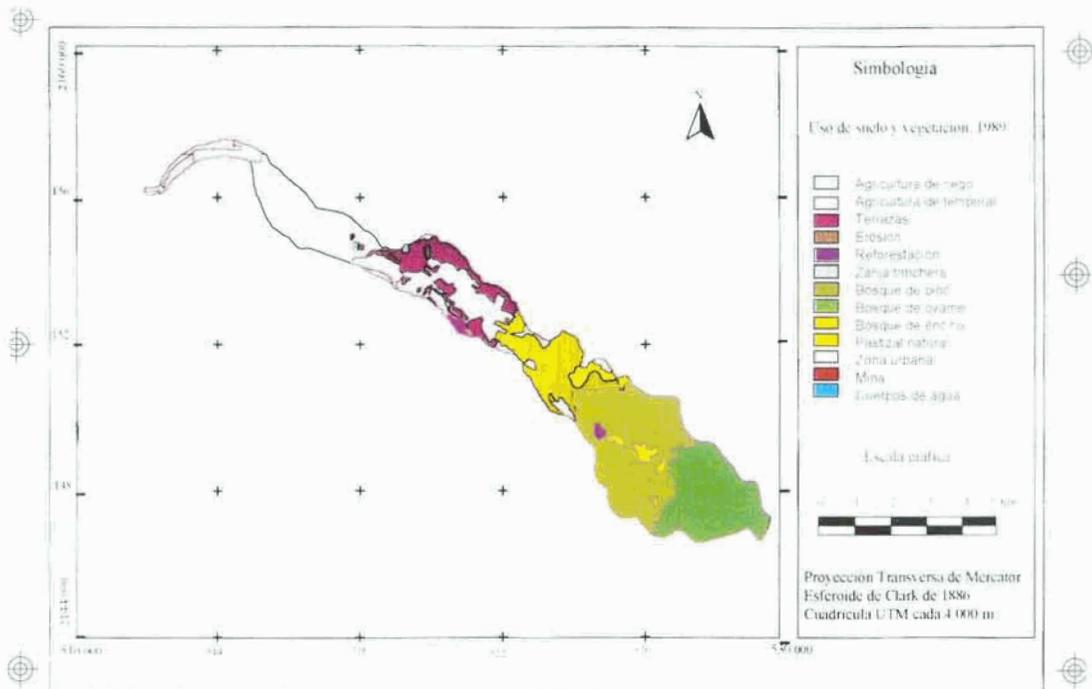


Figura 3. Uso de suelo y vegetación, con manejo.