



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**DINÁMICA DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO
Y SU EFECTO EN LOS ESCURRIMIENTOS
SUPERFICIALES DE LA MICROCUENCA DEL
RÍO CHICO, TULANCINGO, HGO.**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

GRICELDA VALERA VENEGAS

**Chapingo, Texcoco, Estado de México
Mayo de 2006**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



BIBLIOTECA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

Dinámica del cambio de uso del suelo y su efecto en los escurrimientos superficiales de la microcuenca de Río Chico Tulancingo, Hgo.

Tesis realizada por Gricelda Valera Venegas bajo la dirección del Comité Asesor indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR (A):


M. en C. SILVIA TERRAZAS DOMÍNGUEZ

ASESOR (A):


DR. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR:


M. en C. JAIME ALBERTO REY CONTRERAS

ASESOR:


M. en C. EDUARDO VARGAS PÉREZ

Chapingo, Texcoco, Estado de México
Mayo de 2006

AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias papá porque de tí recibo la fortaleza que necesito cada día.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante mi estancia en el postgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por permitirme dar una paso más en mi vida a través del Postgrado en Ciencias Forestales.

A mis asesores

Mtra. Silvia Terrazas Domínguez por el apoyo, la dirección, aportaciones, y revisión crítica de este trabajo, así como por el otorgamiento de las imágenes de satélite Landsat ETM+ de 2000.

Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por sus valiosos consejos, revisión y aportaciones no solo sobre el trabajo si no sobre situaciones de la vida.

Mtro. Jaime Alberto Rey Contreras por el tiempo que dedicó a la revisión y las sugerencias vertidas para el término del presente.

Mtro. Eduardo Vargas Pérez por estar siempre dispuesto a transmitir sus conocimientos a través de sus cátedras.

Al equipo de ingeniería de Comisión Nacional del Agua.

Ing. Víctor Campos Martínez Jefe del área de Hidroclimatología por la aportación de los datos de estaciones climáticas e hidrométricas de su área de competencia dentro de la Gerencia del Estado de Hidalgo.

Ing. Antonio Hernández Ramírez encargado del área de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos y Presas, Subgerencia de Ingeniería en Hidalgo por la aportación de datos de causas en el área de estudio.

Ing. Felix Serrano, encargado del área de Aguas Subterráneas Subgerencia de Ingeniería en Hidalgo por la aportación de datos de aguas subterráneas del Valle de Tulancingo.

Ing. Rubén Armendáriz del área de Ingeniería por su ayuda y tiempo en la revisión de datos de aguas superficiales del área.

Al Ing. José Luis Lucio Medina Ruíz por la aportación de los datos de las estaciones climáticas del área de estudio que se encuentran bajo la jurisdicción administrativa de GRAVAMEX (Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala).

Al Dr. Huber maestro investigador de tiempo completo del Departamento de Ingeniería de la DICIFO en la UACH por el otorgamiento de las imágenes Landsat TM+ de 2003.

A la Lic. Cleotilde Arellano Directora de Geomática de la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) por el otorgamiento de las imágenes de Satélite Landsat TM de 1985.

Al Ing. Rolando Galan Larrea por su colaboración, apoyo moral y económico, sugerencias, así como por estar siempre dispuesto en todo lo que se necesitó en la realización del presente trabajo.

A la Ing. y amiga Yanette Viviana por sus valiosos conocimientos y tiempo dedicado en la realización de este trabajo.

Al Ing. y amigo Alejandro por el otorgamiento del material cartográfico de uso y vegetación, edafológico y de municipios el estado de Hidalgo

A mis compañeros de generación por el compañerismo y la amistad que hizo más agradable la estancia.

A todos ellos, infinitamente GRACIAS.

DEDICATORIA

A mi amado esposo Rolando por ser el complemento que el señor dio a mi vida y con ello la hizo completa, con todo lo que eres y representas no me falta nada, gracias amor.

A nuestro hijo Rolando, pequeña manifestación de la inmensa gloria de Dios, gracias por que con tu llegada nuestra vida se llenó de crecientes bendiciones.

A mis padres, una vez más quiero decirles lo agradecida que estoy con Dios por tener unos padres con el espíritu de lucha que ustedes poseen, Dios los bendiga y los guarde con larga vida.

A mis hermanos: Santiago, gracias hermano por el apoyo y el ejemplo de entusiasmo con el que haces las cosas. Mauricio y Luís Alberto, sigan adelante el camino que hay que recorrer tiene promesas para ustedes.

A mis amigos

Familia Moreno López, gracias por todo el apoyo y el cariño que hemos recibido de ustedes. Especialmente a la señora Silvana y señor Luís por acogernos como parte de su familia.

Y a todos aquellos que considero parte de mi vida que en determinado momento contribuyen con su granito de arena a la felicidad que vivo, muchísimas GRACIAS.

GRICELDA

BIOGRAFÍA DE LA AUTORA

La autora es originaria del municipio de Chilcuautla en el Estado de Hidalgo, nació el 7 de abril de 1977. Cursó su educación básica en el municipio del mismo nombre, la educación media y superior en la Preparatoria Agrícola y en el Departamento de Ciencias Forestales respectivamente de la Universidad Autónoma Chapingo en donde se tituló con la tesis “Estudio integral del Valle de Tehuacan, Puebla-Cuicatlan Oaxaca” el 1 de febrero de 2000. Laboró en la antes Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (INE) de marzo de 2000 a Julio de 2002 en donde desempeñó actividades de evaluación de impacto ambiental en proyectos relacionados con los recursos forestales y cambio de uso del suelo de la zona pacífico sur-sureste integrada por los estados de Michoacán, Puebla, Oaxaca, Guerrero y Chiapas. Posteriormente participó en la asesoría y elaboración de proyectos relacionados con el impacto ambiental de cambio de uso de suelo en la Región Tulancingo del Estado de Hidalgo. Ingresó a cursar una maestría en la División de Ciencias Forestales en agosto de 2003 finalizando sus créditos en diciembre de 2005.

CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivos	3
2.1.1. Objetivo general.....	3
2.1.2. Objetivo específico.....	3
2.2. Hipótesis	3
2.2.1. Hipótesis nula.....	3
2.2.2. Hipótesis alternativa.....	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Cambio de uso del suelo y su dinámica	4
3.2. Aplicación de los sensores remotos en el cambio de uso del suelo	6
3.3. Relación precipitación-escurrimientos superficiales	10
3.3.1. Factores que afectan el escurrimiento superficial	11
3.4. Efecto de los escurrimientos ante un cambio de uso del suelo	13
IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA	23
4.1. Material satelitario, cartográfico y equipo	23
4.2. Metodología	26
4.2.1. Descripción del área de estudio	26
4.2.1.1. Localización	26
4.2.1.2. Límites y vecindades	28
4.2.1.3. División política y sus accesos	29
4.2.1.4. Características del medio físico	30
4.2.2. Dinámica del cambio de uso del suelo	51

4.2.2.1. Pretratamiento de imágenes de satélite.....	51
4.2.2.2. Clasificación supervisada de imágenes.....	54
4.2.2.3. Valoración de la exactitud de la clasificación	56
4.2.2.4. Evaluación de cambios de uso del suelo	61
4.2.2.5. Predicción de cambios de uso del suelo	62
4.2.2.6. Estimación de superficies potenciales a deforestarse	68
4.2.3. Escurrimientos superficiales	69
4.2.3.1. Ajuste de datos de precipitación	69
4.2.3.2. Métodos de medición de escurrimientos	72
4.2.3.3. Parámetros físicos de la microcuenca	75
4.2.3.4. Número de curva (NC) de escurrimiento del SCS.....	76
4.2.3.5. Tormenta diseño	89
4.2.3.6. El método para estimar los escurrimientos	92
4.2.3.7. El modelo de escurrimientos de este trabajo	93
4.2.3.8. Modelación de escurrimientos con el Sistema de Modelación Hidrológica	101
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
5.1. Pretratamiento de imágenes de satélite.....	107
5.2. Clasificación supervisada de imágenes.....	109
5.3. Validación de la clasificación	118
5.4. Evaluación de cambios de uso del suelo	119
5.4.1. Tasas de cambio de uso del suelo.....	121
5.5. Predicción de cambios de uso del suelo y su tasa de cambio.....	123
5.6. Superficies potenciales a deforestarse.....	128
5.7. Estimación de escurrimientos.....	128
5.7.1. Estimación de escurrimientos, escenario 1985.....	129
5.7.2. Estimación de escurrimientos, escenario 2003.....	129
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
6.1. Conclusiones.....	137
6.2. Recomendaciones.....	138

INDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Pág.
1. Datos de pérdida anual de la superficie forestal en México	6
2. Características del material satelitario.....	24
3. Cartografía utilizada.....	24
4. Estaciones climáticas utilizadas.....	25
5. Municipios que integran el área de estudio.....	30
6. Usos del suelo y vegetación en el área de estudio.....	31
7. Superficies, textura y porcentaje que ocupan las unidades de suelo....	44
8. Cuerpos de agua con capacidad igual o mayor a 0.5 Mm ³	46
9. Coordenadas extremas del área de estudio	52
10. Clases de uso y cobertura del suelo identificadas.....	55
11. Números de puntos muestreados.....	58
12. Tipos de uso del suelo y vegetación de la fuente de referencia (Carta de uso del suelo y vegetación. INEGI (1985).....	58
13. Agregación de clases.....	59
14. Matriz de confusión de la clasificación de 1985.....	60
15. Matriz de confusión de la clasificación de 2000.....	60
16. Matriz de confusión de la clasificación de 2003.....	61
17. Mapas de criterios	66
18. Capas vectoriales, cartas F 14-11 y E 14-02.....	67
19. Tabla de valores para muestras relativamente pequeñas.....	70
20. Número de años con registro de cada estación.....	71
21. Altura de precipitación ajustada.....	71
22. Pendiente de las áreas de influencia o polígonos de Thiessen.....	74
23. Superficies de áreas de influencia.....	75
24. Pendiente media y longitud del cauce principal	76
25. Características de los grupos de suelo del SCS.....	77

26.	Números de curva del SCS	79
27.	Número de curva para cada uso y cobertura de suelo, 1985.....	83
28.	Número de curva para cada uso y cobertura de suelo, 2003.....	86
29.	Distribución de lluvia del SCS	90
30.	Hietograma de precipitación y curva masa.....	91
31.	Parámetros para la deducción del hidrograma unitario sintético tipo triangular.....	98
32.	Parámetros del Hidrograma unitario triangular, escenario 1985 y 2003.....	99
33.	Parámetros de alimentación de los cauces	101
34.	Parámetros de alimentación de las subáreas, escenario de 1985 y 2003.....	103
35.	Estadísticas de la imagen de referencia.....	107
36.	Estadísticas de la imagen de 2000 a corregir	107
37.	Estadísticas de la imagen de 2003 a corregir	108
38.	Estadísticas de las imágenes corregidas.....	108
39.	Clases de uso del suelo identificadas	109
40.	Superficies en ha. de uso y cobertura de suelo en los tres Escenarios y el porcentaje que representan.....	112
41.	Índice de Kappa General obtenido.....	119
42.	Matrices de cambio superficies ha. en los tres escenarios.....	120
43.	Tasas de cambio de uso del suelo	122
44.	Matriz de probabilidades de transición.....	124
45.	Matriz de áreas de transición en ha.....	124
46.	Predicción de cambios de uso del suelo al 2015 en ha.....	125
47.	Tasa de cambio de uso y cobertura del suelo entre 2003 y 2015.....	128
48.	Escurrimientos totales gasto pico y pérdidas de una precipitación total de 114.92 mm. de Tr 85 años, escenario 1985.....	129
49.	Escurrimientos en el cauce, escenario, 1985.....	129
50.	Escurrimientos en la intercepción del Río San Lorenzo y Santa María	

	y salida de la microcuenca, escenario 1985.....	129
51.	Escurremientos totales gasto pico y pérdidas de una precipitación total de 114.92 mm. de Tr 85 años, escenario 2003.....	129
52.	Escurremientos en el cauce, escenario 2003.....	130
53.	Escurremientos en la intercepción del Río San Lorenzo y Santa María y salida de la microcuenca, escenario 2003.....	130
54.	Escurremientos en relación a las superficies de dos de los escenarios evaluados.....	133

INDICE DE FIGURAS

Figura No.		Pág.
1	Efecto de la urbanización en el hidrograma unitario de escurrimientos.....	16
2.	Comparación del escurrimiento acumulado con dos manejos de residuos en 1997.....	17
3.	Localización del área de estudio.....	27
4.	Ubicación hidrológica del área de estudio.....	28
5.	Ubicación del área de estudio con respecto a sus vecindades.....	29
6.	Municipios que integran la microcuenca.....	30
7.	Uso del suelo y vegetación.....	36
8.	Unidades y subunidades de suelo.....	42
9.	Clases texturales de las unidades de suelo.....	43
10.	Tipos de clima.....	45
11.	Hidrología superficial.....	47
12.	Coeficientes de escurrimientos.....	48
13.	Permeabilidad de suelos.....	50
14.	Recorte de la imagen LANDSAT TM del año 1985.....	53
15.	Modelo digital de elevación.....	53
16.	Composiciones de color para las imágenes TM 1985, ETM+ 2000 y 2003.....	54
17.	Áreas de influencia mediante Polígonos de Thiessen.....	74
18.	Distribución espacial de lluvia de 24 h. del SCS.....	91
19.	Hidrograma unitario sintético (forma triangular) del SCS.....	97
20	Hidrograma unitario sintético (forma adimensional).....	97

21.	Distribución de las áreas de influencia y cauces en el modelo de cuenca.....	102
22.	Presentación del modelo de la microcuenca con relieve.....	104
23.	Modelo meteorológico.....	105
24.	Especificaciones de control.....	106
25.	Firmas espectrales de los campos de entrenamiento de 1985.....	110
26.	Firmas espectrales de los campos de entrenamiento de 2000.....	111
27.	Firmas espectrales de los campos de entrenamiento de 2003.....	111
28.	Unidades de uso y cobertura del suelo de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, 1985.....	114
29.	Unidades de uso y cobertura del suelo de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, 2000.....	115
30.	Unidades de uso y cobertura del suelo de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, 2003.....	116
31.	Proyección del uso y cobertura del suelo al 2015.....	127
32.	Hidrograma unitario de escurrimiento del área de influencia de la estación Esperanza.....	134
33.	Hidrograma unitario de escurrimiento del área de influencia de la estación San Lorenzo.....	134
34.	Hidrograma unitario de escurrimiento en la zona inundable.....	135
35.	Hidrograma unitario de escurrimiento a la salida de microcuenca.....	136

**DINAMICA DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU EFECTO EN LOS
ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHICO
TULANCINGO, HIDALGO.**

RESUMEN

El presente estudio es una contribución al conocimiento de las estimaciones del cambio de uso del suelo y su efecto en los escurrimientos superficiales de la microcuenca del Río Chico Tulancingo debido a que es una zona donde se concentra el segundo asentamiento más grande del estado de Hidalgo y cuyo efecto se aprecia en la demanda por mas y mejores espacios para vivir, alimentos y servicios, el cambio repercute en la dinámica de los escurrimientos provocando inundaciones. La determinación del cambio de uso de suelo se basó en técnicas de percepción remota usando imágenes de satélite Landsat TM y ETM+ de tres fechas; 1985, 2000 y 2003, los escurrimientos se estimaron mediante modelación de un evento de lluvia máximo medio de 24 h. en HEC-HMS.

Se encontró que el cambio de uso de suelo más significativo se está dando sobre las áreas forestales hacia áreas agrícolas de temporal y de agrícola temporal hacia áreas urbanas. La tasa de cambio calculada fue negativa de 2.35% de forestal hacia otros usos, es decir, 12.70% de la superficie calculada inicialmente. Este cambio repercutió en la dinámica de los escurrimientos superficiales encontrándose que hubo un aumento entre 1985 y 2003 del 45% en los escurrimientos totales.

Palabras clave: Cambio de uso del suelo, tasa de cambio, efecto en los escurrimientos superficiales.

**THE DYNAMICS OF CHANGE IN SOIL USE AND ITS EFFECT ON SUPERFICIAL
RUNOFF IN THE MICROBASIN OF THE CHICO TULANCINGO RIVER IN
HIDALGO, STATE.**

ABSTRACT

The present study provides estimates about the change of soil use and its effect on the superficial runoff in the Chico Tulancingo River microbasin. The fact that this microbasin is the second most populated area of Hidalgo and that the people who live there want more and better land where they can live, establish a better infrastructure and cultivate their crops, produces changes in the use of the soil and creates runoffs that turn into floods. The determination of the degree of change in soil use was based on remote perception techniques using Landsat Tem and ETM+ satellite images from three years: 1985, 2000 and 200. The runoff was estimated by modeling a 24 hour maximum average rain storm in HEC-HMS.

It was found that the most significant change in the use of the soil has been taking place in areas where forest are being replaced by seasonal agriculture and where agricultural areas are becoming urbanized. The calculated rate of change from forests to other uses was -2.35%, which represents 12.70% of the surface that was initially calculated. This change has had repercussions in the dynamics of the superficial runoff, a conclusion that is supported by the fact that there was a 45% increase in the volume of water from the total runoff between 1985 and 2003.

Key words: Change in soil use, rate of change, effect in the superficial runoff.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la dinámica del espacio a través del tiempo permite observar los cambios que se están dando sobre los tipos de cubierta del territorio. México es un país con graves problemas de ordenación de tierras y carece de información detallada a nivel regional y municipal para elaborar planes referentes a la ordenación del espacio territorial, es por ello que la expansión poblacional y agrícola sin ninguna regulación representa un serio problema en la actualidad.

Se han señalado diferentes procesos como responsables del cambio de uso del suelo. Los modelos más simplistas indican que el crecimiento poblacional es la causa del incremento de la superficie cultivada o destinada al ganado, puesto que es necesario alimentar cada vez a mayor número de población. Vale la pena analizar los efectos del crecimiento de la llamada "frontera agropecuaria" y las ciudades en los procesos de cambio del uso del suelo sobre superficies que sustentaron vegetación forestal en alguna etapa sucesional puesto que son los usos que están ganando espacios a la cubierta vegetal.

Sin embargo, se dice que el cambio de uso del suelo a lo largo del transcurso del tiempo es una consecuencia de la evolución del territorio desde el punto de vista natural y de los procesos, producto de las necesidades antrópicas de tipo social, económico y político.

El cambio de uso del suelo tiene repercusiones en el medio que rodea a los espacios que están sometidos a presión de cambio, produciendo algún tipo de impacto, severo o menos severo en elementos climáticos, fisiográficos, topográficos, etc. En el presente trabajo se evaluó el cambio de uso del suelo y su efecto en los escurrimientos superficiales de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, estos últimos como resultado del proceso de lluvia a escurrimiento donde la lluvia es parte de los factores climáticos y el uso y cobertura del suelo son parte de los factores fisiográficos que influyen en el agua que escurre.

En el estado de Hidalgo donde se localiza la zona de estudio se concentra el segundo asentamiento humano más importante, la ciudad de Tulancingo y sus municipios aledaños (Cuautepec de Hinojosa y Santiago Tulantepec) están sufriendo cambios demográficos notables, lo que ha tenido efectos en la dinámica de los escurrimientos pluviales derivando en problemas de inundaciones como la sucedida en la ciudad de Tulancingo en octubre de 1999 por lo que año con año protección civil trabaja en la planeación de programas de contingencias en periodos pico de lluvia en zonas críticas tales como las colonias Jardines del Sur, la Guadalupe, ubicación de puentes y remansos donde puede haber concentración de asolves.

La metodología para lograr los objetivos se integró en dos fases, en la primera se determinó la dinámica del cambio de uso del suelo mediante técnicas de percepción remota entre tres escenarios encontrados en imágenes de satélite, 1985-2000 y 2000-2003, 1985-2003 y un escenario proyectado de 2003 a 2015 con modelación de procesos de Markov, en la segunda fase se modelaron los escurrimientos en dos de los escenarios mapeados 1985 y 2003 con un sistema de modelación hidrológica (HEC-HMS) para evaluar el comportamiento de los escurrimientos ante la modificación en las superficies de uso del suelo.

El conocimiento de la velocidad de los cambios en el uso y la cobertura del suelo así como sus repercusiones en el sistema pluvial dará la pauta para definir estrategias y acciones para moderarlos o disminuirlos mediante un programa de manejo integrado de la microcuenca.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivos:

2.1.1. Objetivo general

- Analizar la dinámica de cambio de uso de suelo en la microcuenca del Río Chico Tulancingo, Hgo con la finalidad de evaluar su efecto en los escurrimientos generados por las precipitaciones máximas de 24 horas.

2.1 2. Objetivos específicos

- Determinar la dinámica del cambio de uso del suelo para calcular su tasa de cambio entre los periodos de evaluación 1985-2000, 2000-2003, 1985-2003 y una proyección hacia el 2015.
- Estimar el efecto del cambio de uso del suelo en los escurrimientos de la microcuenca hidrográfica en el escenario de 1985 y 2003.

2.2. Hipótesis

2.2.1. Hipótesis nula (Ho):

- A partir del análisis de cambio de uso del suelo se puede contribuir al conocimiento de la tasa de cambio y predecir su estado en un futuro cercano.
- El cambio de uso de suelo de forestal a otro uso tiene repercusiones en la dinámica de los escurrimientos superficiales de la microcuenca.

2.2.2 Hipótesis alternativa (Ha):

- El análisis de cambio de uso del suelo no tiene ninguna repercusión en los escurrimientos de la microcuenca en el tiempo actual ni en el futuro.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Cambio de uso del suelo y su dinámica

Con la finalidad de lograr un mejor entendimiento de los conceptos centrales que se manejan en este trabajo es preciso establecer las definiciones siguientes. Se denomina cambio de uso de suelo a los cambios constantes que sufre la superficie terrestre, debido principalmente a la apertura de nuevas tierras agrícolas, desmontes, asentamientos humanos, industrias, construcción de aeropuertos y carreteras, entre otras (Soria *et al.*, 1998).

Es importante establecer la diferencia entre los cambios de uso del suelo y los cambios de cobertura del mismo, el primero se refiere a las actividades que se desarrollan en el suelo y el segundo se refiere a las construcciones artificiales o la vegetación que cubre la superficie del suelo, (Johnnsen, 1982).

Los cambios en la cobertura del suelo son de dos tipos: conversión y modificación, la conversión es el cambio de un tipo de cobertura a otro y la modificación implica alteraciones en la estructura o función sin mayor cambio de un tipo a otro, por ejemplo cambios en la productividad de la biomasa. Los cambios en la cobertura del suelo son el resultado de los procesos naturales tales como las variaciones climáticas, erupciones volcánicas, cambios en la ribera de los cauces o el nivel del mar etc. Sin embargo la mayoría de los cambios del presente y del pasado reciente se deben a las acciones humanas.

Por el contrario los cambios de uso del suelo son producidos por la intervención del hombre modificando la intensidad de uso y mezclando un uso con otro en el mismo suelo (Briassoulis, 2002).

Por tanto la dinámica de cambio de uso del suelo es el movimiento de los usos y cobertura del suelo a lo largo del tiempo.

La importancia de este tipo de estudios radica en la relevancia que tienen como herramienta en las tareas del ordenamiento, planeación y ocupación del territorio, es por eso uno de los temas de mayor interés en las disciplinas ambientales.

La acelerada pérdida de bosques desde los albores de la humanidad al presente van desde un tercio de su extensión hasta casi la mitad. Este proceso se agudizó durante los últimos dos siglos al cuadruplicarse la población y desaparecer más superficie forestal que durante toda la historia del hombre en la tierra. Actualmente se estima que un tercio de la superficie terrestre continental (3.54 mil millones de ha.) aún se encuentra bajo cubierta forestal. La proporción bosque/población sin embargo, ha venido disminuyendo de 1.2 ha. per cápita en 1960 a 0.6 ha per cápita en 1995. Esta desmesurada pérdida de la cubierta vegetal lleva consigo el exterminio del bagaje genético inherente a los ecosistemas autóctonos y el potencial de uso de todos los bienes y servicios ambientales que estos proveen para el bienestar humano, (Noble y Dirso 1997), (Grandner-Outlaw y Engelman, 1999) citados por Velázquez, 2002.

En México la situación es todavía más severa. La media mundial describe que México debería tener alrededor del 0.7 ha. per cápita para la presente década. Los datos actuales no obstante indican que el país alberga tan solo un 0.5 ha. de cubierta forestal per cápita y de la predicción para el 2025 será de un 0.3 ha per cápita es decir por debajo de la media mundial (Masera, 1996; Velásquez, *et. al* 2001).

La deforestación es un tema ligado al cambio de uso del suelo. Se han realizado diversos estudios en México referentes a este tema, entre los más importantes se destacan los que se resumen en el Cuadro 1. Sin embargo, a nivel global y nacional la determinación de cifras confiables de deforestación y sus causas no es una tarea fácil, debido a problemas técnicos y de disponibilidad de recursos económicos, humanos y de equipo especializado para ello.

Cuadro 1. Datos de pérdida anual de la superficie forestal en México

Fuente	Superficie perdida (ha/año)
Grainger, 1984	1 600 000
Repetto, 1988	460 000
FAO, 1988	615 000
Myers, 1989	700 000
Castillo et. Al, 1989	746 000
Toledo, 1989	1 500 000
Masera et al., 1992	668 000
SARH, 1992	365 000
SARH, 1994	370 000
FAO, 1995	678 000
FAO, 1997	508 000
Lichtinger, 2001	1 200 000

Fuente: Velázquez, 2002.

Hasta 1998 las estimaciones realizadas en México habían sido de carácter subjetivo y carecían de un fundamento estadístico que les diera la confiabilidad necesaria tanto en estimaciones oficiales como de diferentes instituciones cuya variación entre ellas es considerable, lo que ha llevado a crear confusión y desconfianza sobre las estadísticas de deforestación, por lo que, la idea que prevalece indica la gran cantidad de inconsistencias entre las diversas estimaciones para la evaluación de las tasas de pérdida de la cubierta forestal ya que se han hecho infinidad de estudios parciales con objetivos particulares de interés a grupos políticos, instituciones usando metodologías y técnicas muchas veces inconsistentes (Velázquez, 2002).

Una de las herramientas que ha servido en la identificación de los cambios de uso del suelo y calcular las tasas de deforestación han sido los sensores remotos y los sistemas de información geográfica para la manipulación de la información.

3.2. Aplicación de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica en el cambio de uso del suelo.

Los sensores remotos se consideran la herramienta ideal para la generación de datos de grandes extensiones de terreno. Sin embargo en algunas ocasiones la complejidad del fenómeno de estudio demanda no solo la información obtenida de las imágenes, sino de su interrelación con información espacial de otras fuentes.

Los sensores remotos tienen la habilidad para detectar cambios en el uso del suelo y su cobertura con propósitos de planeación y manejo de recursos.

A partir de 1998 las instituciones oficiales se han preocupado por crear mayor certidumbre en los datos que a tasas de deforestación se refiere, en este año la entonces Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) encabezó un estudio de diagnóstico sobre el tema cuyo objetivo fue determinar con una confiabilidad estadística alta, la tasa de deforestación anual. Los resultados de este estudio fueron en términos generales, que la región sur es la que sufrió mayores cambios de 1970 a 1992, la variación en el cambio de uso del suelo por región en porcentajes fue de 11% para la región norte, 19% para la región centro y 27% para la región sur. El estudio se realizó mediante un proceso comparativo de datos cartográficos digitalizados entre Cartas de Uso del Suelo del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y Cartas Forestales del Inventario Nacional Forestal Periódico (INFP). El proceso de análisis espacial y estadístico se llevó a cabo con los programas Arc/Info y un programa estadístico (SAS) para computadora personal.

Pensando en la necesidad de mostrar datos más apegados a la realidad se instituyó un convenio entre el Instituto Nacional de Ecología (INE) y el Instituto de Geografía (IG) de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, con la finalidad evaluar y mejorar la calidad de las bases de datos de referencia del tema de suelo y vegetación (escala 1:250,000) disponible para México hasta hoy día, así como generar una estrategia de manejo de datos entre bases de datos para poder, así comparar estadística y cartográficamente dichas bases de datos y obtener estadísticas que describieran la dinámica de cambio de uso del suelo y finalmente establecieron los criterios para el análisis de la cubierta vegetal a mayores escalas de resolución. Por último el estudio exploró las variables sociales, económicas y demográficas que describieran los patrones de la dinámica del cambio.

La información que se utilizó fue la base de datos de INEGI serie I y serie II así como la del IFN por ser las más compatibles. Con ello se monitorearon los cambios de uso del suelo y se obtuvieron las estimaciones de la tasa de cambio sobre cada clase haciendo estadísticamente los datos resultantes más confiables.

Los resultados que se obtuvieron fueron listados de clases de vegetación por fecha y superficie. La verificación de los datos fue hecha con la ayuda de imágenes Landsat MSS para la fecha de 1993 y Landsat TM+ para el 2000, el estudio partió de los datos generados en los INF de 1994 y 2000 así como los datos de INEGI serie I.

Las tasas de deforestación encontradas en bosques fue de -1.53, los bosques secundarios, matorrales secundarios, pastizales naturales, cultivos y asentamientos humanos tuvieron una tasa de cambio positiva siendo bosques secundarios, asentamientos humanos y matorrales secundarios los que presentaron una tasa más elevada. La tasa de cambio anual total fue de 0.433 % con una pérdida anual de 545,000 ha. ($\pm 50,000$ ha.) en un periodo de 24 años (1976-2000)

Otro estudio que se realizó para observar la dinámica del cambio de uso del suelo fue el desarrollado por Rincón en 2003 en el que evaluó el cambio de uso del suelo en la Sierra de Oaxaca mediante técnicas geomáticas, utilizó imágenes de satélite landsat MSS de 1974, 1986 y landsat TM+ de 2000 evaluando el cambio de uso del suelo en áreas con manejo forestal y áreas sin manejo. El resultado de su investigación fue que la tasa de deforestación para áreas bajo manejo fue de 0.66 % y para el área sin manejo de 2.17 %, resultados que mostraron tasas apreciablemente menores a las calculadas por Dirzo y García, 1992, los cuales calcularon una tasa de deforestación global de 1.31 % y para el área de los Tuxtlás en Veracruz fue de 4.3%. Además, el mismo autor, usando los procedimientos de Markov y CA-Markov de Idrisi calculó una probabilidad de transición de 1974 a 2015 resultando que las tierras de uso forestal se agregaran al uso agrícola y pecuario y que la tendencia más marcada se dará en las tierras sin manejo forestal.

Así mismo, Jong *et al.* en 2001 realizaron un estudio de la dinámica de cambio de uso del suelo y emisiones de carbono en el trópico húmedo de México, específicamente en la selva Lacandona y el Ocote en el periodo que comprende entre 1970 y 2000, para evaluar los efectos de los incendios forestales de 1998 y las emisiones de bióxido netas relacionadas en los bosques y selvas. El análisis se basó en fotografías aéreas de 1972, imágenes Landsat MSS de 1984, Landsat TM de 1992, 1995 y 2000. Los resultados mostraron patrones de cambio de uso del suelo en 2 811 636 ha con énfasis de incendios forestales, los cambios se

asociaron a factores socioeconómicos de densidad poblacional y cercanía de caminos. Para llegar a los resultados citados en este estudio se realizó un análisis cartográfico de diversas escalas y con diversas fuentes de información, al programa que se utilizó para la constitución del sistema de información geográfica fue Erdas Imagine y Er-Mapper 6.2 para procesamiento de las imágenes de satélite e información en formato raster y Arc-Info para el procesamiento e integración de la información cartográfica.

Ordoñez *et al.* 1995 realizó un trabajo sobre la dinámica de cambio en la cobertura forestal y uso del suelo asociada a los almacenes y emisiones de carbono en Santiago Tingambarato, Michoacán en el periodo de 1974 a 1991. El estudio se inició a partir de la sobreposición de dos cartas dasocráticas mediante un sistema de información geográfica. Con la información se generaron 20 categorías de uso del suelo con las cuales se obtuvieron las matrices de transición para el periodo indicado. Los resultados fueron que en 17 años la comunidad sufrió una deforestación de 36% con una tasa anual de 2.1 %, así mismo la pérdida de la calidad de los bosques representan un 37 % y entre los cambios de uso del suelo que se dieron el principal es de bosque natural a plantaciones de aguacate (12.6%), agricultura de temporal (11.4%), vegetación arbustiva (6.6%) y a pastizales (5.5%).

Relacionado al cambio de uso del suelo Gonzáles *et al.* en 1995 realizó un trabajo titulado, Las Repercusiones Socioeconómicas de la Política Agraria en el Oriente del Estado de México: periodo 1998-1994 en el cual analiza a nivel regional el cambio de uso del suelo de agropecuario, forestal a urbano – industrial.

Un trabajo relacionado también con los procesos de cambio de uso del suelo es el que versa sobre el Impacto Ambiental en el Corredor Los Reyes Texcoco por Muro Bowling, P, (1996), en esta zona, entre otros problemas ambientales destacan la desaparición y degradación de los recursos naturales y a nivel general se menciona que la población de la cuenca del Valle de México sufre los efectos a través de: cambios climáticos que se expresan como aumentos de temperaturas, probable variabilidad de los volúmenes de precipitación pluvial, mayores niveles de contaminación atmosférica y abatimiento del acuífero de la Cuenca del Valle de México, los ríos que se encuentran en la zona han perdido cerca del 50% de su

caudal y bajan de las partes altas del oriente de este municipio contaminados por productos químicos y orgánicos en descomposición. Este hecho contribuye a la contaminación del acuífero, agravada por el abatimiento del mismo y por la intrusión salina proveniente del vaso del ex-lago de Texcoco. Todo lo anterior es consecuencia de la presión poblacional que deriva en cambios de uso del suelo hacia el rubro urbano.

Conforme a Zaldivar (1998) en México el crecimiento de la población es el principal factor de la mala distribución de los polos de desarrollo, de ahí que INEGI 1995 estimó que la población llegó a ser de 80 millones de habitantes y se pronostica que para el año de 2025 sumará 160 millones (SAGAR,1997). El aumento de la población y el déficit de alimentos, obligan a conocer los recursos naturales, a fin de planificar en forma adecuada el uso con miras a obtener incrementos en su producción.

Lo anterior indica que los cambios de uso del suelo responderían a la demanda por tierras agrícolas, demanda por áreas urbanas que sustenten a un mayor numero de población que requiere de mas alimentos y servicios, pasando por alto las repercusiones al ambiente, tales como alteraciones en el sistema de escurrimiento pluvial por sustitución de la cubierta vegetal, lo que ocasiona arrastre de sedimentos, bloqueo de conductos naturales de drenaje que puedan desencadenar en inundaciones urbanas.

3.3. Relación precipitación-escurrimientos superficiales

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca, (Aparicio, 2004).

Los escurrimientos denominados por debajo del suelo y sobre él, son los superficiales, subsuperficiales y los subterráneos, el mismo autor los define como:

El *escurrimiento subsuperficial* es la cantidad de precipitación que se infiltra y que se mueve a través del perfil del suelo más o menos paralelamente a la superficie y aparece mas tarde como manantiales o en canales.

El *escurrimiento subterráneo* se define como la circulación de las aguas subterráneas hacia las corrientes y cuerpos de agua a niveles inferiores al freático.

Los *escurrimientos superficiales* a diferencia de la escorrentía se refieren al efecto de escurrir agua por la superficie del suelo, este flujo junto con el escurrimiento de corrientes conforman el escurrimiento superficial y dependen de muchos factores. Dichos factores son de dos tipos; los climáticos y los fisiográficos.

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido a la salida de la cuenca, es por ello que está relacionado directamente con una tormenta en particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo, (Aparicio, 2004).

3.3.1. Factores que afectan el escurrimiento superficial

El escurrimiento es un proceso dependiente de los aspectos climáticos y fisiográficos de la cuenca.

Los factores climáticos son aquellos que determinan la cantidad de agua precipitada y consecuentemente la destinada al escurrimiento, ellos son la precipitación, dentro de la cual tiene importancia relevante la intensidad, la duración, el tiempo, el área de distribución, la frecuencia y la situación geográfica. Otros factores de esta índole son la nieve y la evapotranspiración.

Los factores fisiográficos o características de la cuenca están integrados por dos tipos: los geométricos y los físicos. Los primeros son: el área de la cuenca, la topografía, la pendiente, la forma de la cuenca, la red de drenaje, las pendientes de los cauces, así como la longitud de los mismos. Los factores físicos son la cubierta del suelo, el uso y tipo del suelo, las condiciones de infiltración superficial y las condiciones geológicas tales como: la permeabilidad, la capacidad de almacenamiento superficial, condiciones topográficas favorables para el almacenamiento como lagos y lagunas.

Los factores que se mencionaron producen diferentes comportamientos del escurrimiento dentro de una cuenca (Rodríguez, 1981).

Los factores climáticos y fisiográficos más importantes para explicar el escurrimiento son: la precipitación en forma de lluvia, granizo o nieve, así como el uso y cobertura del suelo, textura, topografía del terreno, pendiente y la geohidrología del sitio, siendo la precipitación la principal fuente mediante el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento. Debido a lo anterior es importante establecer la definición de los factores más importantes dentro de este estudio que influyen en el proceso.

La precipitación incluye a la lluvia, nieve u otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como el granizo o la nieve. La formación de la precipitación consiste en todo un proceso que inicia con la elevación de una masa de agua a la atmósfera la cual se condensa debido a las bajas temperaturas alrededor de núcleos que pueden ser partículas de polvo. Las pequeñas gotas de agua crecen con la condensación y el impacto entre las más cercanas a medida que se mueven por la turbulencia del aire hasta que son lo suficientemente grandes para que la fuerza de gravedad sobrepase la fuerza de fricción y empiecen a caer, a medida que empiezan a caer se vuelven más grandes, (Chow, *et al.* 1994).

La precipitación es el elemento climático más importante para el origen de las corrientes superficiales, puesto que básicamente de ellas depende su formación y cuantía, Barry y Chorley, 1987).

Como ya se mencionó anteriormente el uso y la cobertura del suelo son conceptos diferentes pero están fuertemente correlacionados, (Johnnesen, 1982). El suelo bajo algún uso o con cubierta vegetal produce diferente comportamiento en los escurrimientos debido a que el tipo de vegetación actúa como interceptora del agua en diferentes niveles y el uso urbano aumenta los escurrimientos en menor tiempo porque el suelo no presenta obstáculos al ocurrir un evento de precipitación.

La textura del suelo también juega un papel importante dentro del proceso de conversión de lluvia a escurrimiento. Se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla. Es una característica en extremo importante ya que afecta las

propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En términos generales el suelo se divide en textura, media y fina. En los suelos de textura fina predomina la arcilla y tienen mayor superficie activa que los suelos arenosos, poseen mayor capacidad de absorción de nutrientes y normalmente son más fértiles. Los suelos de textura media tienen igual proporción de arena y limo. Y los suelos de textura gruesa son los arenosos, los cuales son más porosos y permiten una rápida infiltración del agua aunque no de retención como los de textura fina. Los suelos arenosos contienen mayor cantidad de macroporos que funcionan en el movimiento del aire y del agua cuando esta está disponible (Ortíz, 1984).

Topografía del terreno define la posición y las formas circunstanciales del suelo, es decir, estudia en detalle la superficie terrestre y los procedimientos por los cuales se pueden representar todos los accidentes que en ella existen ya sea naturales o debidos a la mano del hombre. Ayuda a determinar los linderos de la propiedad, con sus divisiones interiores y diversos cultivos, las viviendas caminos y los ríos, puentes, montes valles, barrancos, bosques, etc. (García, M. 2003).

La pendiente dentro de los factores geométricos que influyen en el proceso de lluvia a escurrimientos, se refiere al grado de inclinación del terreno. En geometría se le define como el ángulo que forma un plano a línea con la horizontal. La pendiente es importante porque de ella depende la velocidad con la que corran los escurrimientos, entre mayor pendiente haya en un terreno mayor será la velocidad de viaje y viceversa,

La longitud del cauce principal se refiere a la extensión del cauce, es decir, desde que inicia en el parteaguas hasta la salida de la cuenca siempre en dirección descendente.

3.4. Efecto en los escurrimientos ante un cambio de uso del suelo.

El proceso de lluvia a escurrimientos está influenciado por varios factores. Uno de ellos es la cobertura vegetal y el uso del suelo, mismos que se catalogan dentro de los factores físicos de afectación.

Dentro del proceso de lluvia a escurrimiento ocurren varias etapas, primero, cuando sucede un evento de precipitación, las primeras gotas de lluvia son absorbidas por la superficie del suelo dependiendo de la condición de humedad antecedente de este y de las características texturales del mismo, si el suelo se encuentra completamente seco y además es de textura media a gruesa con alta capacidad de infiltración o muy permeable el escurrimiento tardará más tiempo en llegar a la salida de la cuenca ya que las primeras gotas de lluvia se quedarán atrapadas en la vegetación, posteriormente llegarán al suelo a saturar la capa superficial del mismo, se quedarán en pequeñas depresiones y después de ello es muy probable que empiece a escurrir. A este primer proceso se le llama pérdidas iniciales, por lo tanto la presencia de vegetación entre otros factores es un obstáculo en la cantidad y la velocidad del escurrimiento aguas abajo.

Los coeficientes de escurrimiento se han desarrollado con el propósito de representar la cantidad de agua que se escurre bajo condiciones de cobertura vegetal, tipo y textura de suelos.

Las áreas cubiertas con matorrales densos, prados y parcelas abandonadas generan poca escorrentía, en el caso de tierras sin cobertura la escorrentía es elevada, lo mismo ocurre con las zonas sujetas a un incendio en las primeras semanas sucede que la escorrentía es mayor pero a medida que la vegetación se va recuperando la situación cambia disminuyendo los escurrimientos.

En el caso de los escurrimientos en zonas de barbecho se pierden elevadas cantidades de suelo y agua debido a que el suelo se encuentra totalmente expuesto sin ninguna protección más aun, en zonas dispuestas en laderas o pendientes pronunciadas.

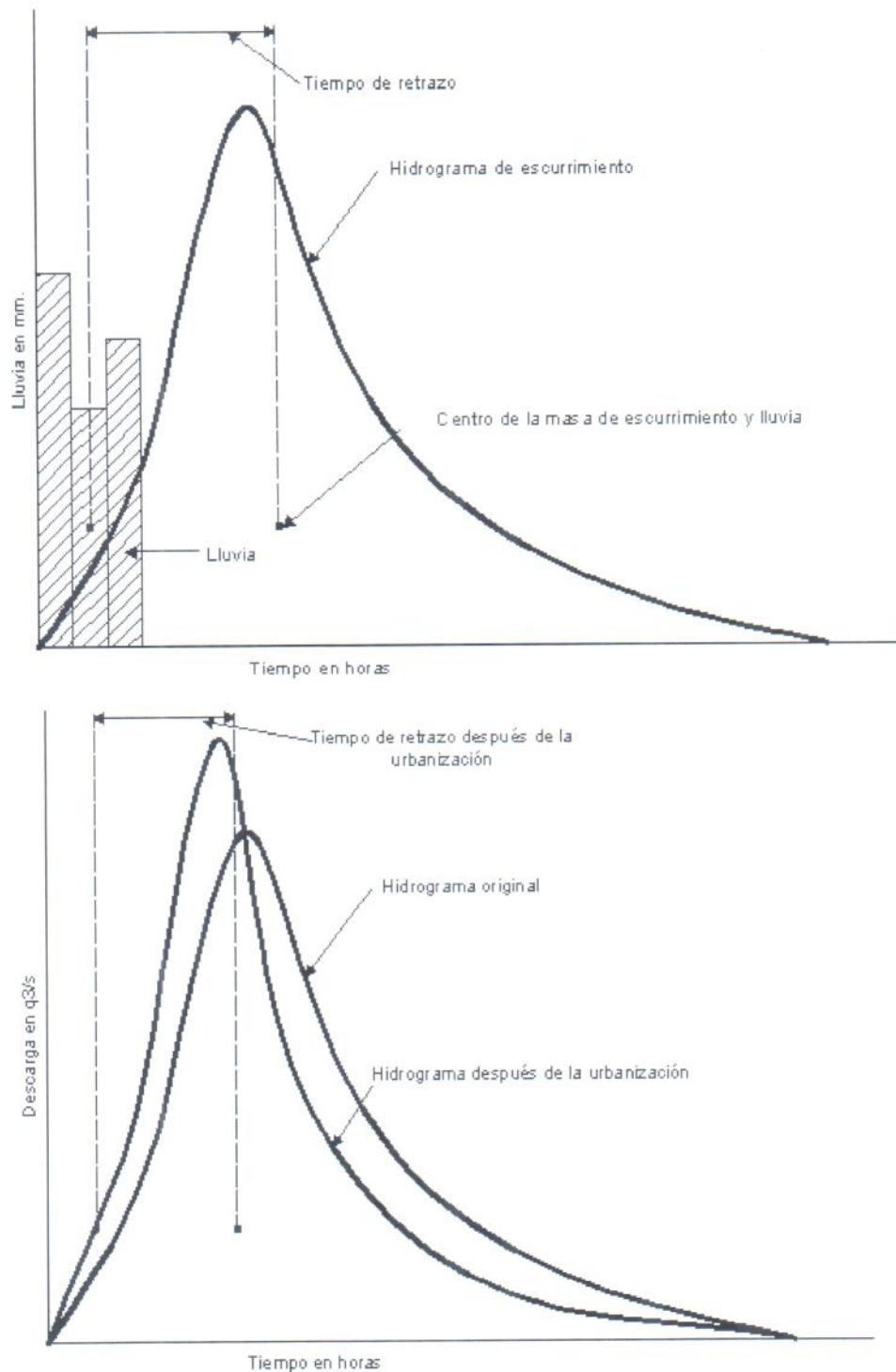
La observación de los números de curva generadas por el Servicio de Conservación de Suelos calculados para distintas condiciones de uso y cobertura del suelo proporcionan elementos de observación resultando que las áreas completamente urbanizadas tienen números de curvas más cercanos a 100 indicando que los escurrimientos son mayores, en contraste los suelos con

cobertura forestal tiene números de curvas más bajos lo cual indica que la proporción de escurrimientos es menor.

Bedient y Huber, 2002, hicieron un análisis del efecto de la urbanización en los escurrimientos. Estos se ven reflejados en que decrece el tiempo de retraso y la precipitación es convertida rápidamente en escurrimientos. Gráficamente se puede observar en la Figura 1 el comportamiento del volumen escurrido.

Los esquemas representan el efecto de la urbanización en el hidrograma de escurrimiento, antes de la urbanización y después de ella. Se hace evidente como un cambio de uso del suelo, en este caso a urbano aumenta la velocidad de los escurrimientos disminuyendo el tiempo de retraso, es decir, los escurrimientos se vuelven más fluidos y la descarga llega más rápido a la salida de la cuenca. Esta disminución del tiempo de retazo y del tiempo al pico origina que las avenidas sean más peligrosas para la población ubicada aguas abajo ya que disponen de menos tiempo para ponerse bajo resguardo.

El cambio de la cobertura del suelo tiene efectos en la dinámica de los escurrimientos, estos son mayores en zonas con poca o nula vegetación ya que en sitios donde hay presencia de vegetación el agua que precipita tiene mayor oportunidad de escurrir, lo que no ocurre en caso contrario; por ejemplo: un lugar con vegetación de bosque donde hay presencia de hojarasca en el suelo captará mayor cantidad de agua debido a que encontrará una capa permeable en la superficie. En estos casos no solo es importante el tipo de vegetación si no las características de la misma ya que suelos cubiertos por vegetación adulta tendrán mejor desarrollo radicular, mayor producción de hojarasca.



Fuente: Leopold, 1968 (citado por Bedient y Huber, 2002).

Figura 1. Efecto de la urbanización en el hidrograma de escurrimientos.

Un estudio realizado por Castillo, *et al.* 1990 muestra que la edad de la vegetación juega un papel importante en la retención de agua debido a que se han encontrado

relaciones entre la edad y la distancia de los árboles en la capacidad de retención de agua lo cual produce menores escurrimientos.

Es importante contar con información de esta naturaleza cuando se hacen estudios relacionados con los cambios de uso del suelo en cuencas donde hay presencia de vegetación forestal, ya que la presencia del arbolado incide en la pérdida de agua por evapotranspiración, reduce el escurrimiento superficial y promueve la infiltración, (Caballero, 1990)

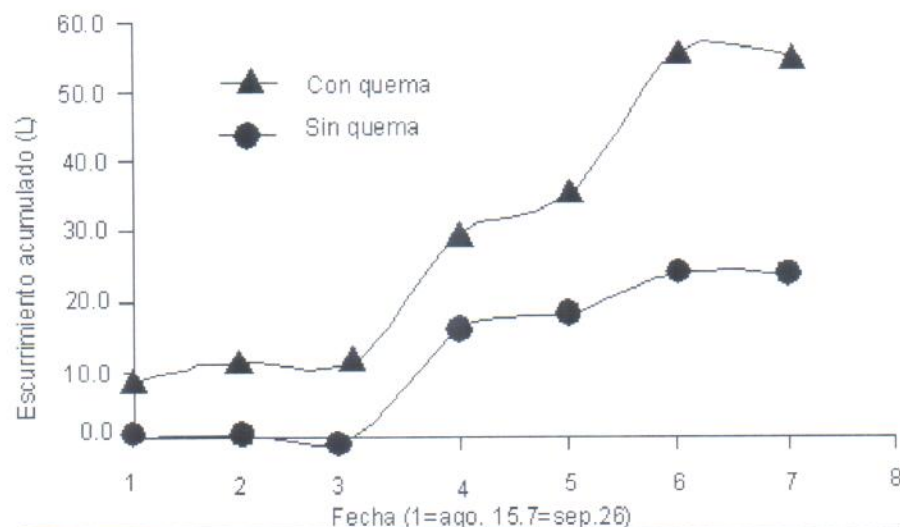
El cambio de uso de suelo de forestal a uso pecuario impacta significativamente en los escurrimientos superficiales ya que el sobrepastoreo compacta el piso forestal y reduce la protección que brinda la vegetación y con ello se reduce la infiltración y se promueve el escurrimiento superficial, (Caballero, 1990).

Diversos estudios realizados muestran que la tendencia del uso del suelo es a eliminar su cobertura original cambiando su vocación a un uso diferente como es el cambio de uso forestal a agrícola y posteriormente a otros usos cuando su potencial se ve disminuido. El cambio puede ser benéfico en algunos casos desde el punto de vista económico pero los costos ambientales son mayores ya que los cambios de uso del suelo a usos donde su coeficiente de escurrimiento aumenta, deriva en problemas de inundaciones de las partes bajas de la cuenca, por lo que se tiene que hacer planeación y construcción de obras que regulen las avenidas de agua las cuales implican gastos y riegos si se hace mala planeación y por tanto la elección errónea de decisiones.

En relación a lo anterior se han realizado diversos estudios que evidencian el efecto del cambio de uso del suelo en los escurrimientos.

Ruiz, V. J. y M. Bravo, 2001 realizaron un estudio con el propósito de modificar y reducir la velocidad del escurrimiento en ladera mediante la utilización de coberturas vegetales, se establecieron dos lotes de escurrimiento de 1.5 m². por parcela con quema y sin quema de residuos, el resultado fue que el área protegida tuvo mayor conservación de humedad respecto a la que no estuvo protegida, cuantitativamente el área quemada tuvo -5% menos de humedad que el área no

quemada. El volumen de los escurrimientos y la cantidad de sedimentos acumulados fueron mayores en el tratamiento con quema. El escurrimiento acumulado fue tres veces mayor en el tratamiento con quema y la pérdida de suelo fue tres veces mayor. La pérdida del suelo se midió mediante el método gravimétrico de una muestra de 5 litros del agua escurrida.



Fuente: Ruiz *et al.* 2001

Figura 2. Comparación del escurrimiento acumulado con dos manejos de residuos, en 1997.

La Figura 2 muestra que en el tratamiento con quema la curva tiene un comportamiento exponencial mientras que el otro tiene comportamiento lineal.

Lo anterior evidencia que cambiar el uso del suelo o sustituir su cobertura vegetal por un uso sin cobertura aunque sea temporal, produce mayor cantidad de escurrimientos y por ende erosión hídrica del suelo.

García, D. 2002, realizó un trabajo titulado lluvias máximas y escurrimientos superficiales en zonas tropicales con fines de drenaje superficial. Entre los objetivos que se plantearon estuvo el de calcular los escurrimientos superficiales en áreas con cultivos de chile, frijol, sorgo y pasto. Los escurrimientos superficiales estimados por el método del Servicio de Conservación de Suelos para áreas con peligro de inundación fueron para chile de 295.26 mm., para frijol de 153.52 mm, para sorgo 119.5 mm. y para pasto de 30.47mm.

Pérez, *et al.* 2004 realizaron un estudio en la zona tropical de Veracruz en la que se evaluaron sin repetición cinco sistemas agroforestales de café bajo sombra: 1) cultivo agroforestal tradicional, 2) policultivo tradicional mejorado con barreras vivas de palo de agua y terrazas individuales, 3) con cobertura de Canavalia, 4) con cobertura de cacahuatillo y 5) con barreras vivas de palma camedor. De ello se determinó el escurrimiento superficial, la pérdida de suelo y de nutrimentos y se relacionaron con índices de erosividad de lluvia y de escurrimiento superficial, durante 2000 y 2001. Los resultados fueron que de 132 a 178 eventos de lluvia anuales solo 32 a 36 % fueron erosivos y 29 a 38% produjeron escurrimiento superficial originando bajos coeficientes de escurrimiento (de 0.8 a 14%). Por lo que se observaron coeficiente bajos debido a la presencia de vegetación. En los sistemas agroforestales bajo sombra el escurrimiento superficial depende más de la cantidad que de la intensidad de la lluvia debido a que la duración de una tormenta entre más larga sea tiene mas posibilidades de penetrar en una cobertura cerrada que una tormenta que puede llegar a ser intensa pero de corta duración por lo que la primera tiene posibilidades de producir escurrimientos.

Martínez, *et al.* 2001 dentro del Programa de Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) realizaron un estudio en tres regiones de Oaxaca (Mazateca, Cuicateca y Mixe) para estimar el impacto de algunas actividades del hombre sobre los sistemas naturales, en el que se incluyó el componente de "Zonificación Geográfica y Medición de Escurrimientos".

Los objetivos primordiales del estudio fueron medir las pérdidas de suelo y de carbono en diferentes sistemas de cultivo y de vegetación natural, además de obtener información geográfica, topográfica, de uso de suelo, tipo de vegetación y cambios de uso de suelo, así como evaluar y simular el modelo de simulación hidrológica Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB) para determinar el impacto del cambio de uso del suelo en la producción de agua y sedimentos.

Se establecieron 18 lotes de escurrimiento distribuidos en las tres microcuencas, los lotes abarcaron todos los usos de suelo. De la investigación resultó que los escurrimientos variaron anualmente en cada lote de escurrimiento reportándose los mayores valores en el área de pastizales (entre 20 y 50 mm. anuales) y en el resto

de los usos del suelo los escurrimientos fueron menores de 20 mm. anuales en los cuatro años de observación

En la región Cuicateca, los máximos escurrimientos se presentaron en el 2002 en el maíz tradicional y en el nogal (menos de 35 mm. anuales). En la zona de pastizales, los escurrimientos fueron menores de 20 mm. anuales pero superiores a los que se presentaron en los otros usos del suelo en el 2000, pero en el 2001 los mayores escurrimientos se presentaron en el lote de nogal. El lote de escurrimiento Maíz-Durazno de la parte alta (Maíz D (A)) reportó los menores escurrimientos en los tres años de observación.

En la región Mixe, el Acahual fue el uso del suelo que reportó los menores escurrimientos (menos de 10 mm anuales) en los cuatro años de observación. En el 2001, los mayores escurrimientos (10 mm.) se presentaron en el cultivo de café y los mínimos en el sistema de Maíz – Café.

En la modelación de la producción de sedimentos y escurrimientos resultó una sobreestimación de ambos por lo que en modelaciones sucesivas es necesario hacer una calibración del modelo de predicción a nivel de cuenca.

Hundecha y Bárdossy, 2003. fueron los responsables de encabezar un megaproyecto de modelación de los efectos del cambio de uso del suelo en la generación de escurrimientos de la cuenca del Río Ridhe en Germania a través de regionalización de parámetros de un modelo de cuenca, en el estudio se evaluó el uso de suelo actual, uso de suelo urbano proyectado a el doble del actual y un uso de suelo con reforestación, además se hizo una proyección al 2010 para evaluar el impacto de la tendencia del uso de suelo actual de urbanización en situaciones de inundación futura. Se utilizó una versión modificada del modelo conceptual semi-distribuido HBV originalmente desarrollado por el Instituto de Hidrología y Meteorología Sueco y usado por primera vez en 1995, modificado a través de un sistema de codificación en lenguaje Fortran por el Instituto de Ingeniería Hidraulica en la Universidad de Stuttgart (IWS) por lo que este modelo es referido como HBV-IWS. Los resultados se expresaron como la suma normalizada de las diferencias de cuadrados entre el escurrimiento observado y el modelado. Se encontró que la expansión en la urbanización tiene un efecto considerable en el flujo pico o gasto pico, aunque durante el verano en las áreas agrícolas hay pérdidas por

evapotranspiración potencial debido a que tienen vegetación, además los suelos están secos por las altas temperaturas y son más susceptibles a pérdidas por infiltración.

En concreto un área de drenaje de 12,665 km² donde el área urbana ocupa 15 % incrementa 2.9 % el gasto pico en el periodo de 1983 a 1995, en cambio en el escenario completamente forestado se encontró una considerable reducción en el gasto pico debido a la presencia de la vegetación incrementa la proporción de infiltración y disminuye los escurrimientos aumentando los escurrimientos subsuperficiales.

Croke, *et al.* 2004. observaron la respuesta hidrológica debida al cambio de uso del suelo en cuencas instrumentadas y no instrumentadas en el norte de Tailandia para lo que se utilizó una combinación de modelos IHACRES y CATCHCROP, el primero es un modelo de lluvia-escurrimiento para predecir los efectos del cambio de uso del suelo en la respuesta hidrológica y el segundo para capturar los efectos del uso del suelo en la infiltración y escurrimiento. Las variables que se utilizaron fueron; precipitación mensual, temperatura, índice de humedad del suelo, precipitación efectiva y gastos a la salida del cause. Los resultados modelados en 12 escenarios en un periodo de 1985 a 1993 mostraron que la disminución de la cobertura vegetal incrementa la estimación de los escurrimientos superficiales y viceversa, la profundidad de drenaje o escurrimientos subsuperficiales disminuyen a medida que es reemplazada la cubierta forestal y el flujo de escurrimiento es mas rápido, por el contrario en la medida en que los escurrimientos son más lentos por la protección del suelo con cobertura forestal la cantidad de agua que se infiltra es mayor. Los escurrimientos no solo se pueden medir en lámina de lluvia sino también en volumen descargado en m³/s. o cm³/s.

Martínez, G. Realizó un trabajo de estimación de escurrimientos en la región de los Cabos, B.C.S. con una superficie de 35.1 km² usando herramientas de percepción remota, sistemas de información geográfica y el modelo hidrológico HEC-HMS motivado por que la península de Baja California experimenta eventos de inundación después de las lluvias extremas. Los datos que se emplearon en la modelación fueron precipitación máxima de 24 horas, factores de pérdida de lluvia, parámetros geomorfológicos, elementos geométricos de los canales e hidrogramas

sintéticos. Debido a la ausencia de pluviógrafos en la zona de estudio se utilizó una distribución de tormenta tipo III, además de un juego de imágenes Landsat TM 5 para definir las clases de uso y cubierta del terreno mismos que fueron empleadas para definir los números de curva de escurrimientos para el modelo. Las estimaciones de las descargas pico para las distribuciones de lluvia sintética mostraron que los escurrimientos extremos ocurrieron cuando la precipitación estuvo concentrada en ciertos intervalos de tiempo. Una distribución de precipitación de 12 mm. en 10 horas dio una descarga de 224.3 m³/s. y así los hidrogramas generados para cada una de las subcuencas alcanzaron el pico de descarga a diferentes tiempo. La mayor descarga fue de 349 m³/s con una altura de precipitación de 89 mm./h. en 24 horas.

Sánchez *et al.* Desarrollaron un estudio referente al efecto del cambio de uso del suelo en el escurrimiento de la subcuenca 24BF "Monterrey", aplicando un SIG debido a que se han presentado huracanes en el estado de Nuevo León, específicamente en la cd. de Monterrey causando avenidas repentinas del río Santa Catarina por lo que se consideró importante predecir las avenidas de agua causada por las lluvias mediante la construcción de un modelo hidrológico. El periodo que se avaluó fue de 1975 a 1995 tiempo en el que ha aumentado la descarga en un 10% hasta 524m³/s en 20 años. La vegetación en este lapso de tiempo cambio debido a las diferentes fuentes de disturbio (Incendios, tala inmoderada, agricultura, ganadería, entre otros). Por lo tanto se concluyó que los cambios están causando aumento en los escurrimientos que provocan la erosión de la superficie del suelo y el acarreo de sedimentos.

IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. Material satelitario, cartográfico y equipo

El material que se utilizó en la evaluación del cambio de uso del suelo, consistió en 3 imágenes de satélite Landsat 5 y 7 con los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper (ETM+) respectivamente de diferentes fechas; TM del 31 de enero de 1985, ETM+ del 21 de marzo de 2000 y ETM+ del 8 de enero de 2003.

La imagen de 1985 fue proporcionada por la Dirección de Geomática de la SEMARNAT que a su vez se adquirieron a través de una donación de la NASA con el propósito de utilizarlas para monitorear los cambios ambientales en los últimos 30 años y proporcionar herramientas a los decididores, ayudando al control de la tala inmoderada, conservación de los bosques en peligro y promover el crecimiento económico sostenible. Las imágenes están disponibles de manera gratuita en el sitio www.landcover.org. Estas se encontraban corregidas geométrica y radiométricamente en formato GEOTIF que es un formato derivado del formato Tag Image File Format (TIFF) mismo que tiene aplicaciones entre publicistas y diseñadores (Rincón, 2003).

Las imágenes de las fechas posteriores fueron obtenidas en el Departamento de Ingeniería de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, dicho material al igual que el anterior se encontraba corregido geométrica y radiométricamente.

En el Cuadro 2 se muestran las características de material satelitario que se utilizó y en el Cuadro 3 la relación de la cartografía empleada, así mismo, las ortofotos digitales que sirvieron de apoyo en la identificación visual de los objetos de una porción del área de estudio fueron las F14D82d, F14D82e, F14D82f y F14D83d.

El equipo que sirvió de soporte para el procesamiento de la información es una computadora de escritorio con procesador Intel (R) Pentium (R) III CPU 1113MHz,

1.14 GHz y 248 MB de RAM y impresora Hp (Hewlett-Packard) 1200 multifuncional para impresión de mapas e impresora laser HP 1022 para impresión del documento.

Cuadro 2. Características del material satelitario.

Sensor	Fecha	Datum	Resolución Espacial m.	Resolución espectral	Descripción de las bandas	Resolución Radiométrica N.D.	Resolución temporal
TM	31/01/1985	WGS1984	28.5	7 bandas	Azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, 2 de infrarrojo medio y infrarrojo termal.	0-255	16 días a las 9:45 tiempo local
ETM+	21/03/2000	WGS1984	28.5	8 Bandas	Azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo termal y pancromática.	0-255	16 días 9:45 tiempo local
ETM+	8/01/2003	WGS1984	28.5	8 bandas	Azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo termal y pancromática.	0-255	16 días 9:45 tiempo local

N. D. Niveles digitales.

Cuadro 3. Cartografía utilizada

C. cartográfica	Nombre	Escala	Tema	Fuente y fecha
F14D82	Tulancingo	1:50,000	Topográfica	INEGI, 1998
F14D83	Huachinango	1:50,000	Topográfica	INEGI, 1999
E14B12	Cd. Sahagun	1:50,000	Topográfica	INEGI, 1998
E14B13	Chignahuapan	1:50,000	Topográfica	INEGI, 1998
F1411	Pachuca	1:250,000	Topográfica, aguas superficiales, aguas subterráneas, edafológica, geológica y uso del suelo y vegetación.	INEGI, 1998, 1983, 1985
F1402	Cd. De México	1:250,000	Topográfica, aguas superficiales, aguas subterráneas, edafológica, geológica y uso del suelo y vegetación.	INEGI, 1998, 1983, 1985
		1:1,000,000	Climática Nacional	CONABIO, 1998.

Los programas para procesamiento de la información fueron 5 software's y 1 base de datos. Los software's: Idrisi versión Kilimanjaro para el manejo de imágenes de satélite, Arc View 3.2 y 8.2 para el manejo de datos vectoriales, Autocat Map 2000

para manejo de datos vectoriales y edición de mapas, Cartalinx para poligonización de unidades cartográficas en formato vector y HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) versión 2.2.2 para el modelado de los escurrimientos. Las base datos ERIC (Extracción Rápida de Información Climática, versión 2000) para la selección de las estaciones climáticas.

Además, para la estimación de los escurrimientos se recurrió a las bases de datos de precipitación máxima de 24 horas de la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en Hidalgo (CNA-Hidalgo) y de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (GRAVAMEX) en formato digital y analógico. En el cuadro 5 se presenta la relación de estaciones pluviométricas utilizadas.

Y por último los manuales de apoyo derivados de los propios paquetes de cómputo tales como manuales de ayuda y tutorial en algunos casos.

Cuadro 4. Estaciones climáticas utilizadas

C. de la estación	Nombre de la estación	Ubicación geográfica UTM m.		Elevación	Fuente
		X	Y		
13059	Acatlán	526 129.68	2 226 123.42	2190	G. Hgo.
13061	Alcoholoya	557 455.30	2235 420.48	2100	G. Hgo.
13094	Acaxochitlán	583 607.99	2 228 149.15	2280	GRAVAMEX
21036	Ahuazotepec	590 614.10	2 220 806.40	2200	GRAVAMEX
13082	Esperanza	569 717.05	2 217 021.57	2210	G. Hgo.
13099	Metepec	571 375.71	2 237 316.68	2200	G. Hgo.
21066	P. N. Chign	595 923.00	2 206 079.00	2620	GRAVAMEX
13085	Presa tezoy	576 785.69	2 194 918.62	2590	GRAVAMEX
13031	Santiago T.	566 231.08	2 217 008.01	2180	G. Hgo.
13116	Zembo	545 286.86	2 228 007.06	2240	G. Hgo.
13033	Singuilucan	550 571.06	2 207 734.14	2650	G. Hgo.
13029	San Loren Z.	568 009.86	2 207 793.03	2630	G. Hgo.

Fuente: Área de hidrometeorología, Gerencia Hgo., Jefatura de Hidrología operativa, GRAVAMEX. CNA, 2005.

G. Hgo. Gerencia de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en Hidalgo.

GRAVAMEX Gerencia Regional de Aguas de Valle de México y Sistema Cutzamala.

4.2. Metodología

La metodología que se utilizó se compone de dos fases, dinámica del cambio de uso del suelo y estimación de escurrimientos superficiales.

4.2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a una microcuenca hidrográfica que se caracteriza porque el agua que cae sobre la superficie de drenaje escurre sobre las laderas hasta un punto común o hacia un cauce, es decir, toda el agua acumulada desemboca ya sea en un afluente más grande, a una laguna, presa o a la mar. De acuerdo con Sánchez, (1987) este tipo de microcuencas están delimitadas por los puntos de mayor elevación altitudinal los cuales son las fronteras entre cuencas, subcuencas y microcuencas contiguas.

4.2.1.1. Localización.

Esta microcuenca se encuentra ubicada en la parte central de la República Mexicana, específicamente en la porción sureste del estado de Hidalgo y noroeste del estado de Puebla ocupando una superficie de 838.48 km². de los cuales el 3.360% corresponde a Hidalgo y 0.216 % a Puebla, geográficamente se posiciona entre las coordenadas 19° 53' 36" a 20° 14' 20" de latitud norte y de 98° 7' 57" a 98° 34' 12" de longitud oeste. La Figura 3 muestra la ubicación dentro del contexto nacional y estatal.

Administrativamente el área de estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica número 26 (RH-26) del Pánuco teniendo como afluente al Río Moctezuma, las aportaciones al Moctezuma provienen de las subcuencas de los Ríos Extoras, San Juan, Prieto, Arroyozarco, Tecolutla, Alfajayucan, Tula, Rosas, El salado, Actopan, Amajac, Tezontepec, Metztlán, Calabozo y Los Hules. La microcuenca de interés se encuentra en la porción sureste de la subcuenca de Río Metztlán, (INEGI, 1983). La Figura 4 muestra la ubicación de la microcuenca dentro de la Región Hidrológica No. 26 y su ubicación con respecto a la RH-27.

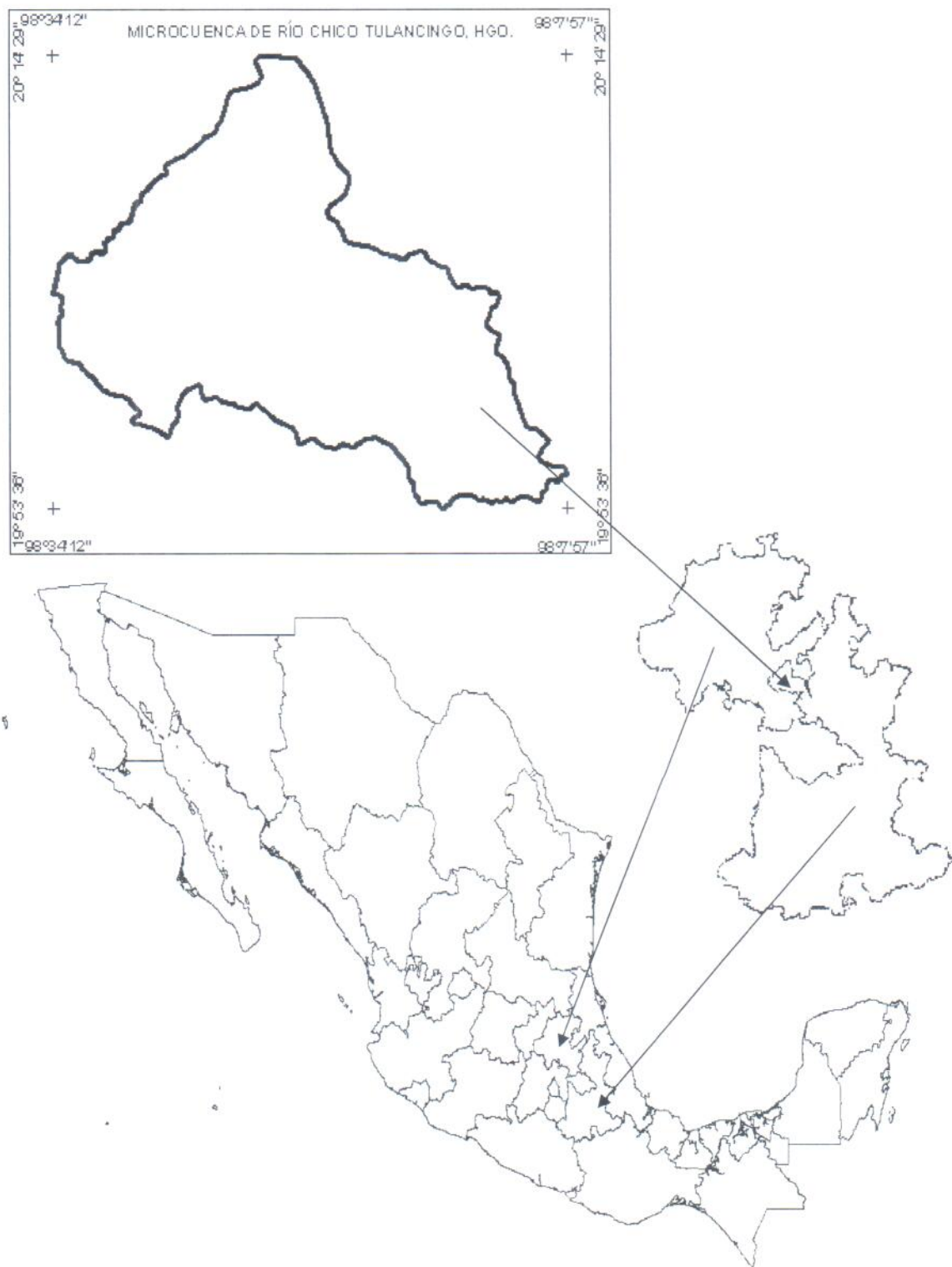
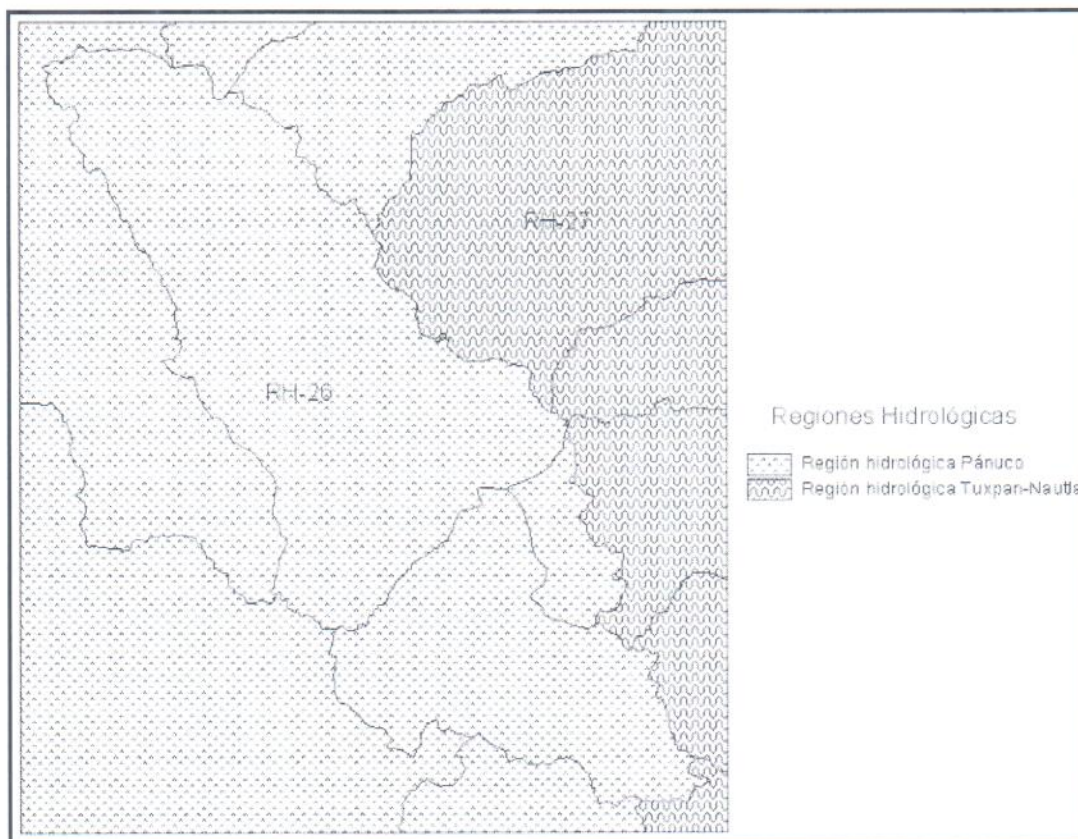


Figura 3. Ubicación del área de estudio.



Fuente: Carta hidrológica de aguas superficiales, esc. 1:250,000, INEGI 1983.

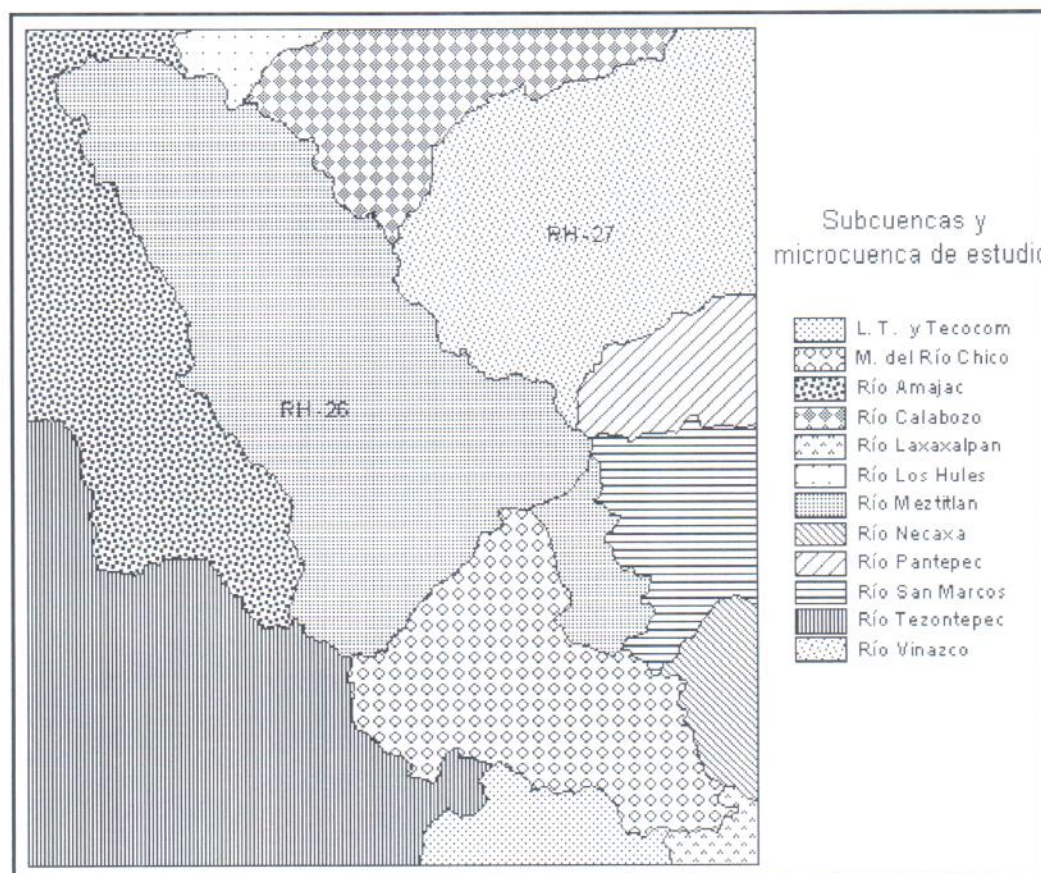
Figura 4. Ubicación hidrológica del área de estudio

La CNA ubica al área de estudio dentro la mesorregión centro donde se incluye a la Región Golfo Norte y Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, cada una administrada por los consejos técnicos en los estados que las integran.

En la Región Golfo Centro se ubican tres subregiones: San Fernando, Soto la Marina y Pánuco dentro de la cual encontramos a la subcuenca del Río Metztlán donde se ubica al área de estudio, (CNA, 2003).

4.2.1.2. Límites y vecindades

La subcuenca del Meztlán como referencia para la localización del área de estudio limita al norte con la subcuenca del Río los Hules, Calabozo y Amajac, al este con la Región Hidrológica Número 27 Tuxpan Nautla y las respectivas subcuencas que la integran (Figura 5). Al sur limita el Río Tuchac y Tecocomulco y al este y suroeste con las subcuencas del Río Tezontepec y Amajac.



Fuente: Carta hidrológica de aguas superficiales, esc. 1:250,000, INEGI 1983.

Figura 5. Ubicación del área de estudio con respecto a sus vecindades.

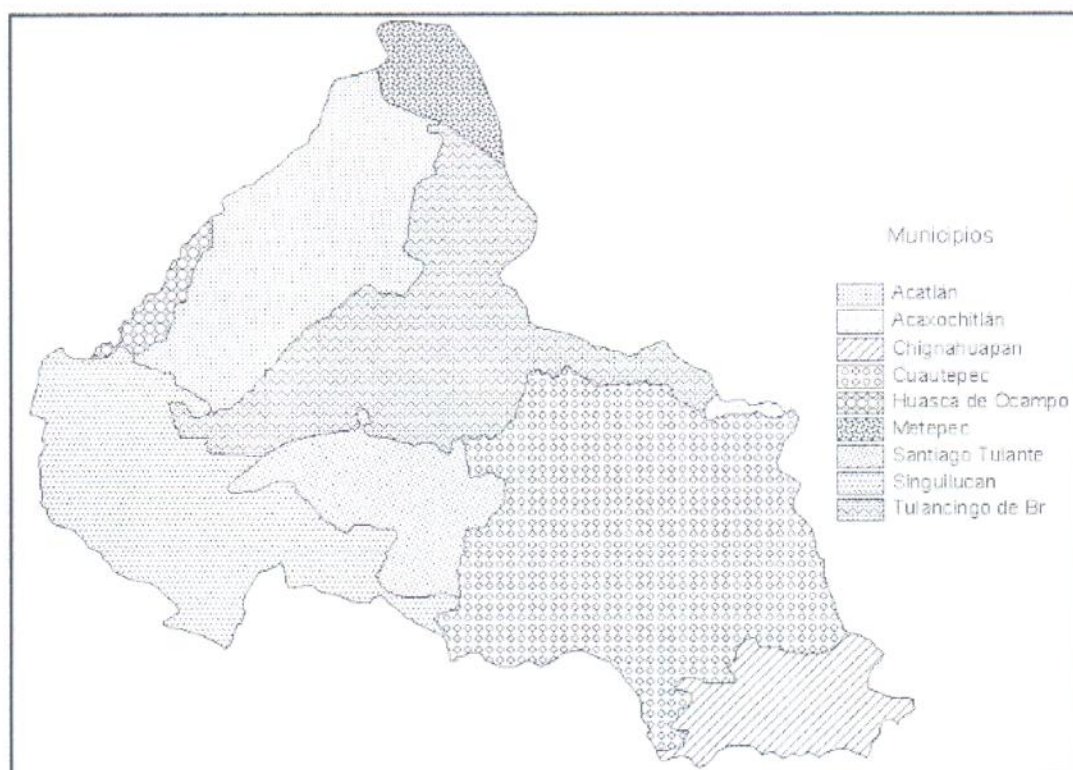
4.2.1.3. División política y accesos

Concentra 9 nueve municipios (Cuadro 5), ocho del estado de Hidalgo y uno en el estado de Puebla. Dentro de los que se ubican en Hidalgo se encuentran tres donde el crecimiento urbano se ha concentrado considerablemente en los últimos años; Tulancingo de Bravo, Santiago Tulantepec y Cuautepec de Hinojosa de acuerdo con INEGI, 1981, 1995, 1999 y 2000. La Figura 6 muestra la ubicación de los municipios.

Las vías principales que comunican al Valle son las carreteras federales número 130 (Pachuca- Pozarica-Tampico) y la número 132 (México- Teotihuacan-Tulancingo).

Cuadro 5. Municipios que conforman el área de estudio

Estado	Municipio	Superficie ha.	% del área
Hidalgo	Acatlan	126 686	15.1
	Acaxochitlán	2 942	0.36
	Cuautepec	250 266	29.85
	Huasca de Ocampo	10 990	1.31
	Metepec	27 442	3.27
	Santiago Tulantepec	63 356	7.56
	Singuilucan	143 97	17.17
	Tulancingo de Bravo	159 775	19.053
Puebla	Chignahuapan	53 072	6.33
Total		838480	



Fuente: Cuadernos estadísticos de Huasca de Ocampo, Hgo y Chignahuapan, Pue, Ed. INEGI 1997.
Figura 6. Municipios que integran la microcuenca.

4.2.1.4. Características del medio físico

El medio físico se compone de varios elementos, los bióticos y abióticos. El biótico de mayor importancia en el presente estudio es la vegetación y los abióticos son los integrados por las unidades de suelo, hidrología superficial, subterránea y clima.

➤ Uso del suelo y vegetación

De acuerdo con el Inventario Nacional Periódico de 1994 en el estado se encuentran tres ecosistemas vegetales importantes: Selvas, bosques y vegetación de zonas áridas siendo este último el que ocupa la mayor superficie estatal.

Dentro de ellos y de acuerdo con la descripción que se encontró en la cartografía de uso del suelo y vegetación editada por INEGI, 1985 y con apoyo de los trabajos realizados por Rzedowski (1978), Medina y Rzedowski (1981), Puig (1991), González (1968), se tienen los siguientes subtipos de usos del suelo y vegetación.

El área de estudio se encuentra cubierta por distintos tipos de vegetación y usos de suelo, las áreas de vegetación que ocupan mayor superficie son las cubiertas por bosque de pino, bosque de pino, pino-encino y encino-pino.

Las áreas cuyos usos abarcan mayor superficie son las agrícolas: temporal la cual tiene mayor representatividad, seguida del área de riego, posteriormente pastizales y por último las áreas urbanas, el Cuadro 6 muestra los usos y tipos de vegetación existentes.

Cuadro 6. Usos del suelo y vegetación en el área de estudio.

Clave Ftal.	Entidad	Tipo
BA	Bosque	Bosque de oyamel
BP	Bosque	Bosque de pino
BPQ	Bosque	Bosque de pino-encino
BC	Bosque	Cultivado
BJ/Vsa	Bosque	Bosque de tascate
BP/Vsa	Bosque	Bosque de pino
BQ/Vsa	Bosque	Bosque de encino
BQP	Bosque	Bosque de encino-pino
E-PI	Pastizal	Pastizal inducido
E-TP	Área agrícola	Temporal
H2O	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
MC/MCA	Matorral	Matorral crassicaule
MC/Vsa	Matorral	Matorral crassicaule
ML	Otros tipos de vegetación	Chaparral
PI	Pastizal	Pastizal inducido
RAS	Área agrícola	Riego
TA	Área agrícola	Temporal
TAP	Área agrícola	Temporal
TP	Área agrícola	Temporal
TPA	Área agrícola	Temporal
ZU	Localidad	Zona urbana

Fuente: Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, INEGI, 1985.

Bosque de oyamel: El bosque de oyamel está compuesto por la especie *Abies religiosa*, se localiza en las partes de mayor elevación dentro del área de estudio en el rango de los 2,800 a los 3,000 msnm., bajo un clima semifrío.

Su escasez se debe a las condiciones tan especiales que requiere para subsistir, tales como: mucha humedad, precipitaciones superiores a los 1000 mm anuales a grandes altitudes en zonas muy inclinadas o cañadas, donde los vientos se manifiestan muy fuertes. Generalmente se presenta sobre suelos volcánicos.

La dinámica sucesional después de la destrucción y el abandono, tiene un primer paso con la formación de una pradera de montaña, caracterizada por los géneros *Festuca*, *Muhlenbergia* y *Stipa*, que son fuertemente pastoreadas. En esas praderas pastoreadas aparecen: *Acaena elongata*, *Conyza* sp, *Senecio Sanguisorbae*, *Senecio tussilaginoide*s. Los prados muy húmedos están caracterizados por *Potentilla candicans*, *Potentilla heterophylla*, *Tauschia nudicaulis*, *Epilobium mexicanum*. El dinamismo sigue con una fase ulterior de matorral, del cual se pueden distinguir dos tipos: matorral de *Juniperus deppeana*, bajo y claro con *J. flaccida*, *Arbutus glandulosa* y *A. xalapensis*; el matorral de *J. monticola*, en lugares más húmedos con *Quercus crassifolia* y *Quercus rugulosa*. Los primeros árboles colonizadores son *Alnus firmifolia*, *Quercus* sp. y *Abies religiosa* que forman la última fase evolutiva.

Bosque de pino: ocupa 14.20 % del área, está compuesto por especies de *Pinus*. *patula*, *P. montezumae*, *P. teocote*, *P. rudis*, *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus* var. *apulcencis*.

En algunas ocasiones asociados con oyameles, tascate y aile. Se localiza en el rango altitudinal de 2,400-2,850 msnm. Dentro de este tipo de cubierta del suelo también se encuentra al bosque de pino tipo cultivado y al bosque de pino con vegetación secundaria.

Prosperan en zonas de climas templados y fríos, sobre Litosoles y Regosoles, derivados de calizas, lutitas y areniscas. La precipitación oscila de los 600 a los 1000 mm anuales y la temperatura media anual de 12 a 18°C.

Bosque de encino: el bosque de encino se distribuye en casi toda la cuenca, se considera una fase sucesional del pino por lo que se explica que un bosque con

problemas de clandestinaje carente de manejo se desarrolle este tipo de vegetación. En la zona de estudio se encuentran asociados tanto en áreas con pino, como en áreas agrícolas o como árboles de traspaso en las colonias que rodean a la ciudad.

Los suelos que lo soportan son Feozem, Rendzinas, Luvisoles y Regosoles, bien drenados y con presencia de calizas y lutitas. La distribución altitudinal del bosque varía de 500 a 1200 m y es común que se ubique en zonas con climas semisecos o templados subhúmedos y semicálidos, donde las temperaturas medias anuales tienen rangos de 20 a 24 ° C y las precipitaciones entre 600 y 1200 mm en el mismo lapso. En la zona árida está integrado por individuos de 5 a 8 m de alto, aunque en algunos sitios alcanzan hasta 15 m; de las especies que lo forman la mayoría son caducifolias, que pierden su follaje durante un corto período del año entre ellas están: *Quercus affinis*, *Q. castanea*, *Q. eduardii*, *Q. deserticola*, *Q. laeta*, *Q. mexicana*, *Q. obtusata* y *Q. sartorii*.

Bosque de pino-encino: se distribuye desde los 2400 a los 2900 msnm, muy cercano a las masas de pino, las especies que predominan son *Quercus rugosa*, *Q. crassifolia*, *Q. crassipes*. Ocupa el 4.032 % del área de estudio, de acuerdo con esta fuente, pero, de acuerdo a recorridos en el área esta especie se distribuye abundantemente en áreas de cultivo tanto de temporal como de riego.

Bosque de encino-pino: ocupa el 1.70% de la superficie, generalmente se le clasifica dentro del bosque puro de encino. Dentro de este tipo de cubierta del suelo también se encuentra al bosque de encino con vegetación secundaria, la cual consiste de especies arbustivas.

Bosque de tascate con vegetación secundaria: el bosque también se distribuye dentro del área de estudio aunque la superficie que ocupa es tan solo de 0.416%, presenta una distribución más amplia al sur de la zona de estudio.

Matorral crassicaule: el matorral crassicaule se encuentran representado por cardonal y nopaleras cultivadas y de forma natural, ocupa 0.621 % y se distribuye al norte y al sur de la ciudad de Tulancingo, entre Santiago Tulantepec y Cuautepec.

Pastizal: El pastizal inducido se encuentra distribuido en pequeñas áreas en toda el área de estudio, dentro de ellos existen los que presentan problemas de erosión.

Agricultura de temporal: Las áreas de temporal se encuentran en casi toda el área de estudio, en las partes de mayor y menor elevación, ocupa 54. 58 %. Los tipos de cultivos que se encuentran son los de tipo anual y permanente.

Agricultura de riego: en los cultivos de riego predominan los cultivos anuales, permanentes y semipermanente. Ocupa 13.69 %, se distribuye en la parte más baja de la microcuenca.

Cuerpos de agua: Los cuerpos de agua más importantes son: presa la Esperanza y Laguna Supitlán, ocupan 0.092 %. Su principal uso es el riego.

Zonas urbanas: Las zonas urbanas que en este fuente se toman en cuenta son los centros de población mas importantes: Tulancingo de Bravo, Santiago Tulantepec y Cuauhtepac de Hinojosa, no toma en cuenta a las localidades. En la Figura 7 se aprecia la distribución del uso del suelo y vegetación en el área de estudio.

➤ Suelos

Dentro del área de estudio se encuentran una gran variedad de unidades de suelo cada uno con sus respectivas asociaciones.

Las principales unidades de suelos del área de la microcuenca de acuerdo con la clasificación FAO/UNESCO 1970, modificada por la Dirección General de Geografía del INEGI se describen a continuación:

Acrisol: Derivación del nombre de la palabra latina *acris* que significa muy ácido; connotativa de un contenido bajo de bases.

Acrisol Húmico (Ah). Se caracteriza por tener una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y pobre en nutrientes. Presenta un elevado contenido de materia orgánica. Solo con inversiones elevadas y constantes prácticas de fertilización y encalado son productivos, especialmente en práticamente.

En el área de estudio se le encuentra en una pequeña porción al noreste del municipio de Cuauhtepac de Hinojosa, al Suereste de Tulancingo de Bravo y en la porción de Acaxochitlán que queda dentro de la zona de interés para este estudio, se le encuentre en solo 3.045 %.

Cambisol (B): Derivación del nombre de la palabra latina *cambiare* que significa cambio; indicando los cambios en color, estructura y consistencia que resultan de la intemperización in situ.

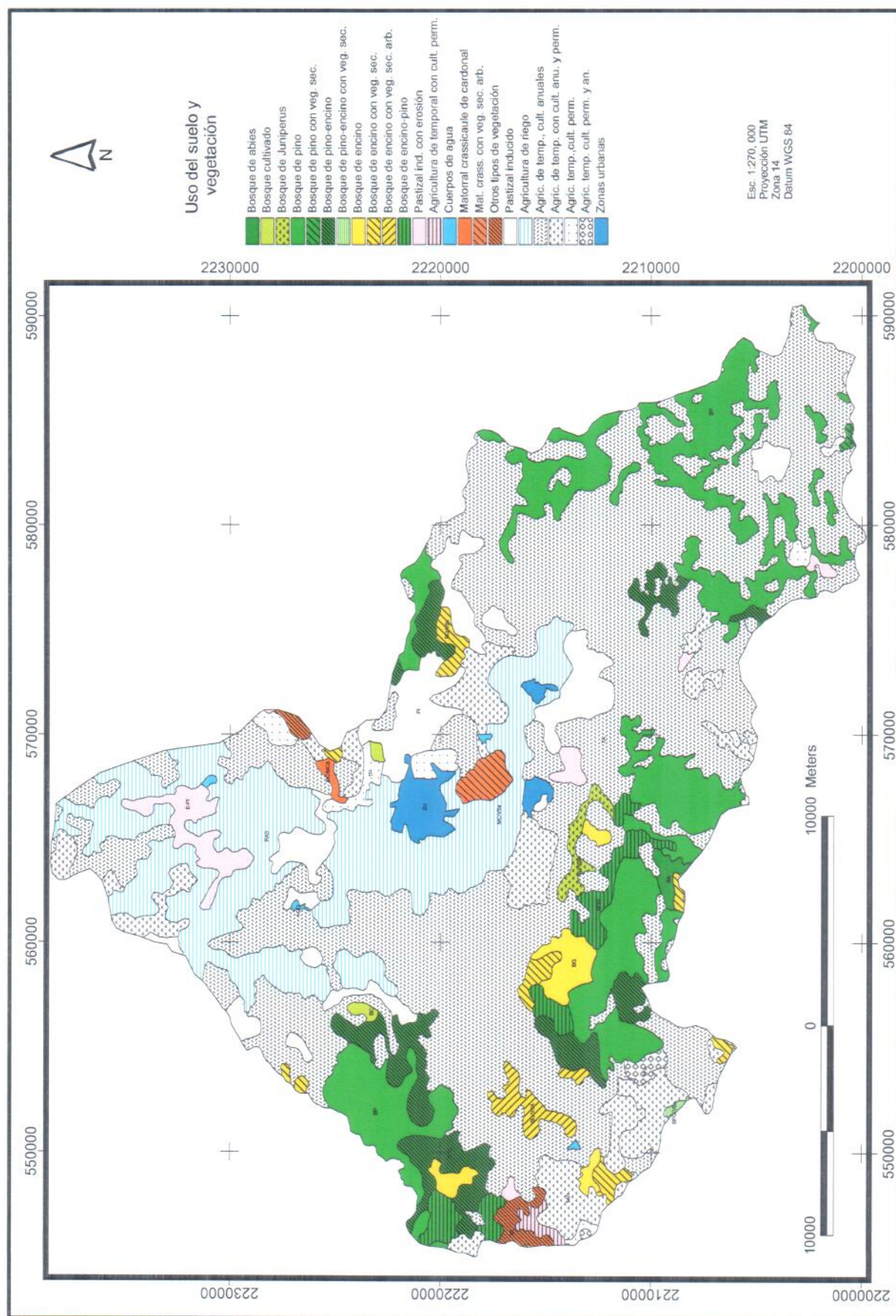
Se presentan en pequeñas porciones con distintos tipos de climas, principalmente al sureste del Estado. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro que puede ser o no pobre en materia orgánica o, una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y pobre en nutrientes, sobre una capa con estructura de suelo y no de roca a menos que esté cubierto por 50 cm o más de material nuevo. Carecen de salinidad elevada, un régimen de humedad árido y de propiedades hidromórficas en los primeros 50 cm de profundidad.

Cambisol eútrico (Be). Este suelo representa el 2.87 % de la superficie de la microcuenca, se localiza en la porción sur del municipio de Cuauhtémoc de Hinojosa. Se caracteriza por tener una capa superficial de color claro que puede ser o no pobre en materia orgánica y una saturación de bases del 50 % o más en un espesor entre 20 y 50 cm de la superficie, pero que a esa profundidad no son calcáreos.

Son suelos agrícolamente aprovechables para cultivos regionales. Su productividad agrícola va de moderada a alta según la fertilización a que sean sometidos. En la zona donde se presentan no hay riego.

Cambisol húmico (Bh): Representa el 8.91% del territorio Hidalguense y se caracteriza por contar con una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y pobre en nutrientes de más de 25 cm de espesor cuando no existe una capa con estructura de suelo y no de roca. El mejor uso a que pueden destinarse es el forestal, ya que para pricultura o agricultura requerirían fertilización y enclavado abundante; además, los rendimientos que se obtendrían y la utilización productiva serían bajos y de pocos años respectivamente.

Se le encuentra en la porción sur del municipio de Santiago Tulantepec, Suroeste de Cuauhtémoc de Hinojosa y noreste de Singuilucan ocupando el 8.92 % de la superficie de la microcuenca.



Fuente: Cartas edafológicas F14-11 y E14-02. Esc. 1:250, 000. INEGI (1985).

Figura 7. Uso del suelo y vegetación

Feozem (H): Derivación del nombre del griego phaios que significa pardo y de la palabra rusa zemlja que significa tierra.

Son suelos que tienen una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes, ausencia de una capa abundante de acumulación de carbonatos o concentraciones de cal suave pulverulenta dentro de los primeros 125 cm de profundidad. Carecen de una capa que tiene exceso de sodio y estructura en forma de columnas; sin salinidad elevada; desprovistos de propiedades hidromórficas dentro de los primeros 50 cm de profundidad cuando no hay una capa en la que ha habido acumulación de arcilla; carentes de revestimientos decolorados en las superficies estructurales de los peds cuando hay una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes que tiene en húmedo un croma de 2 o menos a una profundidad no menor de 15 cm.

Cuentan con varios usos que se describen con las subunidades. Su susceptibilidad a erosionarse es variada, según las condiciones de clima, pendiente y cobertura vegetal. En la microcuenca se encuentran dos subunidades:

Feozem háplico (Hh): Es el tipo de suelo con mayor cobertura en la microcuenca al cubrir una superficie de 23.55%, en la zona se le encuentra al norte y al suroeste principalmente en los municipios de Singuilucan, Metepec, norte de Tulancingo y Acatlán, tanto en partes elevadas como en valles, en la mayoría de la microcuenca se le encuentra asociado con otras unidades. Tienen una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes. Pueden presentar un horizonte B con estructura de suelo y no de roca. Su fertilidad va de moderada a alta y se le encuentra en las zonas de riego en la zona se le encuentra asociado con varias unidades edáficas.

Feozem lúvico (Hl): en la zona cubre el 11.55 % de la superficie en la parte central del municipio de Cuauhtépec, Santiago Tulantepec y noroeste de Chignahuapan al igual que Vertisol pélico se encuentra asociado con otras unidades. Presenta una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes, sobre una capa en la que ha habido acumulación de arcilla. Son de susceptibilidad moderada o alta a la erosión.

Luvisol (L): Derivación del nombre de la palabra latina luo que significa lavar; connotativa de la acumulación aluvial de arcilla.

Ocupan el 17.93 % en varias asociaciones con dominancia sobre ellas de la superficie del área sobre zonas templadas; se caracterizan por tener un horizonte B en el cual ha habido acumulación de arcilla, que tienen una saturación de bases de 50 % o más cuando menos en la parte inferior del horizonte B dentro de los primeros 125 cm de profundidad; carecen de una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes, no presentan capa intermedia decolorada y muy permeable superpuesto a un horizonte lentamente permeable, del patrón de distribución de arcillas, carentes de un régimen de humedad árido.

Son suelos ricos en nutrientes y de varios usos según las subunidades, aunque se recomienda el uso forestal por los buenos rendimientos que pueden generarse y por su alta susceptibilidad a la erosión. Esta unidad de suelo presenta las subunidades siguientes en el área de estudio:

Luvisol crómico (Lc): Su superficie abarca es de 1.65% del área de estudio principalmente en una porción al sur de Tulancingo, y noroeste de Singuilucan. Cuenta con un horizonte B en el cual ha habido acumulación de arcilla de color pardo intenso a rojo, sin una capa intermedia, tiene una capa superficial de color claro y de fertilidad moderada. El uso principal de estos suelos es forestal, excepto en la poción de Tulancingo donde su uso actual es urbano.

Luvisol órtico (Lo): Su distribución dentro del área de estudio se limita al 6.23 %; sobre la exposición norte del cerro de las Navajas en el municipio de Santiago Tulantepec. Presenta un horizonte B en el cual hay acumulación de arcilla, sin capa intermedia. Estos suelos son de fertilidad moderada.

Luvisol vértico (Lv): esta subunidad de suelo se presenta en solo 0.027% dentro de la microcuenca en el municipio de Acatlán. Presenta un horizonte B en el cual ha habido acumulación de arcilla, muestra propiedades vérticas, pero carece de una capa intermedia. Presenta agrietamiento notable cuando se secan. Son de fertilidad moderada y susceptibles de salinizarse por riego con agua de mala calidad, haciéndose difícil su recuperación.

Regosol (R): Derivación del nombre de la palabra griega rhegos que significa cobija, manta; connotativa del manto de material suelto situado sobre la roca.

Son suelos someros y están acompañados de litosoles. Proceden de material no consolidado, excluyendo depósitos aluviales recientes, con capa superficial de color claro que puede ser o no pobre en materia orgánica, carente de propiedades hidromórficas en los primeros 50 cm de profundidad, sin salinidad elevada cuando tienen textura gruesa, carentes de laminillas de acumulación de arcillas.

Tienen una amplia gama de texturas, se encuentran en muy distintos climas y con cualquier vegetación. Constituyen la etapa inicial de formación de un gran número de suelos, principalmente Podzol, Luvisol, Cambisol, Chernozem, Castañozem, Xerosol y Yermosol. Son suelos formados por material suelto que no sea aluvial reciente, como dunas, cenizas volcánicas, etc. El uso de estos suelos es variable de acuerdo a su origen y su susceptibilidad a la erosión también es variable.

En la zona se encuentran los subgrupos que a continuación se describen:

Regosol éutrico (Re): Se extiende en la porción sureste de Tulancingo ocupando en 1.29 % de la superficie de la microcuenca. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro que puede ser o no pobre en materia orgánica y una saturación de bases de 50 % entre los 20 y 50 cm de profundidad a partir de la superficie. Su fertilidad puede ser moderada o alta.

Andosol (T): Derivación del nombre japonés An que significa oscuro y, Do que significa suelo, connotativo de suelos formados a partir de cenizas volcánicas y que por lo común tienen un horizonte superficial oscuro.

Los Andosoles son suelos que presentan una capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes o, una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y pobre en nutrientes, posiblemente situada sobre una capa con estructura de suelo y no de roca. También pueden presentar una capa superficial de color claro que puede ser o no pobre en materia orgánica sobre una capa con estructura de suelo y no de roca, con una profundidad de 35 cm o más, con un 60 % o más de ceniza volcánica vítrica, escoria u otro material vítreo

piroclástico en las fracciones de limo, arena y grava; carente de cualidades hidromórficas dentro de los 50 cm superiores, carentes de salinidad elevada.

Suelos muy ligeros, de textura esponjosa y con alta capacidad de retención de agua y nutrientes. Por su alta susceptibilidad a la erosión, así como por la fuerte fijación de fósforo que les caracteriza, deben destinarse a la explotación forestal o al establecimiento de parques recreativos. De forma natural, sostienen vegetación de bosque de pino, abeto, encino, etc. Ocupan una superficie de 10.6%.

En el área de estudio se encuentran las subunidades siguientes:

Andosol húmico (Th): Ocupa el 8.48 % de la superficie. Se localiza en el sureste de Cuauhtémoc y en una porción de Chignahuapan. Se caracteriza por tener una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y pobre en nutrientes, la consistencia del suelo es barrosa y/o una textura de migajón limosa o más fina.

Andosol órtico (To): La superficie de este suelo representa el 2.15% del espacio territorial de la microcuenca; se distribuye en la porción sur sureste de Acatlán a la altura del Loma Chica y loma larga ocupando exposiciones norte, noreste, este y sureste. Este suelo tiene una capa superficial de color claro que puede ser o no pobre en materia orgánica sobre una capa con estructura de suelo y no de roca, posee una consistencia de barro y/o textura que es migajón limoso o más fina.

Vertizol (V): Derivación del nombre de la palabra latina *verto* que significa voltear, connotativa del volteo hacia abajo de la superficie del suelo.

Se distribuyen principalmente en climas semisecos, en donde hay una marcada estación seca y otra lluviosa; cubren el 9.3% de la superficie estatal, se le observa en fase pedregosa con fragmentos mayores a 7.5 cm. en la superficie que impiden el uso de maquinaria agrícola.

Son suelos que después de haber mezclado los 20 cm superiores, tienen 30 % o más de arcilla en todos los horizontes a una profundidad no menor de 50 cm; desarrollan grietas de la superficie del suelo hacia las cuales en algún período (a menos que el suelo se riegue), tienen cuando menos 1 cm de ancho a una profundidad de 50 cm. Son suelos de color oscuro que tienen textura uniforme fina o muy fina y un contenido bajo de materia orgánica, pero que tal vez su propiedad

más importante es la denominación de la arcilla en la fracción del látice de arcilla expandente, por lo general, monmorillonita, que ocasiona que esos suelos al secarse se encojan y agrieten. De manera típica ocurren en zonas áridas y semiáridas, debajo de gramíneas altas o de bosque espinoso. Son suelos que presentan dificultad para su labranza y problemas de drenaje, pero con manejo adecuado son aptos para una gran variedad de cultivos. Si el agua de riego es de mala calidad, pueden salinizarse o alcalinizarse. Su fertilidad es alta. En el área de estudio el siguiente grupo:

Vertisol pélico (Vp): Cubren una superficie de 15.26 % de la porción que ocupa la microcuenca del Río Chico Tulancingo. Se le encuentra presente en la porción central del área en los municipios de Tulancingo y Cuautepec de Hinojosa, preferentemente en zonas de valle de uso agrícola con riego pero también de temporal en Cuautepec en la parte que noroeste que colinda con el sureste de Tulancingo. Una de sus características es que en los primeros 30 cm de profundidad, en la matriz del suelo húmedo tienen un cromatismo dominante de menos de 1.5, además se caracterizan por tener color negro.

La Figura 8 y 9 muestra la distribución de las unidades de suelo y sus asociaciones, así como las clases de texturas que encuentran en la microcuenca y el Cuadro 7 resume las superficies, la textura y el porcentaje que cada una de las unidades.

➤ **Clima**

De acuerdo con la cartografía generada por la CONABIO, 1998 en el área de estudio se encuentran cinco tipos de climas:

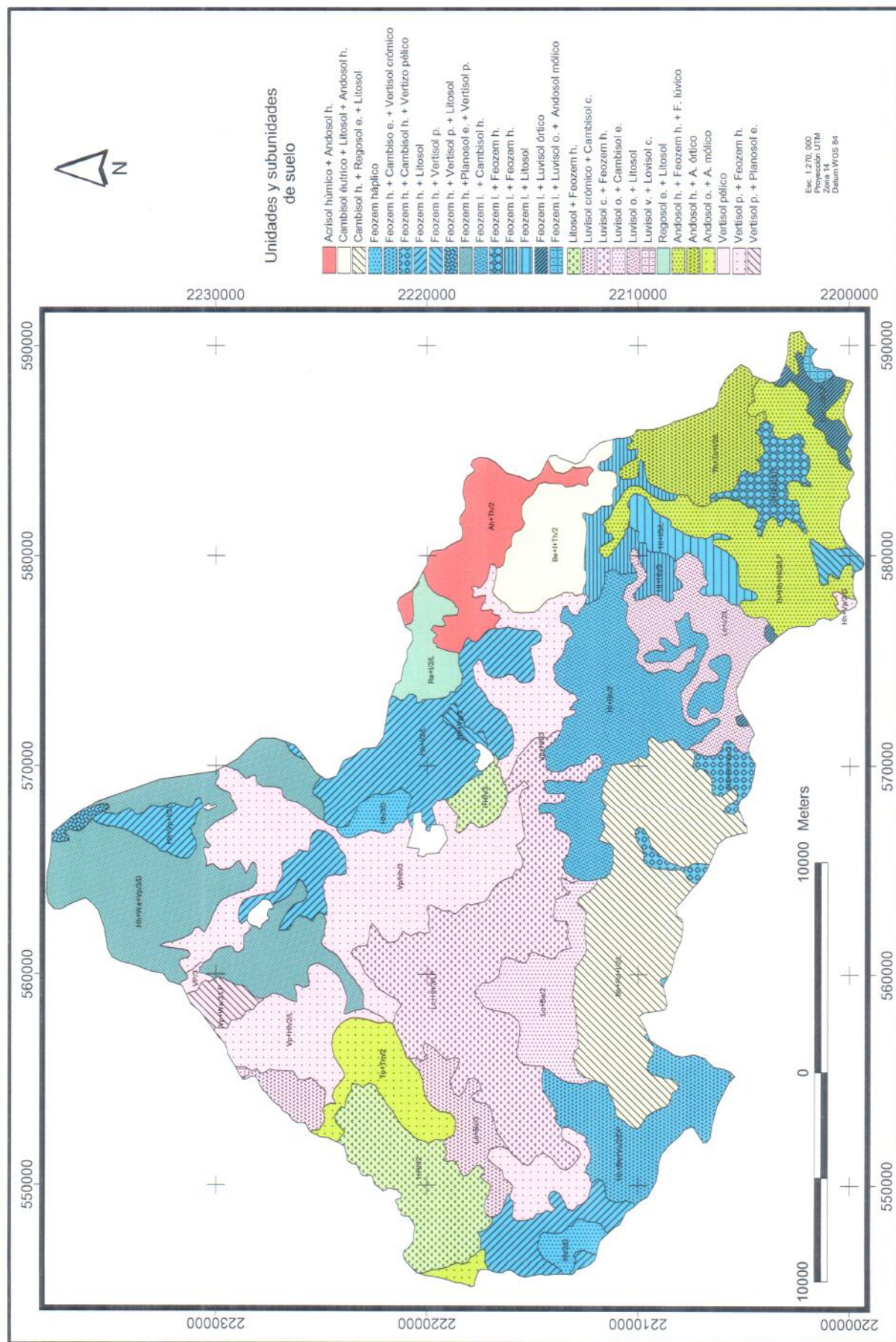
BS1kw. Semiárido, templado, con lluvias en verano de 5 a 10.2 % anual.

C(w1). Templado, subhúmedo, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

C(w2). Templado, subhúmedo, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

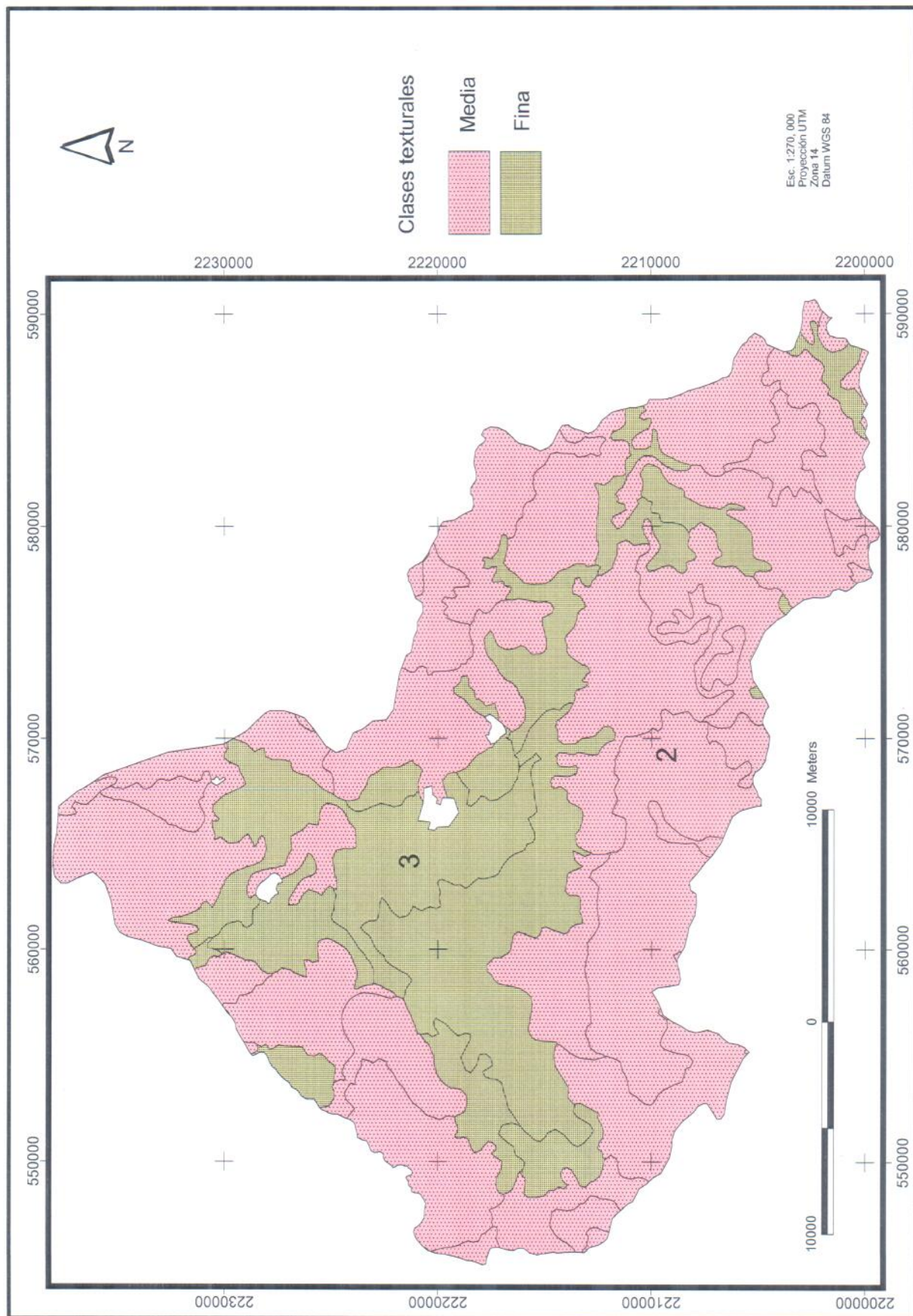
C(w0). Templado, subhúmedo, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual

Cb'(w1). Templado, semifrío con verano fresco largo, subhúmedo, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual. La Figura 10 muestra la distribución de climas en la microcuenca.



Fuente: Cartas edafológicas F14- 11 y E14-02. Esc. 1:250,000. INEGI (1983).

Figura 8. Unidades y subunidades de suelo.

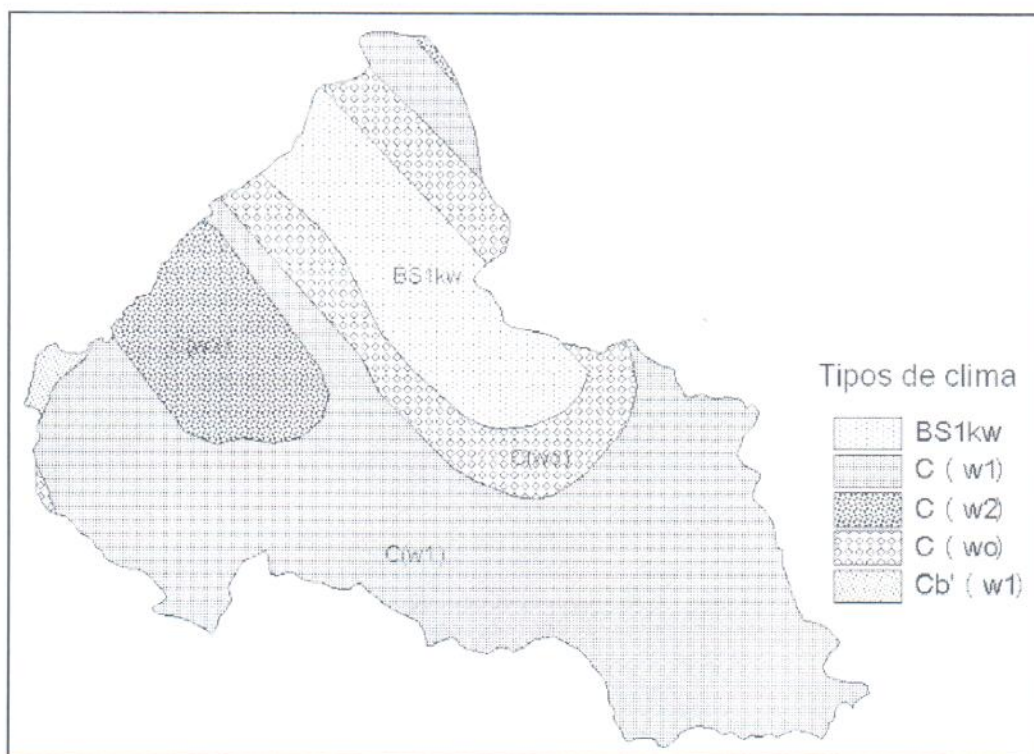


Fuente: Cartas edafológicas F14- 11 y E14-02. Esc. 1:250,000. INEGI (1983).

Figura 9. Clases texturales

Cuadro 7. Superficies, textura y porcentaje que ocupan las unidades de suelo

U. suelo	Descripción	Fase	Textura	Sup. ha	% sup.
Lc+Bc/3	Luvisol cromico + Cambisol eutrico		Fina	1354.266	1.615
Hh+Vp/3	Feozem háplico + Vertisol pélico		Fina	146.248	0.174
I+Hh/3	Litosol + Feozem háplico		Fina	583.273	0.696
Lo+Be/2	Luvisol órtico + Cambisol eútrico		Media	2266.916	2.704
Be+I+Th/2	Cambisol eutricto + Litosol + Andosol húmico		Media	2412.695	2.877
Th+To+I/2/L	Andosol húmico + Andosol órtico + Litosol	Lítica	Media	2476.291	2.953
HI+Bh/2	Feozem Luvico + Cambisol húmico		Media	5183.044	6.181
Hh+Be+Vc/2/DP	Feozem háplico + Cambisol eútrico + Vertisol crómico	Dúrica profunda	Media	2901.467	3.460
Hh/2/D	Feozem háplico	Dúrica	Media	477.218	0.569
HI+Hh/3	Feozem lúvico + Feozem háplico		Fina	1351.795	1.612
Bh+Rd+I/2/L	Cambisol húmico + Regosol eútrico + Litosol	Lítica	Media	7472.877	8.912
Th+Hh+HI/2/LP	Andosol húmico + Feozem háplico + Litosol	Dúrica profunda	Media	4640.596	5.535
Lo+I/2/L	Luvisol órtico + Litosol	Lítica	Media	2960.820	3.531
HI+Bh/2	Feozem lúvico + Cambisol eútrico		Media	306.461	0.365
HI+I/3/L	Feozem lúvico + Litosol	Lítica	Fina	1011.143	1.206
Hh+Bh+Vp/2	Feozem háplico + Cambisol húmico + Vertisol pélico		Media	742.258	0.885
HI+Hh/2/LP	Feozem lúvico + Feozem háplico	Lítica profunda	Media	1085.244	1.294
HI+Lo/3	Feozem lúvico + Luvisol órtico		Fina	59.743	0.071
HI+Lo/3/LP	Feozem lúvico + Luvisol órtico	Lítica profunda	Fina	571.232	0.681
HI+Lo+Tm/3/DP	Feozem lúvico + Luvisol mólico + Andosol mólico	Dúrica profunda	Media	116.604	0.139
Vp+Hh/2	Vertisol Pélico + Feozem háplico		Media	64.022	0.076
Hh+Vp/2/D	Feozem háplico + Vertisol pélico	Dúrica	Media	286.528	0.342
Lv+Lc/3	Luvisol vertico + Luvisol crómico		Media	23.048	0.027
Hh+We+Vp/2/D	Feozem háplico + Planosol eútrico + Vertisol pélico	Dúrica	Media	5712.105	6.812
Vp+We/3/LP	Vertisol pélico + Planosol eútrico	Lítica profunda	Media	505.978	0.603
Hh+Vp+I/3/L	Feozem háplico + Vertisol pélico + Litosol	Lítica	Media	178.330	0.213
Vp/3	Vertisol pélico		Fina	100.409	0.120
Ah+Th/2	Acrisol húmico + Andosol húmico		Media	2553.445	3.045
Vp/Hh/3	Vertisol pélico + Feozem háplico		Fina	6864.784	8.187
Hh+We+Vp/3/D	Feozem háplico + Planosol eútrico + Vertisol pélico	Dúrica	Fina	1815.244	2.165
Vp+Hh/2/L	Vertisol pálico + Feozem háplico	Lítica	Media	2220.273	2.648
Lc+Bc/3	Luvisol crómico + Cambisol crómico		Fina	588.203	0.702
To+Tm/2	Andosol órtico + Andosol mólico		Media	1809.769	2.158
Re+I/2/L	Regosol eútrico + Litosol	Lítica	Media	1088.233	1.298
Hh/3/D	Feozem háplico	Dúrica	Fina	478.164	0.570
Lc+Hh/3/LP	Luvisol crómico + Feozem háplico	Lítica profunda	Fina	7874.590	9.392
Hh+I/2/L	Feozem haplico + Litosol	Lítica	Media	7015.700	8.367
H2O	Cuerpo de agua			201.338	0.240
ZU	Zuna urbana			289.475	0.345
Vp+Hh/3	Vertisol Pélico + Feozem háplico		Fina	3039.801	3.625
I+Hh/2	Litosol + Feozem háplico		Media	3161.986	3.771
				83848	



Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998).
Escala 1:1, 000, 000.

Figura 10. Tipos de clima

➤ Hidrología.

Hidrología superficial

Uno de los principales afluentes del Río Pánuco es el Río Amajac. Este río tiene sus orígenes cerca del límite entre el estado de Puebla e Hidalgo. En su recorrido toma diversos nombres entre los que se encuentra el Río Chililico en sus inicios del área de drenaje de la microcuenca, San Lorenzo, los Cangrejos hasta tomar el nombre de Río Chico Tulancingo, Tulancingo o recientemente Río Nuevo Colorado en el norte de la Cd. de Tulancingo.

En las cercanías de la ciudad de Tulancingo drena hacia un canal, y cerca de un km. aguas abajo recibe por margen derecha al Río Santa María. Corriente administrada aguas arriba por la presa La Esperanza.

Estas corrientes son únicas y perennes en todo el valle las cuales continúan a través del canal Río Nuevo (Río Chico Tulancingo) y del cual se desprenden dos canales principales los cuales son utilizados para abastecer de agua las zonas de cultivo aledañas. Uno de estos canales denominado "Los Enlamadaros" se dirige hacia el noroeste uniéndose a este, diversos canales entre ellos algunos

provenientes de la Laguna Zupiltán cuyas aguas son el resultado de las aguas generadas con la excedencias de riego. Cabe aclarar que los límites de evaluación en el presente estudio es donde inicia el Río Grande Tulancingo.

En cuanto al canal Río Nuevo continúa hacia el norte hasta drenar cerca de la localidad Acocul, La palma, en el cauce natural del Río Cocula. Más al norte se quiebra en dirección al oeste hasta unirse por margen derecha al Río Alcholoya. Apartir de ese punto continúa como río Grande de Tulancingo donde se incorpora el Río Metepec hasta drenar en la Laguna de Meztitlán.

En la zona de estudio se localizan algunos cuerpos de agua mismos que la CNA clasifica por su capacidad de almacenamiento. Los cuerpos de agua que son tomados en cuenta en la administración de las aguas superficiales principalmente para uso agrícola son los que son capaces de almacenar una cantidad mayor o igual a 0.5 Mm³.

En el Cuadro 8 se mencionan los cuerpos de agua que están presentes dentro del área de estudio con una capacidad mayor a 0.5 millones de m³son:

Cuadro 8. Cuerpos de agua con capacidad igual o mayor a 0.5 Mm³.

Cuerpo de agua	Municipio	Capacidad Mm ³	Uso
Laguna Supitlán	Acatlán	10.0	Riego
El Sábino	Acatlán	1.63	Riego
Presa la Esperanza	Cuautepec de Hinojosa	3.92	Riego

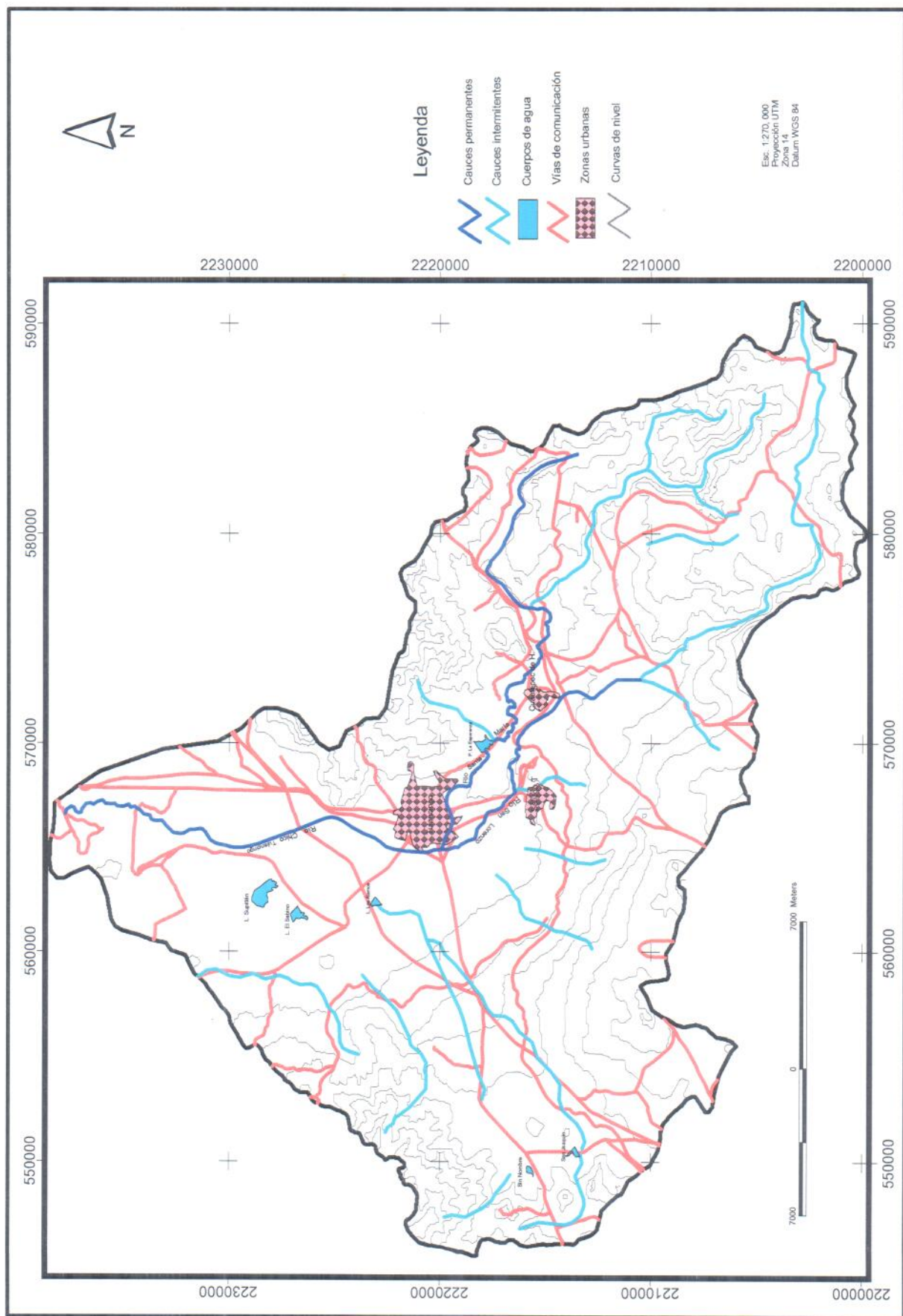
Fuente: Cartas topográficas F14D82 y F14D83, Esc. 1:50,000, INEGI 1998 y 1999. Principales almacenamientos del Edo. De Hgo. CNA, 2005.

Hay tres cuerpos de agua más, que tienen una capacidad menor a la indicada, ellos son: Los Álamos ubicado en el municipio de Tulancingo de Bravo, sin nombre aparente y San Joaquín en el municipio de Singuilucan y uno que aparentemente no tiene nombre en el municipio de Singuilucan. La Figura 11 hace referencia a la hidrología superficial del área de estudio.

• Escurrimientos superficiales

La cantidad de agua que se infiltra y que se escurre depende de la permeabilidad del suelo, la densidad de la vegetación y de la cantidad de agua que precipita.

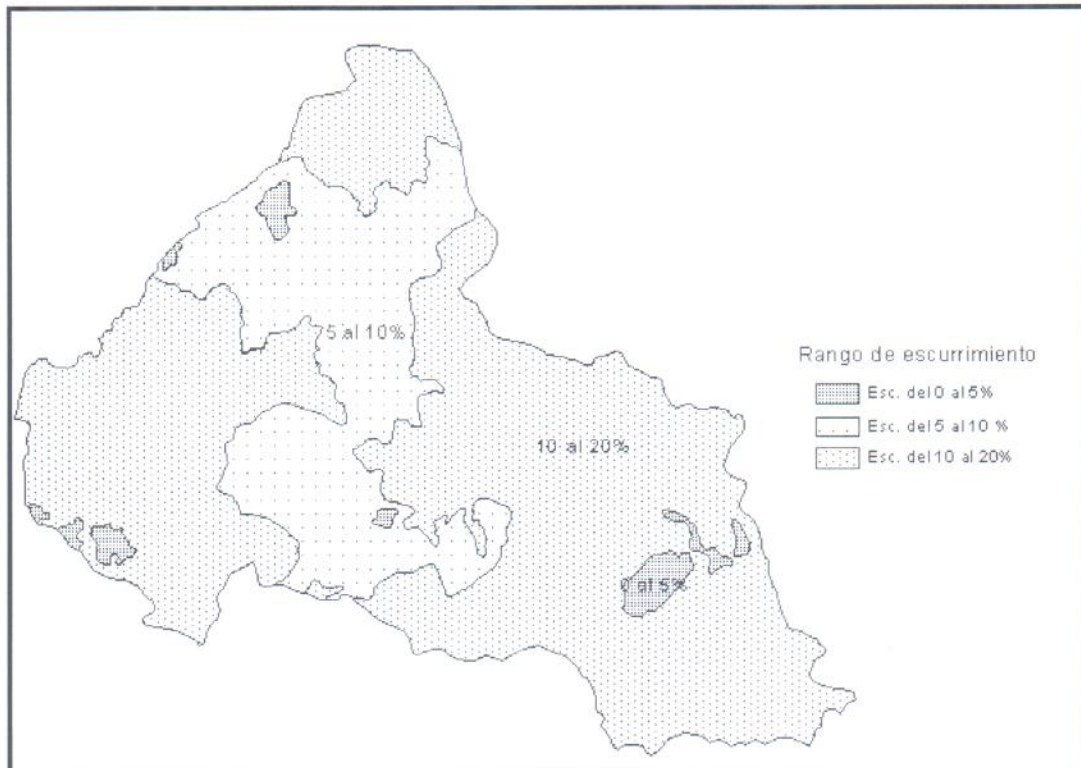
En la zona de estudio se presentan tres rangos de escurrimiento, uno que va del 0 al 5%, el segundo que va del 5 al 10% y el que va del 10 al 20%. En la Figura 12 se muestran las áreas donde se encuentran los rangos de escurrimientos mencionados.



Fuente: Cartas de aguas superficiales. F14- 11 y E14-02. Esc. 1:250,000. INEGI (1983).

Figura 11. Hidrología superficial

El primero se presenta en una baja proporción dentro de la microcuenca principalmente en las zonas más elevadas que es donde se presenta la mayor cantidad de vegetación en condiciones naturales, el segundo rango se da en las partes donde se concentran las áreas de cultivo de riego y temporal y el tercer rango que es el mas el que reporta mayor cantidad de escurrimientos es donde se concentran las áreas de población, INEGI (1983).



Fuente: Carta de Hidrología superficial, esc: 250,000, INEGI 1983, Edic. 2003.

Figura 12. Coeficientes de escurrimiento

Hidrología subterránea

En el estudio hidrogeológico de 1991 se habla de la existencia de una sola unidad hidrogeológica que da cabida a un acuífero somero de extensión limitada que subyace a un acuífero regional, de esta forma el acuífero queda colgado inmerso en una serie de depósitos volcánicos que almacenan a un acuífero regional de mayor extensión y potencial.

La interpretación de las características del acuífero profundo manifiesta un comportamiento general de tipo libre, aún cuando localmente se presente como

semiconfinado. Esto indica una falta de confinamiento por capas impermeables superiores a nivel regional haciéndose en forma local.

La región presenta una amplia distribución de zonas permeables tanto a nivel vertical como horizontal, lo que provoca los seminconfinamientos y probablemente existen acuíferos colgados cercanos generados por colgadas lávicas semipermeables y permeables.

Las recargas que alimentan a los acuíferos profundos provienen de las sierras circundantes en donde se encuentran las rocas basálticas cuaternarias, Así dichas recargas provienen del sur, oeste y noroeste del valle.

- **Permeabilidad de los suelos.**

La permeabilidad de los suelos tiene mucho que ver con el material geológico que en la zona de encuentra.

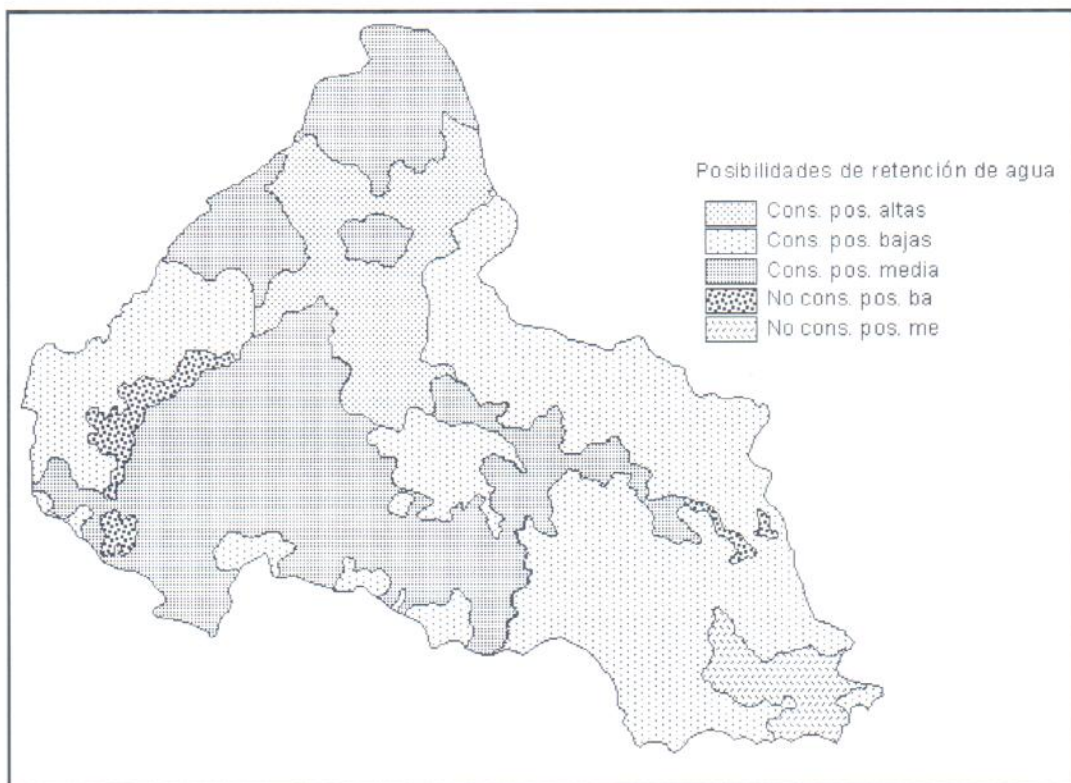
El material geológico que constituye el material consolidado con posibilidades altas es el que presenta elementos de gravas, arenas, limos y arcillas que es característico de las planicies aluviales que se encuentran relleno los valles fluviales, tal es el caso de Valle de Tulancingo.

El material consolidado con posibilidades bajas de infiltración se debe a que geológicamente presenta la característica de ser de estructura compacta y morfológicamente se puede presentar en tanto en elevaciones mixtas, es este caso se encuentra en elevaciones de baja a mediana altitud en porciones de los municipios de Cuautepéc de Hinojosa, Singuilucan, Acaxochitlán y Chignahuapan. La Figura 13 indica las áreas dentro de la cuenca donde se encuentran los tipos de materiales.

El material consolidado con posibilidad media al igual que el anterior está constituido de basaltos compactos en elevaciones mixtas, en este caso lo podemos observar en una porción del valle, municipios tales como Metepec, Acatlán, gran parte del municipio de Singuilucan y una pequeña porción de Tulancingo de Bravo.

El material no consolidado con posibilidades medias y bajas en esta zona se distribuye en baja proporción, está constituido de arcillas y ocasionalmente se

tienen aprovechamientos aunque pueden ser muy aislados, en la zona no se localizan aprovechamientos.



Fuente: Carta de Hidrología de aguas subterráneas. Esc. 1:250,000, INEGI 1983, Edic 2003
Figura 13. Permeabilidad de suelos.

4.2.2. Dinámica del cambio de uso del suelo

Esta fase se hizo empleando las imágenes de satélite de las distintas fechas y el sistema de información geográfica idrisi Kalimantan para la clasificación supervisada de uso del suelo.

4.2.2.1. Pretratamiento de imágenes de satélite

Previo a determinar la cobertura y uso del suelo, los datos satelitarios fueron sometidos a los pretratamientos siguientes:

Calibración de imágenes

El proceso de calibración de imágenes se realizó debido a que se trabajó con imágenes multifecha lo que produce diferencia en los histogramas de los niveles digitales de cada imagen por los cambios registrados en los sensores.

A pesar de que las imágenes se encontraban corregidas radiométricamente y geométricamente se encontraron diferencias en sus histogramas de los niveles digitales por lo que se recurrió al proceso de igualación de los mismos mediante el proceso de calibración de la imagen de acuerdo con las recomendaciones propuestas por Rincón (2003).

Para ello se usó el módulo CALIBRATE con la modalidad de imagen de referencia por ser el comúnmente utilizado. Este tipo de calibración consiste en hacer una regresión lineal de la imagen a corregir con respecto a la de referencia, usando como variable dependiente (X) a la de referencia y la independiente (Y) a las de 2000 y 2003.

Se usó como referencia la de 1985 ya que los datos vectoriales que se usaron presentaron menor desplazamiento con respecto a las imágenes de las fechas posteriores.

Recorte de imágenes

Con la finalidad de acelerar el proceso de manejo de la información dentro de los paquetes de cómputo, se procedió al recorte de imágenes y modelo digital de elevación.

El proceso de elaboración de la Sub-imagen y transformación de la resolución espacial consistió en hacer un recorte de la imagen utilizando el modulo RESAMPLE de Idrisi-K.

Primeramente se obtuvieron las coordenadas extremas (UTM) dentro de las que quedó enmarcada el área de estudio (Cuadro 9).

Cuadro 9. Coordenadas extremas del área de estudio.

Vértice	Lectura en X	Lectura en Y
Mínimos	544,954	2,199,817
Máximos	590,564	2,238,517

Finalmente para obtener una resolución espacial de 30*30 se creó un archivo de correspondencia de columnas y renglones dentro de los límites de 1520 columnas y 1290 renglones.

El procedimiento se realizó en cada una de las bandas de las imágenes de las distintas fechas. Los recortes mostrados en la Figura 14 y 15 muestran la porción de cada una de las bandas recortadas de la imagen de 1985 y el modelo digital de elevación. El mismo procedimiento se llevó a cabo con las imágenes de 2000 y 2003.

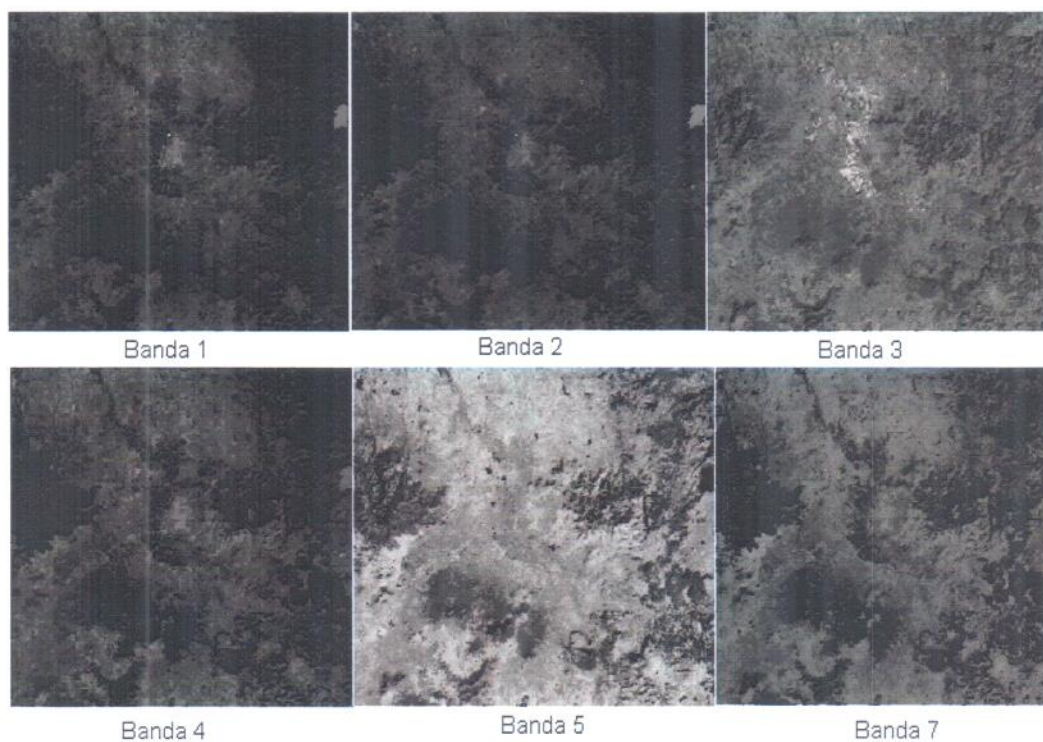
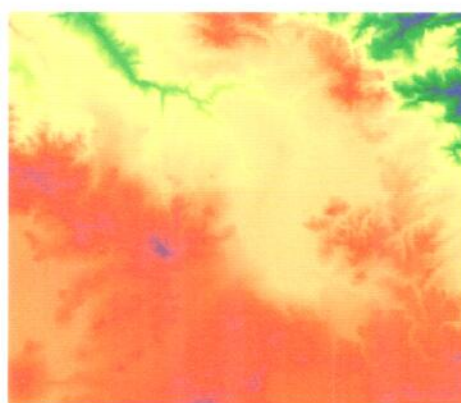


Figura 14. Recorte de la imagen LANDSAT TM del año 1985



Modelo digital de elevación

Figura 15. Modelo digital de elevación

Realces y mejoras de las imágenes

En esta etapa se analizaron las técnicas de realce para mejorar la calidad visual de las imágenes y hacer más evidentes los rasgos de interés.

Se procedió a hacer una composición de color usando las 6 bandas disponibles de cada imagen para obtener mayor calidad visual de las imágenes en el momento del análisis.

La composición útil en esta etapa fue la infrarrojo (falso color) efectuada con la combinación de las bandas 2, 3 y 4 (azul, verde y rojo). En la Figura 16 se aprecia la composición resultante para la clasificación.

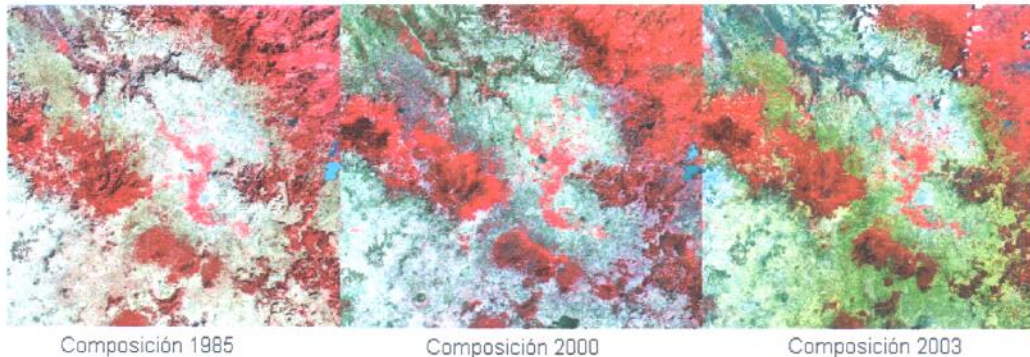


Figura 16. Composición de color para las imágenes TM 1985, ETM+ 2000 y 2003.

4.2.2.2. Clasificación supervisada de imágenes.

Este proceso es el más importante ya que de ello se derivaron los usos de suelo en cada escenario.

Se utilizó el método supervisado que consiste definir áreas de muestreo o campos de entrenamiento sobre las clases de uso y cobertura del suelo. La clasificación supervisada pasó por tres fases.

Fase de identificación de clases

Las clases de uso y cobertura del suelo se definieron sobre las imágenes en composición de color infrarrojo y con apoyo de las ortofotos y cartografía de uso del

suelo y vegetación de la microcuenca. El Cuadro 10 muestra las clases de uso y cobertura del suelo identificadas.

Cuadro 10. Clases de uso y cobertura del suelo identificadas

Id	Clase	Clave
1	Bosque de abies	BA
2	Bosque de pino	BP
3	Bosque de pino-encino	BPq
4	Bosque de encino	BQ
5	Agricultura de riego	AR
6	Agricultura de temporal	AT
7	Otros tipos de vegetación	Otv
8	Áreas urbanas	AU
9	Cuerpos de agua	CA
10	Pastizales inducidos con erosión apreciable	Picea

Fase de asignación de campos de entrenamiento

Por el proceso de digitalización del SIG se asignaron los campos de entrenamiento por clase bajo la restricción de que cada campo debe ser igual o mayor a 10 píxeles por banda. Debido a que se trabajó con 6 bandas el tamaño mínimo del campo por clase fue de 60 o más píxeles por banda. Posteriormente se hizo la caracterización estadística de cada clase usando los módulos MAKESIG y SIGCOMP los cuales crearon los archivos de las firmas espectrales para hacer el análisis de los píxeles identificados en los sitios de entrenamiento de cada clase involucrada, con los datos del vector de sitios de entrenamiento creó análisis estadísticos de los valores de píxeles obtenidos para cada banda.

El gráfico de las firmas se generó con los datos de la media mismos que fueron desplegados en forma de líneas que representan a las firmas de cada clase. En las imágenes de las tres fechas se digitalizaron diferente número de campos de entrenamiento, en 1985, 13 clases, en 2000, 12 clases y en 2003, 14 clases. Debido a que en cada imagen las mismas clases presentaron diferentes niveles de reflectancia.

Fase de clasificación de unidades de uso del suelo

En la clasificación de uso y cobertura del suelo se utilizó el clasificador de Máxima probabilidad (MAXLIKE) el cual usa los datos de la media, la varianza y la covarianza de las firmas espectrales para estimar la probabilidad de que un píxel

pertenezca a una u otra clase (Eastman, 2003). MAXLIKE proporcionó los mapas de uso y cobertura del suelo. Posteriormente fueron recortados reclasificados y codificados con el nombre correspondiente de uso y cobertura del suelo (Leyenda) para hacer el cálculo de las superficies de las clases contenidas.

4.2.2.3. Valoración de la exactitud de la clasificación

Un paso importante dentro del proceso de clasificación es la validación de la misma, la cual permite estimar el error que el usuario produce al momento de hacer la clasificación con respecto a una fuente fiable o debidamente verificada de acuerdo con Henry (1998).

La fuente de referencia que se utilizó fue la carta de uso del suelo y vegetación editada por INEGI en 1985, la clasificación realizada en la imagen de 1985 fue compatible con la fuente de referencia. Para las clasificaciones posteriores no hubo fuente de referencia real solo los recorridos de campo donde se apreció claramente el cambio de uso de suelo que se muestran en los datos de detección de cambios.

El método utilizado para hacer la verificación fue a través de una matriz de confusión, matriz de error o algunas veces llamada tabla de contingencia. Aquí se compara el error producido, categoría por categoría de la fuente de referencia y los resultados correspondientes a la clasificación automatizada del usuario, tales matrices son cuadradas, los datos de la fuente de referencia se disponen en las columnas y los datos del mapa producido se disponen en las hileras, los datos de los píxeles clasificados correctamente se encuentran en la diagonal principal, todos los elementos que no se encuentran en la diagonal representan a los errores de omisión o comisión, los errores de omisión corresponden a los elementos encontrados en las columnas y los de comisión se encuentran en las hileras.

La valoración de la clasificación se realizó generando un mapa vector de puntos de muestreo distribuidos estratificadamente sobre la fuente de uso de suelo, el tamaño de la muestra utilizada fue de 5 % de intensidad sobre cada categoría de uso. De acuerdo con los estudios realizados por Lillesand (1994), señala que aunque existen varios estudios en donde se hacen recomendaciones para elegir el tamaño de muestra apropiado, de manera general menciona que el tamaño sugerido es de 50 muestras por cada tipo de vegetación o categoría, sin embargo si

el área es especialmente grande se recomienda una muestra mayor (75 o 100 muestras por categoría).

Mediante el modulo SAMPLE de Idrisi-K se realizó un muestreo sistemático aplicando una intensidad de muestra del 5% sobre cada clase de uso y cobertura del suelo. Se determinaron 2 195 puntos sobre la fuente de referencia (carta de uso del suelo y vegetación, INEGI, 1985) que se muestran en el Cuadro 11.

A los puntos de muestreo definidos se les asocio un archivo de valores con la clase de uso de suelo real, posteriormente se procedió a convertir el vector de puntos a formato raster para hacerlo compatible con el mapa clasificado por el usuario y poder obtener una respuesta en la matriz de análisis de error proporcionada con el modulo ERRMAT de Idrisi-K.

Este modulo proporciona en su análisis el llamado índice de Kappa en cual es calculado por la siguiente expresión matemática:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} + * x_{+i})} \quad (1)$$

Donde: K es el índice de Kappa, x_{ii} es el número de observaciones en el renglón i y en la columna j y x_{i+} y x_{+i} son los de los totales marginales para el reglón i y la columna i respectivamente. N se refiere al número total de las observaciones.

Para poder utilizar el mapa de referencia se homogeneizó la nomenclatura de las clases de uso del suelo con respecto al mapa de uso y cobertura del suelo producido para 1985. El Cuadro 12 indica las clases de uso del suelo que se encontraron en la fuente de referencia

Cuadro 11. Número de puntos muestreados

CLASE	No. de puntos	Superficie ha.
BA	43	851.13
BP	402	8021.25
BPq	140	2796.75
Bq	539	10775.16
Ar	238	4765.23
At	274	45465.84
Otv	350	6988.86
Au	128	2568.51
Ca	6	116.64
Picea	75	1499.76
TOTAL	2195	83849.13

Cuadro 12. Tipos de uso del suelo y vegetación de la fuente de referencia (carta de uso del suelo y vegetación, INEGI, 1985).

Simbología	Descripción
BA	Bosque de Abies
BC	Bosque cultivado
BJ/VSa	Bosque de tascate con vegetación secundaria arbustiva
BP	Bosque de pino
BP/VSa	Bosque de pino con vegetación secundaria arbustiva
BPQ	Bosque de pino-encino
BPQ/VSa	Bosque de pino encino con vegetación de secundaria arbustiva
BQ	Bosque de encino
BQ/VSa	Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva
BQ/VSa	Bosque de encino con vegetación secundaria arbórea.
BQP	Bosque de encino pino
E-PI	Pastizal inducido
E-TP	Área agrícola permanente
H2O	Cuerpos de agua
MC/MCA	Matorral crassicaule (cardonal)
MC/VSa	Matorral secundaria con vegetación secundaria arbustiva
ML	Chaparral
PI	Pastizal inducido
RAS	Agricultura de riego
TA	Área agrícola de riego
TAP	Área agrícola de temporal permanente
TP	Área agrícola
TPA	Área agrícola de temporal con cultivos anuales y permanentes
ZU	Zonas urbanas

Fuente: Carta de uso del suelo y vegetación, INEGI, 1985.

Una vez que se obtuvo el mapa de referencia con las clases de uso de suelo debidamente identificadas se homogeneizó la leyenda al producido para 1985.

En el Cuadro 13 se presenta una relación de la forma en la que se hizo la agregación de clases.

Cuadro 13. Agregación de clases

Simbología	Agrupación
BA	BA
BP	BP
BC	
BP/VSa	
BPQ	BPQ
BPQ/VSa	
BQP	
BQ	BQ
BQ/VSa	
BQ/VSA	
RAS	Ar
E-PI	At
E-TP	
PI	
TA	
TAP	
TPA	
BJ/VSa	Otv
MC/MCA	
MC/VSa	
ML	
ZU	Au
H2O	Ca
E-PI	Picea

Matrices de confusión

La metodología que se utilizó para la valoración de la exactitud del modelo proporcionó las siguientes matrices de confusión que se encuentran en los, Cuadros 14, 15 y 16.

Cuadro 14. Matriz de confusión para la clasificación de 1985.

Fuente de referencia												Ex.de U.	E. de C.
Clasif.	BA	BP	BPq	Bq	Ar	At	Otv	Au	Ca	Picea	Total		
BA	67	8	3	1	0	2	0	0	0	0	81	0.827	0.173
BP	1	242	29	1	0	17	0	0	0	0	290	0.834	0.166
BPq	0	22	168	10	0	9	0	0	0	0	209	0.804	0.196
Bq	0	58	24	307	4	20	3	0	0	0	416	0.738	0.262
Ar	0	0	0	15	126	11	0	1	0	1	154	0.818	0.182
At	0	28	6	0	70	625	2	2	0	10	743	0.841	0.159
Otv	0	3	6	17	35	68	405	0	0	0	534	0.758	0.242
Au	0	3	6	4	10	16	2	220	0	2	263	0.837	0.163
Ca	0	2	0	0	0	0	0	0	15	0	17	0.882	0.118
Picea	0	0	0	0	1	11	0	2	0	20	34	0.588	0.412
Total	68	366	242	355	246	779	412	225	15	33	2195		
Exatc. Prod.	0.985	0.661	0.694	0.865	0.512	0.802	0.983	0.978	1.000	0.606			
E. de Omision	0.015	0.339	0.306	0.135	0.488	0.198	0.017	0.022	0.000	0.394			
Σ total del usuario			2195										
Σ total del productor			2741										
K. Gral =			0.801										

Cuadro 15. Matriz de confusión para la clasificación de 2000.

Fuente de referencia												Ex.de U.	E. de C.
Clasif.	BA	BP	BPq	Bq	Ar	At	Otv	Au	Ca	Picea	Total		
BA	49	6	3	0	0	2	0	0	0	0	60	0.817	0.183
BP	0	205	25	6	2	20	1	0	0	0	259	0.792	0.208
BPq	1	18	45	2	0	7	0	0	0	0	73	0.616	0.384
Bq	1	26	25	346	19	30	1	1	0	0	449	0.771	0.229
Ar	0	1	0	0	99	12	0	0	0	0	112	0.884	0.116
At	0	39	10	17	70	748	9	2	0	17	912	0.820	0.180
Otv	1	10	3	4	7	35	126	0	0	1	187	0.674	0.326
Au	0	10	3	2	45	15	3	458	0	5	541	0.847	0.153
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1.000	0.000
Picea	0	0	0	1	2	0	0	0	0	21	24	0.875	0.125
Total	52	315	114	378	244	869	140	461	1	44	2098		
Ex. Prod.	0.942	0.651	0.395	0.915	0.406	0.993	1	0.477	1	0.477			
E. de Omision	0.058	0.349	0.605	0.085	0.594	0.007	0	0.523	0	0.513			
Σ total del usuario				2098									
Σ total del productor				2618									
K. Gral. =				0.801									

Cuadro 16. Matriz de confusión de la clasificación de 2003.

Clasif.	Fuente de referencia										Total	Ex. de U.	E. de C
	BA	BP	BPq	Bq	Ar	At	Otv	Au	Ca	Picea			
BA	10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0.833	0.167
BP	1	118	15	8	0	5	0	0	0	0	147	0.803	0.197
BPq	0	24	147	1	0	5	0	0	0	0	177	0.831	0.169
Bq	0	30	15	195	2	25	1	0	0	0	268	0.728	0.272
Ar	0	0	0	0	37	4	0	0	0	2	43	0.860	0.140
At	2	26	12	13	100	720	10	2	1	9	895	0.804	0.196
Otv	0	2	1	3	1	2	41	0	0	0	50	0.820	0.180
Au	0	1	0	0	16	109	1	536	0	4	667	0.804	0.196
Ca	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.000	1.000
Picea	0	1	0	0	0	0	0	0	0	10	11	0.909	0.091
Total	13	203	191	220	156	871	53	538	1	25	1814		
Ex.	0.769	0.581	0.77	0.886	0.237	0.827	0.774	0.996	0	0.4			
E. de Omision	0.231	0.419	0.23	0.114	0.763	0.173	0.226	0.004	1	0.6			
Σ total del usuario				1814									
Σ total del productor				2271									
K. Gral. =				0.799									

4.2.2.4. Evaluación del cambio de uso del suelo

La metodología que se utilizó en la detección de cambios es la llamada comparación postclasificación la cual es una aproximación de clasificaciones de dos fechas procesadas independientemente. Para ello el análisis de imágenes de satélite de la misma región tomadas en distintas fechas (1985, 2000 y 2003) permitieron caracterizar los cambios ocurridos en ellas.

Tasas de cambio de uso del suelo

Para conocer la tasa de cambio de uso del suelo se procedió a hacer el cálculo de las superficies de cada clase para cada una de las fechas (clasificación 1985, clasificación 2000 y clasificación 2003) las cuales fueron empleadas en la ecuación de cambio propuesta por la FAO (1995) para el cálculo de las tasas de deforestación la cual es expresada en porcentaje:

$$tc = \left[1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1 \quad (2)$$

Donde:

tc es la tasa de cambio.

S_1 la superficie de la fecha 1 ha.

S_2 la superficie de la fecha 2 ha.

n la diferencia de años entre una fecha y otra.

Para expresar los valores en términos porcentuales, los resultados se multiplican por 100.

Esta operación se realizó para tener un mejor entendimiento de cuales tipos de vegetación o de uso del suelo han sufrido modificaciones importantes en su superficie para los periodos bajo estudio. A partir de los estadísticos compilados derivados de cada fecha de manera independiente se logra visualizar cual es la tendencia para cada categoría.

4.2.2.5. Predicción de cambios de uso del suelo

Para este fin se eligió un proceso denominado “análisis de cadenas de Markov” y “Autómatas Celulares de Markov” en estos procesos la situación del sistema 2 pudo ser predicho a partir de la situación del sistema 1 proporcionando una matriz de probabilidades de transición de cada clase de cubierta del suelo. La matriz de probabilidades de transición se obtuvo usando la clasificación de dos fechas distintas 1985 y 2003 que expresan la probabilidad de que cada píxel de una clase dada pueda cambiar a otra clase o seguir en la misma en el siguiente periodo. A partir del proceso de Markov se generó la matriz de probabilidades de transición y el de áreas de transición.

Es importante mencionar que estos procesos trabajan con modelos de tipo estocástico que no son más que modelos que hacen predicciones proporcionando salidas que son por lo menos parcialmente aleatorias variadas en el tiempo. En el presente trabajo se utilizó un modelo estocástico correlacionado con el tiempo en

donde los eventos seguidos están posiblemente influidos por el evento anterior y posiblemente por otros (Chow, 1994).

➤ **Análisis de Cadenas de Markov**

El análisis de las cadenas de Markov se basó en la clasificación de uso de suelo de 1985 y en la de 2003 para producir la matriz de probabilidades de transición y la matriz de áreas de transición, como ya se mencionó, la primera registra la probabilidad de que una categoría de uso del suelo pueda pasar a otra, esta es una tabulación cruzada de las dos imágenes ajustada por un error proporcional de 15% recomendado por Eastman (2003) y la matriz de áreas de transición registra el número de píxeles que son esperados que cambien de una categoría a otra en el mismo periodo. La primera matriz, es producto de la multiplicación de cada columna en la matriz de probabilidades de transición por el número de celdas correspondiente al uso de suelo en la imagen de fecha posterior. En ambas matrices los renglones representan las categorías de uso de la imagen de la primera fecha (1985) y en las columnas se disponen las categorías posteriores (2003). No obstante que las cadenas de Markov también producen una serie de imágenes de probabilidad condicional pero estas son muy generales y su uso en la predicción pueden ocasionar confusiones por lo que no fueron empleadas en este trabajo, si no que fue creado un conjunto de mapas de conveniencia a través de evaluación multicriterio.

Matemáticamente las cadenas de Markov se expresan con la siguiente ecuación:

$$V_{t2} = M * V_{t1} \quad (3)$$

Donde V_{t2} es el mapa de salida o el mapa de la posfecha que participa en el calculo de la probabilidad, M es la matriz de transiciones para el intervalo de tiempo (Δt) y V_{t1} es el mapa de clasificación de entrada o el mapa de la primer fecha a partir de la cual se generó la matriz de probabilidades de transición.

Posteriormente viene la matriz de áreas de transición la cual es calculada usando las probabilidades pero ahora sobre los píxeles. El modelo estocástico de Markov hace un cálculo usando los píxeles que son transformados a ha. Tomando en cuenta que el área de un píxel es de 30 m.*30 m., es decir, de 900m². Al igual que en la matriz de probabilidades de transición en las hileras se representan las

superficies de la clasificación base que fue 2003 y las columnas representan la superficie esperada para el año al que se proyectó, que fue al 2015.

➤ **Análisis de Autómatas celulares de Markov**

Una limitante del análisis de cadenas Markov es que no proporciona un sentido geográfico de los cambios, las probabilidades de transición pueden ser exactas en una base por categoría pero no proporciona una distribución espacial de ocurrencias dentro de cada categoría de uso, es decir, no presenta un componente espacial en los resultados. Es por eso que al hacer la modelación se recurrió al modulo CA_MARCKOV el cual añadió el carácter espacial en la modelación.

En Sistemas de Información Geográfica (SIG) este modulo es una extensión del procedimiento de Evaluación Multicriterio, la Evaluación Multicriterio combina a Autómatas celulares (CA) y Cadenas de Markov en el procedimiento de predicción.

CA-MAROV requirió que se le proporcionara la clasificación de la fecha más reciente 2003 como base de partida hacia la predicción futura, la matriz de probabilidades de transición y la de áreas de transición obtenidas de la ejecución del análisis de Cadenas de Markov así como un grupo de mapas de conveniencia, Los mapas de conveniencia son producto de una evaluación multicriterio basada en el problema que se quiere resolver.

• **Evaluación multicriterio**

Se basa en el análisis de decisión que se conceptualiza como el producto de una serie de decisiones de análisis tomadas en base al uso del recurso. La estrategia básica es dividir el problema de decisión e pequeñas partes entendibles; analizar cada parte e integrar las partes de una manera lógica para producir una decisión significativa, Malczweski (1999).

CA_MARKOV utiliza un juego de mapas de conveniencia o "suitability" los cuales no son mas que restricciones y factores que afectan el cambio de uso del suelo del caso de estudio en particular, algunos autores como Schneider y Pontius (2001), Serneels y Lambin (2001) y Pontius *et al.* (2001) han utilizado de alguna manera las

técnicas de análisis multicriterio en sus investigaciones relacionadas con cambios de uso del suelo así como en la predicción de los mismos.

En la Evaluación Multicriterio en primer lugar se tiene que definir el problema al cual se le llama reconocimiento del problema de decisión, esto es establecer la diferencia entre lo deseado y la situación existente de un sistema.

En el presente trabajo el problema es modelar el cambio de uso del suelo a futuro sobre áreas aptas o probables para tal propósito, estas son las que no tienen restricciones físicas, topográficas, regulaciones etc., como son las áreas forestales, agrícolas de temporal. Las que se consideran con restricciones son las que se encuentran ocupadas: como uso urbano, carreteras, cuerpos de agua, cauces, caminos o donde el cambio de uso del suelo para cualquier otro uso es casi nulo debido a pendientes pronunciadas o simplemente porque el suelo está habilitado con algún tipo de infraestructura.

Al hablar de restricciones y factores es importante hacer alusión a los conceptos de estos para lograr mayor claridad al momento de establecerlos.

De acuerdo con Malczewski (1999), una **decisión** es una elección entre varias alternativas.

Análisis de decisión es un grupo de procedimientos sistemáticos para analizar problemas de decisión complejos.

Restricción: una restricción es aquella que regula ciertas combinaciones de variables de decisión como soluciones factibles, son usadas para eliminar de consideración puntos, líneas, polígonos vectores y raster que son caracterizados por ciertos atributos y o valores de atributos, en otras palabras, una restricción es una limitante ya establecida.

Factor: es un criterio que refuerza a disminuye la conveniencia de una alternativa específica para cierta actividad bajo consideración.

Criterio: es un juicio o una regla en la cual las decisiones alternativas son ordenadas de acuerdo a su conveniencia. Es un término genérico que incluye ambos conceptos de atributos y objetivos.

Mapa de criterios: es una capa en una base de datos de un GIS que representa la distribución espacial de un atributo que mide el grado en el cual un objetivo es asociado y realizado. Los mapas de criterios están categorizados como determinísticos y probabilísticos.

La evaluación multicriterio se lleva a cabo mediante dos procedimientos: a la primera se le denomina aproximación booleana o sobre posición de mapas booleanos y la segunda es mediante combinación lineal de pesos, en la primera las restricciones y los factores son manifestaciones lógicas de conveniencia y reducidos por medio de una o mas operaciones lógicas como intersección (Y) y unión (OR). La segunda es conocida como la combinación lineal de pesos (CLW) en donde los criterios continuos o factores son estandarizados a un rango numérico común y combinado por medio de promedios estandarizados. El resultado es un mapa continuo de conveniencia que puede ser enmascarado por una o más restricciones booleanas para adaptar los criterios cualitativos y empezar a producir una decisión final.

Para este trabajo se utilizó el método de aproximación booleana, El Cuadro 27 muestra las restricciones y los factores que se definieron.

Cuadro 17. Mapas de criterios

Restricciones	Factores
Cuerpos de agua	Distancia a caminos
Corrientes de agua	Distancia a centros poblaciones
Áreas habitadas o urbanas	Pendientes
Caminos	

Los mapas de restricciones (cuerpos de agua, corrientes de agua, y caminos) fueron obtenidos de las capas vectoriales que se muestran en el Cuadro 18, de las cartas F14-11 y E14-02 (Cd. De Pachuca y Cd. De México respectivamente).

Cuadro 18. Capas vectoriales, cartas F14-11 y E14-2.

Clave de la capa	Descripción
HIL	Corrientes y vías de conducción y almacenamiento de agua
HIA	Cuerpos de agua
TRL	Vías de Transporte

El mapa de áreas pobladas o urbanas fue obtenido del mapa de uso del suelo de 2003 (clasificación de 2003).

Los mapas de factores (Distancia a caminos y centros poblacionales) fueron generados a partir de los mapas de restricciones y el mapa de pendientes fue obtenido del modelo digital de elevación del área mediante el proceso de análisis de superficie de Idrisi-K, este mapa fue reclasificado y convertido a booleano donde pendientes mayores a 40 % no fueron convenientes para un cambio de uso.

El tratamiento que se les dio a los mapas consistió en homogeneizar el formato de todos los mapas mediante transformación de las capas vectoriales a formato raster, posteriormente se convirtieron a mapas booleanos codificados con 0's y 1's donde los 0's representaron las áreas no convenientes, es decir, espacios ocupados por caminos, cuerpos de agua y áreas poblacionales etc. y los 1's a los espacios sobre los cuales si se puede dar un cambio de uso del suelo, áreas forestales, agrícolas, pastizales, etc.

Para obtener los mapas de factores se utilizaron los mapas de caminos, áreas pobladas y pendiente, a estos se les calculó un área buffer menor o igual a 1 000 m. para caminos y 5 000 m. para centros poblacionales. Posteriormente fueron convertidos a booleanos donde el área buffer representó las áreas convenientes para cambio considerando que sucederá un cambio en áreas forestales, agrícolas y pastizales entre mayor sea la cercanía con centros poblacionales, menor pendiente del terreno y menor distancia a caminos.

Con los mapas generados individualmente de restricciones y factores, estos últimos llevados también a restricciones se conformó el mapa de conveniencia, mismo que fue considerado como una de las variables que utilizó CA_MARKOV para calcular la predicción del cambio de uso del suelo junto con la matriz de probabilidades de transición y la de áreas de transición.

La proyección de cambios de uso del suelo se hizo al año 2015, introduciendo el dato de 12 años de proyección a partir de 2003.

Por último el procedimiento de autómatas celulares de Markov produjo un mapa predictivo de superficies de uso y cubierta forestal que se esperan en 2015 haciendo una comparación con el año base (2003).

De las restricciones (factores y restricciones estandarizados) se obtuvieron las áreas sobre las cuales es probable que ocurra un cambio de uso tales como las áreas cubiertas por bosques (BA, BP, BPq, BQ, AT, Otv y Picea). En las áreas restantes no es probable que ocurra un cambio ya que las áreas urbanas o pobladas ya están construidas, los cuerpos de agua están ubicados en lugares estratégicos con algún objetivo, las áreas de riego se encuentran habilitadas con infraestructura para tal fin.

4.2.2.6. Estimación de superficies potenciales a deforestarse

Este procedimiento se hizo reagrupando las clases con vegetación o áreas con cubierta forestal y con algún uso del mapa que resultó de la clasificación de 2003. Todos los usos se agruparon en dos clases con la finalidad de observar el cambio sobre las áreas con cubierta forestal y calcular la tasa de deforestación.

Para calcular las áreas potenciales a deforestarse se hizo el mismo procedimiento con la clasificación que resultó de la proyección (uso y cobertura del suelo 2015), con el objetivo de establecer el punto de comparación y saber las superficies susceptibles a cambios en su cubierta hacia el 2015.

4.2.3. Escurrimientos superficiales

En la fase de estimación de escurrimientos mediante modelación se analiza la respuesta de la microcuenca en dos escenarios de uso y cobertura del suelo 1985 y 2003 bajo una tormenta de diseño tipo II con un evento extremo de precipitación de 24 horas y un periodo de retorno de 85 años. El análisis de proceso de lluvia a escurrimiento se basa en la teoría del hidrograma unitario sintético tipo triangular del Servicio de Conservación de Suelos usando el software para modelación hidrológica de eventos extremos HEC-HMS versión 2.2.2. Los escurrimientos superficiales se expresan en lámina total en mm. y como gasto o volumen total escurrido, calculado por los hidrogramas unitarios en m³/s en el área de influencia de cada estación y a la salida de la microcuenca.

4.2.3.1. Ajuste de datos de precipitación

Los datos de precipitación máxima de 24 horas fueron ajustados en 5 distribuciones de probabilidad usuales en hidrología, para más detalles ver Aparicio, 2004.

➤ Distribución Gumbel o valores extremos

Los eventos hidrológicos son fenómenos aleatorios en el espacio y tiempo por lo que fue necesario recurrir a las herramientas que ofrece la estadística para ajustar la serie de datos anual de las precipitaciones máximas de 24 horas. La función de distribución de probabilidad que ajusto mejor los datos fue la Gumbel o valores extremos resultando el valor más bajo en la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

La distribución Gumbel o distribución de valores extremos de acuerdo con Gumbel, 1958 supone que si se tienen N muestras, cada una de las cuales contiene n eventos, si se selecciona el máximo de los n eventos de cada muestra es posible demostrar que a medida que n aumenta la función de distribución de probabilidad de X tiende a:

$$F(x) = \exp \left[-e^{\left(\frac{x-\beta}{\alpha} \right)} \right] \quad (4)$$

Y por lo tanto la función de distribución de probabilidad (fdp) se expresa de la siguiente manera:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right) - e^{-\left(\frac{x - \beta}{\alpha} \right)} \right] \quad (5)$$

Donde: α y β son los parámetros de la función a través del método de momentos para muestras pequeñas:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (6)$$

Donde δ_{yy} μ_y son tomadas de tablas en función del tamaño de la muestra $n \leq 100$. Dado que el número de años con datos fue menor a 100 (Cuadro 20) se utilizó la tabla del Cuadro 19.

Cuadro 19. Tabla de valores para muestras relativamente pequeñas

n	μ_y	δ_y
10	0.4952	0.9496
15	0.5128	1.0206
20	0.5236	1.0628
25	0.5309	1.0914
30	0.5362	1.1124
35	0.5403	1.1285
40	0.5436	1.1413
45	0.5463	1.1518
50	0.5485	1.1607
55	0.5504	1.1682
60	0.5521	1.1747
65	0.5535	1.1803
70	0.5548	1.1854
75	0.5559	1.1898
80	0.5569	1.1938
85	0.5578	1.1974
90	0.5586	1.2007
95	0.5593	1.2037
100	0.5600	1.2065

Fuente: Aparicio, 2004.

Los datos ajustados por la distribución Gumbel o valores extremos generaron una altura de precipitación para el periodo de retorno (T_r) de 85 años ya que es el periodo calculado por la CNA para el evento de tormenta de octubre de 1999 que tuvo repercusiones en la población del Valle de Tulancingo.

Cuadro 20. Número de años con registro en cada estación.

Clave de la estación	Nombre	No. de años
13059	Acatlán	19
13061	Alcholoya	20
13094	Acaxochitlán	13
21036	Ahuazotepec	16
13082	Esperanza	21
13099	Metepec	21
21066	P. N. Chign	28
13085	Presa tezoy	15
13031	Santiago T.	17
13116	Sembo	21
13033	Singuilucan	18
13029	San Loren Z.	18

La altura de precipitación (hp) es la cantidad de agua que cae sobre la superficie expresada en lámina con unidades en mm. para este caso, el Cuadro 24 contiene la altura de precipitación ajustada para cada una de las estaciones pluviométricas.

Cuadro 21. Altura de precipitación ajustada

Clave de la estación	Nombre de la estación	hp mm. Tr 85
13059	Acatlan	83.89
13061	Alcholoya	102.04
13094	Acaxochitlan	88.29
21036	Ahuazotepec	71.75
13082	Esperanza	143.96
13099	Metepec	129.38
21066	P. N. Chignahuapan	99.33
13085	Presa Tezoyo	90.116
13031	Santiago	151.46
13116	Sembo	95.37
13033	Singilucan	105.835
13029	San Lorenzo	133.62

hp: altura de precipitación

Tr: Periodo de retorno

4.2.3.2. Métodos indirectos de medición de escurrimientos.

Es muy común que no se cuente con registros adecuados de escurrimientos en el área que se desea someter a análisis. En general los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, además de que no se ven afectados por cambios en la cuenca tales como construcción de obras de almacenamiento o derivación, talas, urbanización, entre otras.

Los métodos indirectos para medir los escurrimientos los constituyen las observaciones de las tormentas, con la particularidad de que los hidrogramas producidos por tormentas varían no solo en la cuenca sino también de tormenta a tormenta y se consideran hidrogramas aislados, sin embargo, dado que es más común contar con información de precipitación es necesario conocer métodos que permitan determinar el escurrimiento mediante las características de la cuenca y la precipitación. Para conocer las características de la cuenca es necesario recurrir a mapas topográficos y de uso del suelo y vegetación, así como tener acceso a datos de pluviómetros o pluviógrafos.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son:

- a. Área de la cuenca
- b. Altura total de precipitación.
- c. Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.)
- d. Distribución de la lluvia en el tiempo.
- e. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Los parámetros para el proceso de conversión de lluvia a escurrimientos de la microcuenca cuya superficies es de 838.43 km^2 , se calcularon de acuerdo a algunas metodologías ya establecidas.

Dado que la altura de precipitación es uno de los parámetros importantes para la estimación de los escurrimientos es preciso calcularla adecuadamente considerando la extensión de la microcuenca.

Existen varios métodos tales como: el método aritmético, polígonos de Thiessen, método de isoyetas entre otros para determinar la precipitación media. Los más

usados son los que determinan la altura de precipitación media de la cuenca considerando el área de influencia de la estación.

➤ **Polígonos de Thiessen**

Las estaciones pluviométricas se encuentran distribuidas uniformemente dentro y fuera del área, 4 dentro de ella y 8 fuera pero con alguna influencia.

Las áreas de influencia de las 12 estaciones se calculó a través del método de polígonos de Thiessen usando el módulo THIESSEN de Idrisi-K para lo cual se distribuyeron las estaciones en el plano geográfico del área de estudio y se transformaron a formato raster.

Este método pondera las observaciones de cada estación, admitiendo que cada una de ellas representa la precipitación media o la total en una fracción de la cuenca delimitada por un polígono.

El método es único para toda la red de estaciones por lo que si varía la altura de precipitación en un polígono solo afectará al polígono en particular. No considera los efectos topográficos pero es probablemente el método más extensamente usado de los disponibles.

El motivo por el cual se eligió este método es porque el área de influencia permanece constante, y presentaron poca variación en pendiente dentro del área. El Cuadro 22 muestra la pendiente de cada una de las áreas.

Además, la pendiente media de la cuenca es de 5% y el 70% de la superficie tiene entre 0 y 2 % por lo tanto no presenta variaciones altitudinales abruptas, solo la estación Sembo y Presa Tezoyo presentan las pendientes mas altas.

La Figura 17 muestra el trazo de los polígonos de Thiessen o áreas de influencia y el Cuadro 23 las superficies sobre las cuales se distribuye la precipitación máxima de 24 horas mostrada en el Cuadro 21.

Cuadro 22. Pendiente de las áreas de influencia o polígonos de Thiessen.

C. de la estación	Nombre de la estación	Pendiente %
13059	Acatlan	7.28
13061	Acaxochitlán	6.34
13094	Alcholoya	1.99
21036	Ahuazotepec	4.82
13082	Esperanza	10.44
13099	Metepec	10.6
21066	P.N.Chignahuapan	5.95
13085	Presa Tezoyo	16.47
13031	Santiago	10.15
13116	Sembo	17.04
13033	Singuilucan	10.64
13029	San Lorenzo	8.25

C. de la estación: Clave de la estación.

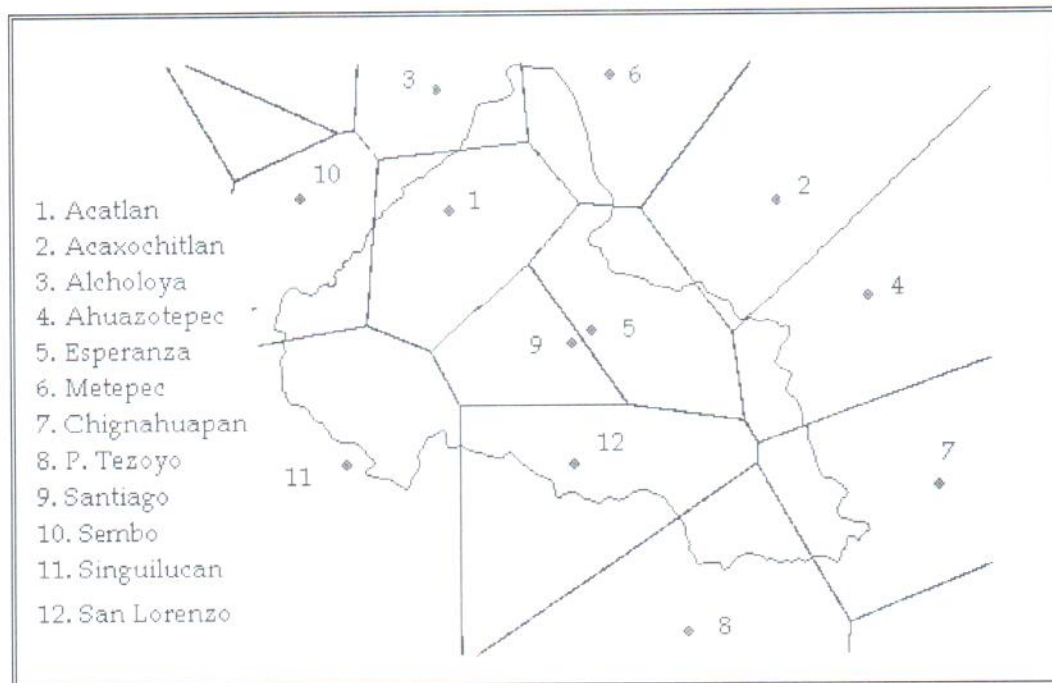


Figura 17. Áreas de influencia mediante Polígonos de Thiessen.

Cuadro 23. Superficies de áreas de influencia o polígonos de Thiessen

No. Polígono	Estación	Superficie ha.	% de ocupación
1	Acatlán	16177.500	19.294
2	Alcholoya	358.560	0.428
3	Acaxochitlán	1783.080	2.127
4	Ahuazotepec	3291.300	3.925
5	Esperanza	13373.010	15.949
6	Metepec	3707.190	4.421
7	P.N.Chignahuapan	4032.900	4.810
8	Presa Tezoyo	4625.820	5.517
9	Santiago	9507.420	11.339
10	Sembo	3130.020	3.733
11	Singuilucan	10817.010	12.901
12	San Lorenzo	13045.320	15.558
		83849.130	100.000

La Precipitación Máxima Media de 24 h. (PMM24 h) se calculó por medio de la ecuación de polígonos de Thiessen:

$$h_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i * h_{pi} \quad (7)$$

Donde:

$\overline{h_p}$ = Altura de precipitación media.

h_{pi} = Altura de precipitación de cada área de influencia o polígono de Thiessen.

A_i = Área de influencia de la estación i en ha..

A_T = Área total de la cuenca en ha..

n = Número de áreas de influencia o polígonos de Thiessen.

Por tanto la PMM24h calculada es de 114.92 mm. para un periodo de retorno de 85 años.

4.2.3.3. Parámetros físicos de la cuenca

Los parámetros físicos de la microcuenca son presentados en esta sección. Fueron obtenidos de análisis detallados de los mapas de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000, el mapa de uso del suelo generado de la clasificación de 2003, y los datos topográficos. Los parámetros de principal interés para la modelación y determinación de los escurrimientos involucran la pendiente media de la cuenca en

porcentaje, longitud del cauce principal en metros, la obtención del número de curva o número de escurrimiento para finalmente llegar al cálculo de tiempo de concentración y el tiempo de retraso que se necesitan para la generar los hidrogramas unitarios sintéticos a partir de los cuales se van a observar los escurrimientos, las pérdidas y el gasto total.

➤ Longitud del cauce principal

La fuente de datos para obtener la longitud del cauce principal fueron los datos vectoriales escala 1:250,000 editados por INEGI en formato digital de las cartas F1411 y E1402 (Ciudad de Pachuca y Cd. De México respectivamente). De ellos se extrajo la capa de corrientes de agua codificada como HIL en ambos casos, posteriormente se unieron las capas y se recortaron con el contorno de la microcuenca para facilitar su manejo en el software.

El cálculo se realizó midiendo el vector desde el inicio de la cuenca (sur) hasta la salida (Norte).

➤ Pendiente de la microcuenca

La pendiente se calculó usando los datos vectoriales de las curvas de elevación, para ello se trazaron 6 líneas de la parte más alta de la microcuenca hacia la de menor elevación, se midieron las distancias y se ponderaron los resultados para obtener la pendiente media de la microcuenca. En el Cuadro 24 se resume la pendiente media de la microcuenca y longitud del cauce principal.

Cuadro 24. Pendiente media y longitud del cauce principal.

Parámetro	Valor
Pendiente media de la cuenca	5 %
Longitud del cauce principal	59.836 km.

4.2.3.4. Número de curva (NC) de escurrimiento del SCS

En la determinación de los escurrimientos por este método interviene el número de curva, el cual fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) basados en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes áreas de los Estados Unidos.

El método supone que la altura de la lluvia total P se relaciona con la altura de la lluvia efectiva Pe . Por tanto los números de curva se expresan algebraicamente de la siguiente manera:

$$Pe = \frac{P - \frac{508}{NC} + 5.08}{P + \frac{2032}{NC} - 20.32} \quad (8)$$

Donde: Pe = es la lluvia efectiva

P = es la altura de lluvia total

N = Número de escurrimientos cuyo valor depende del tipo de suelo, cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la precipitación antecedente.

El número de curva es un índice que representa la combinación de los grupos hidrológicos del suelo, el uso y la clase de tratamiento de la tierra. Análisis empíricos condujeron a deducir que el NC es función de tres factores: clase del suelo, la cobertura y las condiciones de humedad antecedente (de 5 días).

Clasificación hidrológica: el SCS clasificó hidrológicamente más de 4 000 tipos de suelos basándose en su potencial de escurrimiento. Fueron agrupados en grupos de suelos cuya identificación fue con las letras A, B, C y D (Cuadro 25).

Cuadro 25. Características de los grupos de suelo del SCS.

Grupo de suelo	Característica
A	Potencial de escurrimiento bajo. Suelos con altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos, principalmente arenas y gravas muy bien ordenadas. Suelos con alta transmisión de agua.
B	suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua.
C	Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente son suelos que contienen una capa que impide el movimiento hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Tienen baja transmisión de agua.
D	Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos. Se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisión de agua muy baja.

Uso y tratamiento del suelo: el uso del suelo está asociado a las coberturas forestales y vegetales de la cuenca como son el tipo de vegetación, los usos agrícolas, tierras en descanso, superficiales impermeables y áreas urbanas. El tratamiento del suelo se aplica a las prácticas mecánicas como perfilado de curvas de nivel propias del uso agrícola, y prácticas de manejo como controles de pastoreo y rotación de cultivos.

En suelos cultivados se identifican tierras de descanso, praderas, cultivos de hilera, cultivos de granos, rotaciones (pobre, regular y buena), cultivos en hileras rectas, vegetales sembrados cercanamente, campos sembrados a lo largo de la curva de nivel y cultivos terráceos.

Condición hidrológica del suelo: El tipo de vegetación y la cobertura de la cuenca tienen una gran influencia en la capacidad de infiltración del suelo. El porcentaje se estima cualitativamente en los planos respectivos.

Pobre = menos del 50% del área cubierta por pasto. Alta intensidad de pastoreo.

Regular = 50 al 75 % del área cubierta por pasto. Intensidad media de pastoreo.

Buena = mayor al 75 % cubierta por pasto. Intensidad ligera de pastoreo.

La condición hidrológica para los bosques se determina también cualitativamente de la siguiente manera:

Pobre: Bosques regularmente quemados con pocos arbustos y poco humus vegetal.

Regular: Con algunos arbustos, moderada cantidad de humus vegetal y pastos.

Buena: Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie.

Los números de curva de tablas se determinan considerando las características anteriormente descritas entrando en la tabla desglosada en el Cuadro 26 por el uso del suelo y la clasificación hidrológica se determinó en base a las clases texturales y la condición hidrológica en base al porcentaje de área cubierta de vegetación. No se hizo corrección en la curva por condición de humedad antecedente ya que se trata del análisis de datos de un evento de precipitación extremo en un periodo pico de lluvia donde se considera saturado el suelo.

Cuadro 26. Números de curva del SCS

Descripción de uso del suelo	% de permeabilidad	Número de curva del grupo de suelo hidrológico
Áreas abiertas, parques, césped, campos de Golf, cementerios, etc.		A B C D
Óptimas condiciones: cobertura de pastos en 75 % del área o más.		39 61 74 80
Condiciones aceptables: cobertura de pastos de 50 a 75 % del área		49 69 79 84
Condición pobre: cobertura de pastos menor del 50 % del área.		68 79 86 89
parqueaderos pavimentados, techos, accesos , etc.		98 98 98 98
Calles y carreteras		98 98 98 98
Grava		76 85 89 91
Tierra		72 82 87 89
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		83 89 92 93
Áreas empresariales y comerciales	85	89 92 94 95
Distritos industriales	72	81 88 91 93
Hileras de casas, poblados y áreas residenciales con tamaño de 1/8 de acre o menos.	65	77 85 90 92
Residencial: Tamaño promedio del lote		
1/4 de acre	38	61 75 83 87
1/3 de acre	30	57 72 81 86
1/2 de acre	25	54 70 80 85
1 acre	20	51 68 79 84
2 acre	12	46 65 77 82
Desarrollo de áreas urbanas (vegetación establecida) áreas recientemente clasificadas.		77 86 91 94

Cobertura		Condición hidrológica	Número de curva del grupo de suelo hidrológico.
Uso del suelo	Tratamiento o práctica		A B C D
Suelo agrícola cultivado			
Barbecho	Surcos rectos		77 86 91 94
	Labranza de conservación	Pobre	76 85 90 93
	Labranza de conservación	Buena	74 83 88 90
Cultivos en línea	Surcos continuos	Pobre	72 81 88 91
	Surcos continuos	Buena	67 78 85 89
	Labranza de conservación	Pobre	71 80 87 90
	Labranza de conservación	Buena	64 75 82 85
	Contorneado	Pobre	70 79 84 88
	Contorneado	Buena	65 75 82 86
	Contorneado y conservación	Pobre	69 78 83 87
	Cultivos	Buena	64 74 81 85

	Contorneado y terrazas	Pobre	66 74 80 82
	Contorneado y terrazas	Buena	62 71 78 81
	Contorneados y terrazas	Pobre	65 73 79 81
	Y cultivos de conservación	Buena	61 70 77 80
Granos pequeños	Surcos continuos	Pobre	65 76 84 88
	Surcos continuos	Buena	63 75 83 87
	Cultivos de conservación	Pobre	64 75 83 86
	Cultivos de conservación	Buena	60 72 80 84
	Contorneado	Pobre	63 74 82 85
	Contorneado	Buena	61 73 81 84
	Contorneado y conservación	Pobre	62 73 81 84
	Cultivos	Buena	60 72 80 83
	Contorneado y terrazas	Pobre	61 72 79 82
	Contorneado y terrazas	Buena	59 70 78 81
	Contorneado y terrazas	Pobre	60 71 78 81
	Y cultivos de conservación	Buena	58 69 77 80
Leguminosas o praderas con rotación de cultivos	Surcos rectos	Pobre	66 77 85 89
	Surcos rectos	Buena	58 72 81 85
	Contorneo	Pobre	64 75 83 85
	Contorneo	Buena	55 69 78 83
	Contorneo y terrazas	Pobre	63 73 80 83
	Contorneo y terrazas	Buena	51 67 76 80
Tierra agrícola no cultivada áreas de pastoreo	Tratamiento no mecanizado	Pobre	68 79 86 89
	Tratamiento no mecanizado	Media	49 69 79 84
	Tratamiento no mecanizado	Buena	39 61 74 80
	Contorneado	Pobre	47 67 81 88
	Contorneado	Media	25 59 75 83
	Contorneado	Buena	6 35 70 79
Pradera permanente		—	30 58 71 78
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o residuos		Pobre	55 73 82 86
		Media	44 65 76 82
		Buena	32 58 72 79
Matorral		Pobre	48 67 77 83
		Buena	20 48 65 73

Bosque		Pobre	45 66 77 83
		Media	36 60 73 79
		Buena	25 55 70 77
Granjas		–	59 74 82 86
Bosques-rangos herbáceas		Pobre	79 86 92
		Media	71 80 89
		Buena	61 74 84
Robles-álamos		Pobre	65 74
		Media	47 57
		Buena	30 41
Juniperus-pastos		Pobre	72 83
		Media	58 73
		Buena	41 61
Salvia-pastos		Pobre	67 80
		Media	50 63
		Buena	35 48

Fuente: McCuen Richard H, 2005.

Ponderación del número de curva

Es muy común encontrar áreas no homogéneas o poco homogéneas sobre todo en cuencas con superficies grandes, donde hay diferentes usos y coberturas del suelo o un solo uso con diferentes grados de coberturas, es estos lugares es preciso recurrir a alguna expresión que ayude a obtener una aproximación del número de curva correcto.

McCuen (2005) muestra como hacer una aproximación más exacta del número de curva cuando nos encontramos ante una situación de esta naturaleza, por ejemplo, para ponderar el valor del número de curva de suelos de uso urbano con diferentes proporciones de espacios abiertos y porcentajes de impermeabilidad existe una relación que hace una aproximación:

$$CN_w = CN_p(1 - f) + f(98) \quad (9)$$

Donde: CN_w es la ponderación del valor de CN que se busca.

CN_p es el número de curva de la porción impermeable.

f = es la fracción impermeable del área

98 = es el uso de suelo con numero de suelo muy impermeable.

Existe otra relación que se utiliza de manera general para ponderación del valor del número de curva:

$$CN_w = \frac{\sum_{i=1}^n A_i CN_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \sum_{i=1}^n (A_i / A_T) CN_i = \sum_{i=1}^n w_i CN_i \quad (10)$$

A_i = es el área asociada al número de curva CN_i

A_T = es el área total de drenaje

w_i = es la ponderación aplicada al CN_i

Determinación del número de curva (NC)

Para la determinación de los NC se realizó una relación empírica de la textura de cada tipo de suelo existente en cada uso que resultó de la clasificación de 1985 y 2003, así mismo se utilizó la imagen de satélite de cada fecha y la carta de uso del suelo y vegetación disponible para determinar la condición hidrológica.

Para este fin, las áreas que se utilizaron como unidades de trabajo fueron las áreas de influencia de las estaciones o polígonos de Thiessen ya que la fragmentación de la superficie ayuda en la manipulación de la información. Las áreas de influencia de cada uno de los polígonos se uso para sobreponerlo sobre los usos, tipo y textura del suelo y así determinar el NC correspondiente. En el Cuadro 27 y 28 se muestra el número de curva ponderado el cual se calculó para cada escenario, 1985 y 2003. La ponderación se realizó en base a la formula de ponderación propuesta por McCuen (2005) debido a que la cuenca no es homogénea, la ecuación que usó para ponderar el valor del número de curva fue la número (10).

Cuadro 27. Número de curva para cada uso y cobertura de suelo, 1985.

ESTACIÓN		ACATLAN		% de Textura		C. Hidrológica	NC		NC ponderado	NC Por/Est.
U. de sue.	Sup. ha.	% Sup.	Tex. de suelo	%Media	%Fina	Buena	B	C		
BA	6.21	0.000	Media	1		Pobre	66		66.0	78.4
BP	509.58	3.10	Media	1		Media	60		60.0	
BPq	561.51	3.50	Media	1		Buena	60		60.0	
BQ	1109.07	6.90	Media Fina	0.95	0.05	Media	60	73	60.7	
AR	2315.79	14.30	Media Fina	0.03	0.97	Media	78	85	84.7	
AT	9455.04	58.40	Media Fina	0.6	0.4	Pobre	79	86	81.8	
Otv	1478.43	9.10	Fina		1	Media		77	77.0	
AU	365.22	2.30	Media Fina	0.5	0.5	Pobre	79	86	82.5	
CA	69.03	0.40								
Picea	307.62	1.90	Fina		100	Pobre		71	71.0	
Subtotal	16177.5									
ESTACION ACAXOCHITLAN										
BA	2.07	0.60	Media	1		Buena	55		55	65.1
BP	18.81	5.20	Media	1		Buena	55		55	
BPq	14.94	4.20	Media	1		Buena	55		55	
BQ	33.48	9.30	Media	1		Media	60		60	
AT	232.53	64.80	Media	1		Pobre	74		74	
Otv	23.85	6.60	Media	1		Buena	48		48	
AU	1.53	0.40	Media	1		Media	69		69	
Picea	31.59	8.80	Media	1		Pobre	71		71	
Subtotal	358.8									
ESTACION ALCHOLOYA										
BQ	1.8	0.10	Media	1		Media	60		60	80.7
AR	146.34	8.20	Media	1		Buena	83		83	
AT	1433.07	80.40	Media Fina	0.98	0.02	Media	81	88	81.14	
AU	126.72	7.10	Media	1		Pobre	79		79	
Otv	16.11	0.90	Media		1	Pobre		77	77	
CA	1.44	0.10								
Picea	57.6	3.20	Media	1		Pobre	71		71	
Subtotal	1783.08									
ESTACION AHUAZOTEPEC										
BA	38.16	1.20	Media	1		Buena	55		55	66.6
BP	592.02	18.00	Media	1		Buena	61		61	
BPq	343.8	10.40	Media	1		Buena	61		61	
BQ	632.97	19.20	Media Fina	0.8	0.2	Media	60	73	62.6	
AT	1535.58	46.70	Media Fina	0.85	0.15	Buena	71	78	72.05	
Otv	103.6	3.10	Media		1	Buena		65	65	
AU	30.6	0.90	Media Fina	0.95	0.05	Media	69	79	69.5	
Picea	14.31	0.40	Media	1		Media	58		58	
Subtotal	3291.04									

ESTACIÓN ESPERANZA										
BP	145.62	1.10	Media		1		Media	60		60.0
BPq	67.32	0.50	Media		1		Media	60		60.0
BQ	654.93	4.90	Media		1		Media	60		60.0
AR	612.81	4.60		Fina		1	Buena	78		78.0
AT	8061.3	60.30	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	74	80	77.0
Otv	2555.19	19.10	Media	Fina	0.7	0.3	Pobre	67	77	70.0
AU	931.86	7.00	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	79	86	82.5
CA	22.32	0.20								
Picea	321.66	2.40	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	58	71	64.5
Subtotal	13373.01									
ESTACIÓN METEPEC										
BQ	3.42	0.10	Media		1		Buena	55		55
AR	265.86	7.20	Media	Fina	0.5	0.6	Buena	78	85	90.0
AT	3016.98	81.40	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	76	84	80.0
Otv	219.33	5.90	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	67	77	72.0
AU	34.2	0.90	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	79	86	82.5
CA	12.15	0.30								
Picea	155.25	4.20		Fina		1	Pobre		71	71.0
SUBTOTAL	3707.19									
ESTACION PN_CHIGNAHUAPAN										
BA	202.41	5.00	Media		1		Buena	55		55.0
BP	916.92	22.70	Media	Fina	0.75	0.25	Buena	55	70	58.8
BPq	83.25	2.10	Media		1		Buena	55		55.0
BQ	846.36	21.00	Media	Fina	0.9	0.1	Regular	60	73	61.3
AT	1930.77	47.90	Media	Fina	0.75	0.25	Regular	71	78	72.8
Otv	15.12	0.40	Media	Fina	0.6	0.5	Regular	58	73	71.3
AU	14.31	0.40	Media		1		Pobre	58		58.0
Picea	23.76	0.60	Media		1		Pobre	71		71
Subtotal	4032.9									
ESTACIÓN PRESA TEZOYO										
BA	64.17	1.40		Fina	0.5	0.5	Buena	55	70	62.5
BP	582.3	12.60	Media		1		Buena	55		55.0
BPq	39.51	0.90	Media	Fina	0.95	0.05	Pobre	60	73	60.7
BQ	821.25	17.80	Media	Fina	0.98	0.02	Regular	66	77	66.2
AT	2922.03	63.20	Media	Fina	0.96	0.04	Pobre	76	84	76.3
Otv	48.87	1.11	Media		1		Pobre	58		58.0
AU	12.33	0.30	Media	Fina	0.98	0.02	Pobre	79	86	79.1
Picea	135.36	2.90	Media		1		Pobre	58		58.0
Subtotal	4625.82									

ESTACION SANTIAGO											
BP	150.66	1.60	Media		1		Buena	55		55.0	76.3
BPq	277.47	2.90	Media		1		Buena	55		55.0	
BQ	933.12	9.80	Media		1		Regular	60		60.0	
AR	1353.42	14.20		Fina		1	Buena		85	85.0	
AT	4455.9	46.90	Media	Fina	0.75	0.25	Pobre	79	86	80.8	
Otv	1412.1	14.90	Media			1	Pobre		67	67.0	
AU	814.59	8.60	Media	Fina	0.02	0.98	Pobre	79	86	85.9	
CA	3.87										
Picea	106.29	1.10	Media	Fina	0.99	0.01	Pobre	58	71	58.1	
Subtotal	9507.42										
ESTACION SEMBO											
BA	170.55	5.40	Media		1		Buena	55		55.0	53.5
BP	1524.6	48.70	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	136.89	4.40	Media		1		Buena	55		55.0	
BQ	876.69	28.00	Media		1		Buena	55		55.0	
AT	372.15	11.90	Media	Fina	0.8	0.2	Buena	35	70	42.0	
Otv	24.21	0.80	Media		1		Buena	48		48.0	
AU	13.32	0.40	Media		1		Media	69		69.0	
Picea	11.43	0.40	Media		1		Pobre	58		58.0	
Subtotal	3129.84										
ESTACION SINGUILUCAN											
BA	165.6	1.50	Media		1		Buena	55		55.0	65.0
BP	1727.82	16.00	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	426.42	3.90	Media	Fina	0.96	0.04	Buena	55	70	55.6	
BQ	1776.24	16.40	Media	Fina	0.6	0.5	Media	60	73	72.5	
AT	5553.72	51.30	Media	Fina	0.5	0.5	Media	59	75	67.0	
Otv	629.82	5.80	Media		1		Media	58		58.0	
AU	221.04	2.00	Media	Fina	0.85	0.15	Media	69	79	70.5	
CA	4.41	0.000									
Picea	311.94	2.90	Media	Fina	0.02	0.98	Pobre	58	71	70.7	
Subtotal	10817.0										
ESTACION SAN LORENZO											
BA	201.87	1.50	Media		1		Buena	55		55.0	61.6
BP	1923.66	14.70	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	845.01	6.50	Media		1		Media	60		60.0	
BQ	3086.37	23.70	Media		1		Pobre	66		66.0	
AT	6497.	49.80	Media	Fina	0.85	0.15	Media		75	61.4	
Otv	354.78	2.70	Media	Fina	0.94	0.06	Pobre	67	77	67.6	
AU	113.4	0.90	Media	Fina	0.85	0.15	Media	69	79	70.5	
Picea	22.95	0.20		Media	1		Pobre	58	71	58.0	
Subtotal	13045.3										
TOTAL	83848.9										

Cuadro 28. Número de curva para cada uso y cobertura de suelo, 2003.

ESTACIÓN ACATLAN				% de Textura		C. Hidrológica	NC		NC Ponderado	NC Pond/est
U. de Sue.	Sup. ha.	% Sup.	Tex. de suelo	%Media	%Fina	Buena	B	C		
BP	638.1	3.90	Media	1		Buena	60		60.0	79.1
BPq	379.71	2.30	Media	1		Buena	60		60.0	
BQ	789.84	4.90	Media Fina	0.95	0.05	Media	60	73	60.7	
AR	1267.7	7.80	Media Fina	0.03	0.97	Media	78	85	84.8	
AT	11558	71.40	Media Fina	0.6	0.4	Pobre	79	86	81.8	
Otv	247.95	1.50	Fina		1	Media		77	77.0	
AU	1195.2	7.40	Media Fina	0.5	0.5	Pobre	79	86	82.5	
CA	91.71	0.60								
Picea	9	0.10	Fina		1	Pobre		80	80.0	
Subtotal	16178									
ESTACION ACAXOCHITLAN										
BP	15.3	4.30	Media	1		Buena	55		55.0	70.7
BPq	9.72	2.70	Media	1		Buena	55		55.0	
BQ	31.86	8.90	Media	1		Media	60		60.0	
AT	273.78	76.40	Media	1		Pobre	74		74.0	
Otv	6.39	1.80	Media	1		Buena	48		48.0	
AU	21.51	6.0	Media	1		Media	69		69	
Subtotal	358.56									
ESTACION ALCHOLOYA										
AR	37.98	2.10	Media	1		Buena	83		83.0	80.6
AT	1527.6	85.70	Media Fina	0.98	0.02	Media	81	88	81.1	
AU	12.15	0.70	Media	1		Pobre	79		79.0	
Otv	204.21	11.50	Media	1		Pobre		77	77.0	
CA	0.99	0.10	Fina		1					
Picea	0.18	0.00	Media	1		Pobre		71	71.0	
Subtotal	1783.1									
ESTACION AHUAZOTEPEC										
BA	0.63	0.00	Media	1	1	Buena	55		55	68.3
BP	276.12	8.40	Media	1		Buena	61		61.0	
BPq	281.43	8.60	Media	1		Buena	61		61.0	
BQ	569.79	17.30	Media Fina	0.8	0.2	Media	60	73	62.6	
AT	1985.5	60.30	Media Fina	0.85	0.15	Buena	71	78	72.1	
Otv	48.69	1.50	Media	1		Buena		65	65.0	
AU	128.34	3.90	Media Fina	0.95	0.05	Media	69	79	69.5	
Picea	0.81	0.00	Media	1		Media	58		58.0	
Subtotal	3291.3									

ESTACIÓN ESPERANZA											
BP	75.51	0.60	Media		1		Media	60		60.0	77.2
BPq	50.04	0.40	Media		1		Media	60		60.0	
BQ	336.42	2.50	Media		1		Media	60		60.0	
AR	303.12	2.30		Fina		1	Buena	78		78.0	
AT	9131.7	68.30	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	74	80	77.0	
Otv	459.99	3.40	Media	Fina	0.7	0.3	Pobre	67	77	70.0	
AU	2978.8	22.30	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	79	86	82.5	
CA	0.63	0.00		Fina		1					
Picea	36.81	0.30	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	58	71	64.5	
Subtotal	13373										
ESTACIÓN METEPEC											
BQ	0.27	0.00									81.0
AR	239.04	6.40	Media	Fina	0.5	0.6	Buena	78	85	90.0	
AT	2745.9	74.10	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	76	84	80.0	
Otv	24.21	0.70	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	67	77	72.0	
AU	671.94	18.10	Media	Fina	0.5	0.5	Pobre	79	86	82.5	
CA	1.35	0.00		Fina		1					
Picea	24.48	0.70		Fina		1	Pobre		71	71.0	
Subtotal	3707.2										
ESTACION P. N_CHIGNAHUAPAN											
BA	37.08	0.90	Media		1		Buena	55		55.0	66.6
BP	595.44	14.80	Media	Fina	0.75	0.25	Buena	55	70	58.8	
BPq	292.86	7.30	Media		1		Buena	55		55.0	
BQ	675.18	16.70	Media	Fina	0.9	0.1	Regular	60	73	61.3	
AT	2351.3	58.30	Media	Fina	0.75	0.25	Regular	71	78	72.8	
OTV	41.13	1.00	Media	Fina	0.6	0.5	Regular	58	73	71.3	
AU	37.44	0.90		Fina	1		Buena	61			
PICEA	2.43	0.10	Media		1		Pobre	58		58.0	
Subtotal	4032.9										
ESTACIÓN PRESA TEZOYO											
BA	5.94	0.10	Media		1		Buena	55		55.0	73.2
BP	202.95	4.40	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	99.99	2.20	Media	Fina	0.95	0.05	Pobre	60	73	60.7	
BQ	573.03	12.40	Media	Fina	0.98	0.02	Regular	66	77	66.2	
AT	3363.4	72.70	Media	Fina	0.96	0.04	Pobre	76	84	76.3	
Otv	173.25	3.70	Media		1		Pobre	58		58.0	
AU	198.54	4.30	Media	Fina	0.98	0.02	Pobre	79	86	79.1	
Picea	8.73	0.20	Media		1		Pobre	58		58.0	
Subtotal	4625.8										

ESTACION SANTIAGO											
BP	218.88	2.30	Media		1		Buena	55		55.0	78.6
BPq	188.55	2.00	Media		1		Buena	55		55.0	
BQ	709.83	7.50	Media		1		Regular	60		60.0	
AR	608.58	6.40		Fina		1	Buena		85	85.0	
AT	6037.8	63.50	Media	Fina	0.75	0.25	Pobre	79	86	80.8	
Otv	328.77	3.50	Media			1	Pobre		67	67.0	
AU	1395.5	14.70	Media	Fina	0.02	0.98	Pobre	79	86	85.9	
Picea	19.44	0.20	Media	Fina	0.99	0.01	Pobre	58	71	58.1	
Subtotal	9507.4										
ESTACION SEMBO											
BA	13.32	0.40	Media		1		Buena	55		55.0	52.4
BP	1109.4	35.40	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	460.26	14.70	Media		1		Buena	55		55.0	
BQ	885.06	28.30	Media		1		Buena	55		55.0	
AT	624.87	20.00	Media	Fina	0.8	0.2	Buena	35	70	42.0	
Otv	20.52	0.70	Media		1		Buena	48		48.0	
AU	8.82	0.30	Media		1		Media	69		69.0	
Picea	7.56	0.20	Media		1		Pobre	58		58.0	
Subtotal	3129.8										
BA	113.4	1.00	Media		1		Buena	55		55.0	65.7
BP	912.24	8.40	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	584.82	5.40	Media	Fina	0.96	0.04	Buena	55	70	55.6	
BQ	1239.4	11.50	Media	Fina	0.6	0.5	Media	60	73	72.5	
AT	7408	68.50	Media	Fina	0.5	0.5	Media	59	75	67.0	
Otv	276.66	2.60	Media		1		Media	58		58.0	
AU	258.39	2.40	Media	Fina	0.85	0.15	Media	69	79	70.5	
CA	0.9	0.00		Fina		1				0.0	
Picea	23.22	0.20	Media	Fina	0.02	0.98	Pobre	58	71	70.7	
Subtotal	10817										
ESTACION SAN LORENZO											
BA	150.93	1.20	Media		1		Buena	55		55.0	62.1
BP	876.78	6.70	Media		1		Buena	55		55.0	
BPq	1244.8	9.50	Media		1		Media	60		60.0	
BQ	2424.1	18.60	Media		1		Pobre	66		66.0	
AT	7448.6	57.10	Media	Fina	0.85	0.15	Media	59	75	61.4	
Otv	463.14	3.60	Media	Fina	0.94	0.06	Pobre	67	77	67.6	
AU	436.77	3.30	Media	Fina	0.85	0.15	Media	69	79	70.5	
Picea	0.27	0.00		Media	1		Pobre	58	71	58.0	
SUBTOTAL	13045										
TOTAL	83848.9										

4.2.3.5. Tormenta diseño

La tormenta diseño es una tormenta generada sintéticamente, consiste en distribuir hipotéticamente la cantidad de lluvia precipitada en un cierto periodo de tiempo definido. (Montenegro, 1993).

La tormenta diseño es muy útil para analizar la respuesta de la cuenca y de sus obras hidráulicas ante la posible presencia de un evento que empieza a ser extremo.

Este tipo de tormenta es muy utilizado en los Estado Unidos de América para analizar el efecto de las inundaciones en una región determinada de acuerdo a una tipología de tormentas presentada en el Cuadro 29.

A la distribución hipotética de la precipitación se le llama hietograma de lluvia o de precipitación, que no es más que una gráfica de profundidad de lluvia o intensidad en función del tiempo. Por tanto los hietogramas de diseño son la base de una tormenta de diseño y se construyen determinando la secuencia temporal de las tormentas típicas, para ello se han desarrollado relaciones de distribución temporal para tormentas fuertes en áreas grandes y así se han desarrollado patrones de distribución temporal para grupos de probabilidad desde los mas severos hasta los menos severos, (Chow, 1994). A este tipo de hietogramas se les denomina hietogramas sintéticos de precipitación.

➤ Hietograma sintético de precipitación

El Servicio de Conservación de Suelos, ahora conocido como el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) por sus siglas en ingles, desarrolló hietogramas sintéticos de tormentas utilizando un análisis de registro de tormentas con duraciones de tormentas de 6 y 24 horas. El SCS generó 4 tormentas de 24 hr. De duración correspondiente a cada región de los Estados Unidos llamados Tipo I, IA, II y III.

El tipo I y IA corresponde al clima marítimo del pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. El tipo III corresponde al Golfo de México y las áreas costeras del Atlántico, donde las tormentas tropicales producen lluvias de 24 horas muy grandes y el tipo II corresponde a áreas ubicadas en el centro del país donde las variaciones climáticas no están influenciadas por los vientos húmedos de las costas. El Cuadro

29 muestra los valores de los tipos de tormentas y la Figura 21 muestran la distribución geográfica de los tipos de lluvia.

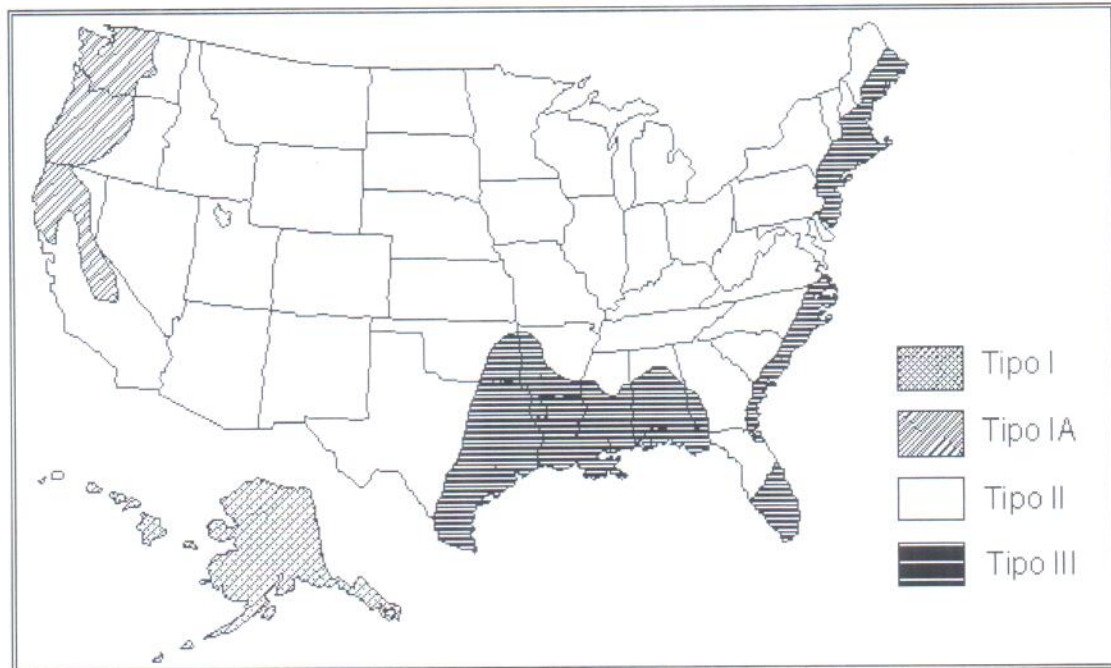
La tormenta diseño se calculó en base a la deducción del hietograma de precipitación con la distribución de tormenta tipo II (Cuadro 29) del SCS. Se utilizó este tipo de tormenta debido a la ubicación del área de estudio, zona centro del país donde no hay influencia directa de climas marítimos con inviernos húmedos y veranos secos, ni climas de ambientes costeros, sino por el contrario como la clasificación de climas obtenida de CONABIO,1998 lo indica, el clima que predomina es el templado subhúmedo con lluvias en verano, una porción menor de clima semiárido templado con lluvias en verano y en menor proporción se presenta un clima templado semifrío solo en las partes de mayor elevación de la microcuenca.

Cuadro 29. Distribución de lluvia del SCS

Distribuciones de lluvia de SCS					
Tormenta de 24 hr.					
pt/24					
Hora t	t/24	Tipo I	Tipo IA	Tipo II	Tipo III
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020
4	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043
5	0.208	0.125	0.206	0.080	0.072
7	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089
8	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115
8.5	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130
9	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148
9.5	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178
10	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189
10.5	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216
11	0.458	0.624	0.624	0.235	0.250
11.5	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298
11.75	0.490	0.669	0.655	0.357	0.339
12	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500
12.5	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702
13	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751
13.5	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785
14	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811
16	0.667	0.830	0.800	0.880	0.886
20	0.833	0.926	0.906	0.952	0.957
24	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Pt/24: Precipitación de 24 h.

El hietograma de precipitación sintético con la tormenta tipo II del Cuadro 29 y la altura de PMM24h. obtenida con la ecuación (7) se distribuyó en 24 horas como se muestra en el Cuadro 30.



Fuente: U.S. Depto. de Agricultura, Servicio de Conservación de Suelos, 1973,1986. citado por Chow,1994.

Figura 18. Distribución espacial de lluvia de 24 h. del SCS (Fuente: Depto. de Agricultura, Servicio de Conservación de Suelo, 1986) citado por Chow, 1994.

Cuadro 30. Hietograma de precipitación y curva masa

85 Años de Tr			
Hora t	Lluvia tipo II	Curva masa mm.	Hietograma mm.
0	0.000	0.000	0.000
2	0.022	2.528	2.528
4	0.048	5.516	2.988
5	0.080	9.194	3.677
7	0.098	11.262	2.069
8	0.120	13.790	2.528
8.5	0.133	15.284	1.494
9	0.147	16.893	1.609
9.5	0.163	18.732	1.839
9.75	0.172	19.766	1.034

Continuación del cuadro anterior

85 Años de Tr			
Hora t	Lluvia tipo II	Curva masa mm.	Hietograma mm.
10	0.181	20.801	1.034
10.5	0.204	23.444	2.643
11	0.235	27.006	3.563
11.5	0.283	32.522	5.516
11.75	0.357	41.026	8.504
12	0.663	76.192	35.166
12.5	0.735	84.466	8.274
13	0.772	88.718	4.252
13.5	0.799	91.821	3.103
14	0.820	94.234	2.413
16	0.880	101.130	6.895
20	0.952	109.404	8.274
24	1.000	114.920	5.516

4.2.3.6. El método para estimar los escurrimientos

El método para estimar los escurrimientos en este trabajo se basó en la teoría del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos el cual parte de la teoría general del hidrograma unitario.

➤ Método del hidrograma unitario

El hidrograma unitario se conoce originalmente como gráfica unitaria de una cuenca, se define como el hidrograma de escorrentía directa que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lamina unitaria, duración *de* y repartida uniformemente en la cuenca.

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. Las siguientes suposiciones básicas son inherentes en este modelo:

1. El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva.
2. El exceso de precipitación está uniformemente distribuido a través de toda el área de drenaje.

3. El tiempo base de la duración de la escorrentía directa resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
4. Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimientos directos de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad de escurrimientos directos representados por cada hidrograma.
5. Para una cuenca dada, el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca.

En condiciones naturales dichas suposiciones no se satisfacen en forma perfecta. Sin embargo cuando la información hidrológica que va a utilizar se selecciona cuidadosamente de tal manera que llegue a cumplir aproximadamente dichas suposiciones, los resultados obtenidos por el modelo del hidrograma unitario generalmente son aceptables para propósitos prácticos (Heerdegen, 1974).

Generalmente para hacer la deducción del hidrograma unitario se requiere tener el área de la cuenca, el hietograma de escurrimiento total, el hietograma de la tormenta que lo produjo. A partir de lo anterior se puede obtener el escurrimiento base del directo.

En ocasiones no se cuenta con la información necesaria para deducir un hidrograma unitario ya que en México se carece de registros de escurrimientos de caudales, lo más usual es contar con información de precipitaciones es por ello que se aplicó el hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos.

4.2.3.7. El modelo de escurrimientos de este trabajo

El presente trabajo se basó en la teoría del hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos el cual es aplicable cuando no se tiene acceso a la información que se necesita para generar hidrogramas convencionales, en estos casos es necesario aplicar métodos con los cuales se puedan generar hidrogramas unitarios usando únicamente las características generales de la cuenca. Estos son los hidrogramas unitarios sintéticos.

➤ Hidrograma unitario sintético del SCS

Para la generación de los hidrogramas unitarios sintéticos se requiere contar con datos de un evento de precipitación distribuido en el tiempo, es decir, un

hietograma de precipitación, el área de la cuenca y el tiempo de concentración o al menos con un hidrograma medido a la salida de la cuenca, sin embargo en la mayoría de las cuencas, no solo en nuestro país sino en todo el mundo no se cuenta con estaciones hidrométricas o bien con los registros pluviométricos necesarios.

Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos: a) aquellos que relacionan las características del hidrograma (tasa de flujo pico, flujo base, etc.) con las características de la cuenca (Snyder, 1983; Gray, 1961), b) los que están basados en hidrogramas unitarios adimensionales (Servicio de Conservación de Suelos, 1972) y c) los que están basados en modelos de almacenamiento en la cuenca (Clark, 1943).

Los hidrogramas que el modelo hidrológico del presente trabajo genera se encuentran en el segundo grupo, los que se basan en hidrogramas unitarios adimensionales. Los hidrogramas unitarios sintéticos en los que el modelo de este trabajo se basó fueron los de tipo triangular y adimensional o curvilíneo.

- **Hidrograma unitario tipo triangular**

El hidrograma unitario tipo triangular se calculó para obtener el tiempo de retraso que el modelo necesita para generar los hidrogramas sintéticos.

Este fue desarrollado por Mockus, parte, de la geometría del hidrograma unitario, por lo que el gasto pico (q_p) se determina como:

$$q_p = 0.555 \frac{A}{T_b} \quad (11)$$

Donde q_p es el gasto al pico, A es el área de la cuenca, t_b es el tiempo base en h.

Gasto pico (q_p): el gasto o volumen máximo que alcanza la tormenta en m³/s.

$$t_b = 2.67 t_p \quad (12)$$

Tiempo base (t_b) : es el tiempo que transcurre desde el punto del levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es entonces el tiempo que dura el escurrimiento directo.

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (13)$$

Tiempo al pico (t_p) : es el tiempo que transcurre desde el tiempo de levantamiento hasta el pico del hidrograma. d_e es la duración exceso y t_r es el tiempo de retraso.

$$t_r = 0.6 * t_c \quad (14)$$

Tiempo de retraso (t_r) : es el tiempo que transcurre del centro de la masa de la precipitación al pico del hidrograma. t_c es el tiempo de concentración.

$$d_e = 0.1333 * t_c \quad (15)$$

Duración efectiva (d_e) : es el tiempo del escurrimiento directo.

Y por último el tiempo de concentración se expresa como:

$$t_c = \frac{0.00227 * (L)^{0.8} * \left(\frac{1000}{NC} - 9 \right)^{0.7}}{y^{0.5}} \quad (16)$$

Donde: L = longitud del cauce principal en km
 y = pendiente media de la cuenca en %.
 NC = Numero de curva.

Tiempo de concentración (t_c) : es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento de gasto de equilibrio y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. La Figura 19 muestra la forma del hidrograma unitario sintético tipo triangular.

- **Hidrograma unitario adimensional**

Es el hidrograma unitario sintético que genera el modelo hidrológico HEC-HMS bajo esta metodología, de acuerdo con el manual de usuario del US Army Corps Engineers (2000). El caudal se expresa por la relación del caudal q con respecto al

caudal pico q_p y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de recurrencia del pico en el hidrograma unitario T_p . Dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración del exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional (Figura 20).

En la mayoría de los casos, es suficiente con las características de un hidrograma unitario triangular, se usa el adimensional si la extensión de la curva de recesión del hidrograma afecta el diseño.

Por tanto para obtener un hidrograma unitario de este tipo es suficiente con multiplicar las ordenadas por el gasto pico de q_p de la ecuación (11) y las abscisas por el tiempo al pico de la ecuación (13).

La ecuación del tiempo de concentración (t_c) involucra al número de curva o curva de escurrimientos determinada anteriormente. Por lo que definidos todos los parámetros del modelo ya se está en condiciones de integrarlo.

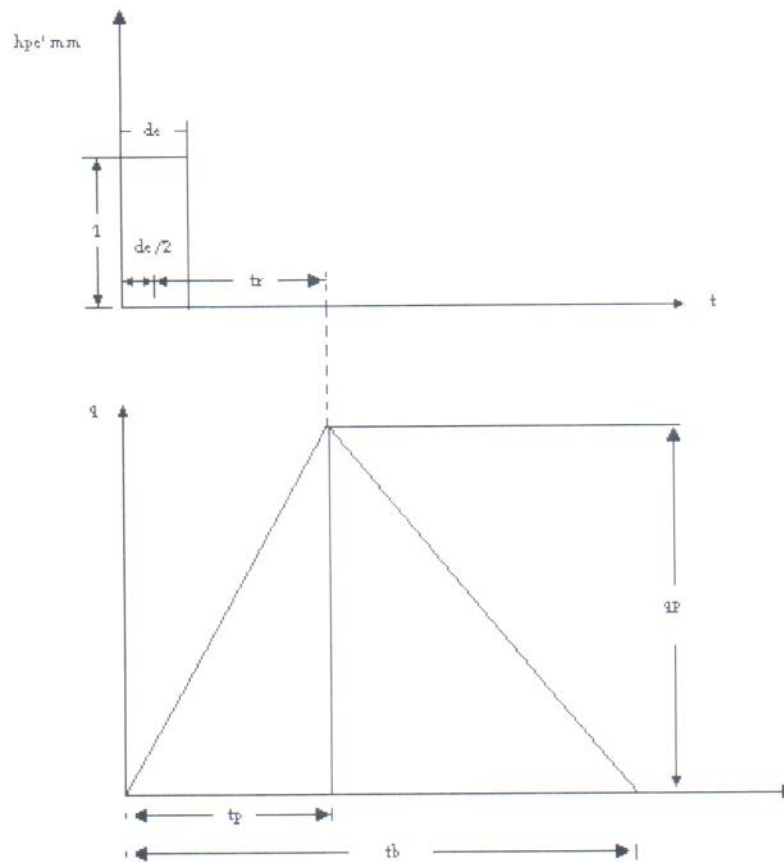


Figura 19. Hidrograma unitario sintético (forma triangular) (SCS, 1972), citado por Aparicio, 2004.

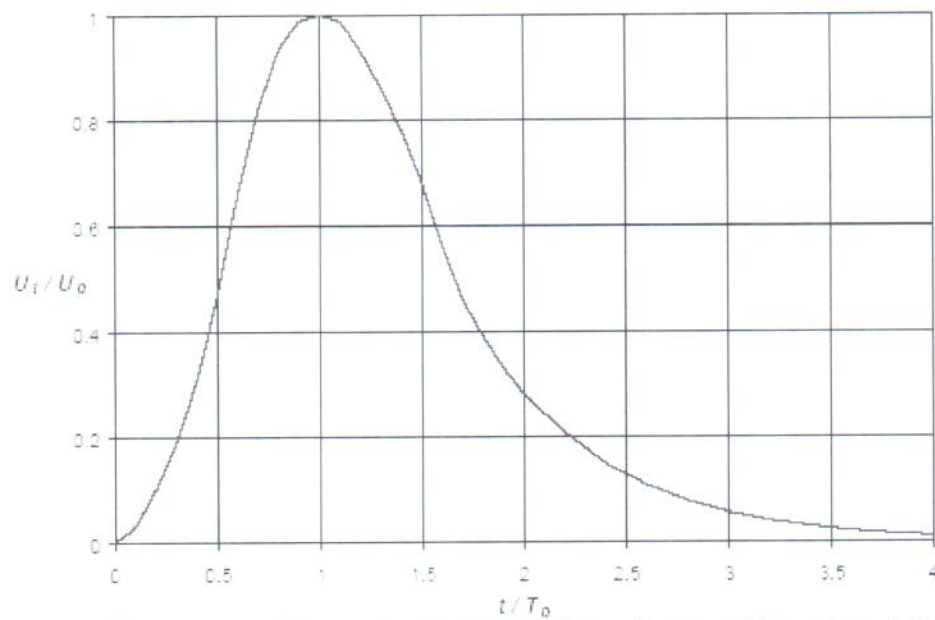


Figura 20. Hidrograma unitario sintético (forma adimencional) (SCS, 1972), citado por US Army Corps of Engineers, 2000.

➤ **Deducción del hidrograma unitario sintético tipo triangular**

Mediante la utilización del método de tormenta diseño del Servicio de Conservación de Suelos se generó el hietograma de precipitación representativo de la microcuenca, para ello se utilizó PMM24h de un Tr de 85 años. Como ya se mencionó el tipo de distribución de lluvia que se utilizó fue el tipo II (Cuadro 29) por la posición de la región para la que se calculó con respecto a la posición de la zona de estudio, son regiones centrales sin influencia de climas marítimos.

El hidrograma unitario sintético que se utilizó para calcular el tiempo de concentración (t_c) y tiempo de retraso (t_r) fue el propuesto Mockus mediante la aplicación de las ecuaciones (14) y (16) y para los demás parámetros las ecuaciones (11), (12), (13) y (15).

Como resultado de la aplicación de las ecuaciones para deducir los parámetros de construcción del hidrograma unitario sintético tipo triangular. El Cuadro 31 en las columnas impares muestra los números de curva ponderados en los Cuadros 27 y 28 determinados para cada área de influencia, el tiempo de concentración en h. se calculó con la ecuación 19 donde los parámetros y y L se tomaron del Cuadro 24. El Cuadro 31 muestra los parámetros para la deducción del hidrograma unitario tipo triangular.

Cuadro 31. Parámetros para la deducción del hidrograma unitario sintético tipo triangular.

Estación	Escenario 1985		Escenario 2003	
	NC	t_c h.	NC	t_c h.
Acatlan	78	17.480	79	16.764
Alcholoya	71	21.387	79	16.928
Acaxochitlán	65	24.802	71	21.396
Ahuazotepec	67	23.858	68	22.783
Esperanza	74	19.364	81	15.901
Metepec	80	16.527	81	15.842
Chignahuapan	66	24.329	67	23.840
Presa Tezoyo	71	21.321	73	19.969
Santiago	76	18.273	79	17.046
Sembo	53	33.328	52	34.236
Singuilucan	65	24.878	66	24.397
San Lorenzo	62	27.139	62	26.764

Una vez que se obtuvo el tiempo de concentración se calculó el tiempo de retraso con la finalidad de concentrar todos los parámetros que el software de modelación de escurrimientos HEC-HMS necesita. En el Cuadro 32 se muestra el cálculo de los parámetros del hidrograma unitario sintético, aunque solo el tiempo de retraso (tr) es utilizado para la alimentación del modelo.

Cuadro 32. Parámetros del Hidrograma unitario triangular, escenario 1985 Y 2003.

Escenario 1985													
Parámetros	Símb	Acat.	Acax.	Alchol.	Ahua.	Esper.	Met.	Chign.	P. tez.	Sant.	Sembo.	Singuil.	Sn Lor.
Tiempo de retraso	tr	10.48	12.83	14.881	14.31	11.61	9.91	14.59	12.79	10.96	19.99	14.92	16.28
Duración efectiva	de	2.33	2.85	3.306	3.180	2.58	2.20	3.24	2.84	2.43	4.44	3.31	3.61
Tiempo pico	tp	11.65	14.25	16.53	15.90	12.90	10.01	16.219	14.21	12.18	22.18	16.58	18.092
Tiempo base	tb	31.11	3.06	44.14	42.46	34.46	29.41	43.30	37.95	32.52	59.32	44.25	48.30
Gasto al pico	qp	288.57	25.99	4.50	43.01	215.33	69.94	51.68	67.65	162.22	29.28	135.57	149.87
Escenario 2003													
Tiempo de retraso	tr	10.05	10.15	12.83	13.67	9.54	9.50	14.30	11.98	10.22	20.54	14.63	16.05
Duración efectiva	de	2.23	2.25	2.85	3.03	2.12	2.11	3.17	2.66	2.27	4.56	3.25	3.56
Tiempo pico	tp	11.17	11.28	14.26	15.18	10.60	10.56	15.89	13.31	11.36	22.82	16.26	17.84
Tiempo base	tb	29.83	30.13	38.08	40.55	28.30	28.19	42.43	35.54	30.34	60.93	43.42	47.63
Gasto al pico	qp	300.89	32.84	5.22	45.04	262.22	72.96	52.74	72.23	173.90	28.50	138.24	151.97

➤ Tránsito de avenidas en cauces

Cuando la extensión de la cuenca es grande, es conveniente hacer el tránsito de la avenida o de las avenidas existentes en el área, lo cual es el caso en el presente estudio.

El tránsito de avenidas en el cauce es la simulación de la variación de un hidrograma al recorrer un cauce, (Aparicio, 2004).

Presenta algunas dificultades a diferencia del tránsito en vasos, Los cauces presentan topografía irregular, tienen entradas a lo largo del tramo que recorren y el nivel de la superficie libre no es horizontal por lo que se tiene que considerar un mismo tirante para diferentes gastos al final de recorrido.

En este trabajo se utilizó el método de Muskingum para estimar el tránsito de los cauces para el modelo.

• Método de Muskingum

El tránsito de las avenidas se realizó por medio del método Muskingum, este es un método hidrológico, cuya característica es que utilizan ecuaciones simples para llegar a la solución y por ello pueden llegar a ser menos aproximados que los métodos hidráulicos. El método Muskingum fue presentado por primera vez en 1938 y utiliza la ecuación de continuidad en su forma discreta.

$$\frac{I_i + I_{i+1}}{2} \Delta t - \frac{O_i + O_{i+1}}{2} \Delta t = \Delta V \quad (17)$$

Y una relación algebraica entre el almacenamiento en el tramo V y las entradas I y salidas O de la forma:

$$V = KO + Kx(I - O) = K[xI + (1 - x)O] \quad (18)$$

Donde K es una constante llamada parámetro de almacenamiento y x es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas del almacenamiento en el tramo.

El factor x varía entre 0.0 y 0.5, si $x = 0.0$ el volumen almacenado en el tramo es solo función de la salida. Si x es igual a 0.5 indica que las entradas y las salidas tienen la misma importancia y no habría ningún abatimiento del pico. Cuando en el área de estudio se carece de información para determinar x se toma $x = 0.2$ como un valor medio.

El valor del parámetro K depende de la velocidad con la que se mueve la onda, K tiene unidades de tiempo y su valor es aproximadamente igual al tiempo de viaje del pico de la avenida a lo largo del tramo por lo que se expresa de la siguiente manera:

$$K = \frac{L}{\omega} \quad \omega = 1.5 \, v \quad (19)$$

Donde

L = longitud del tramo.

$\mathcal{O}$ = velocidad promedio del pico de la avenida.

v = velocidad media del agua.

Por tanto la velocidad media del agua para calcular el parámetro K se obtuvo de la modelación de los cauces del Río Tulancingo en HEC-RAS que CNA realizó para la avenida de 1999 que causó problemas de inundación la ciudad de Tulancingo.

El valor del parámetro x se tomó como 0.2 debido a la falta de información de las secciones de los tramos de los cauces. Los parámetros son mostrados en el Cuadro 33.

Cuadro 33. Parámetros de alimentación de los cauces

Cauce y cuerpo de agua	C. de Muskingum	
	K h.	x
San María	2.86	0.2
San Lorenzo	1.163	0.2
Río Chico Tulancingo	1.110	0.2

4.2.3.8. Modelación de escurrimientos con el Sistema de Modelación Hidrológica (HEC- HMS)

En la modelación de los escurrimientos se utilizó HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) versión 2.2.2. está basado en Windows, y vino a reemplazar al HEC-1. Consistió en la modelación de un evento medio máximo de 24 horas de 114.92 mm. para un Tr de 85 años en 12 áreas de influencia.

Este modelo está estructurado en tres partes separadas: el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control, se puede acceder a cada una de las partes mediante la pantalla principal. La diferencia entre HEC-1 y el HEC-HMS es la fácil aplicación lo cual permite la manipulación de elementos hidrológicos.

➤ El modelo de cuenca

En esta parte se hizo la distribución de las áreas de influencia, arrastrando 12 iconos que representaron a las subcuencas (Subbasins), o áreas de influencia de la barra de herramientas, también se puede hacer la distribución haciendo click con el botón derecho del mouse y seleccionando agregar nuevo elemento. Una vez que las subáreas estuvieron distribuidas en el plano se hizo la distribución de los cauces

(Río Santa María, Río San Lorenzo y el Río Chico Tulancingo) arrastrando el icono de reach al plano de distribución. En la Figura 21 se aprecia el plano de distribución de elementos con los que se integró el modelo.

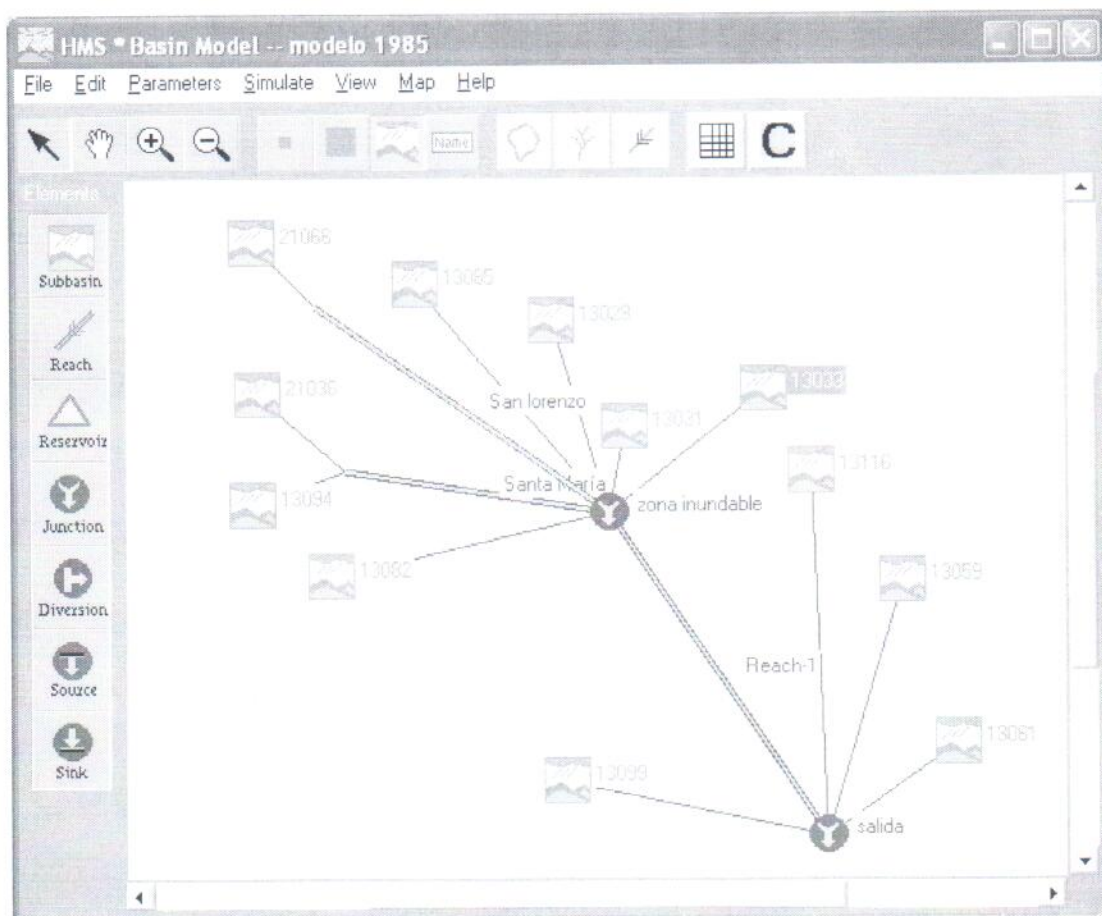


Figura 21. Distribución de las áreas de influencia y cauces en el modelo de cuenca.

Posteriormente fueron conectadas las subáreas a los cauces de escurrimientos. Una vez que las subáreas estuvieron distribuidas se procedió a editarlas con la clave de la subárea y una pequeña descripción la cual no fue mayor a 1,024 caracteres. Cuando todos los elementos de la cuenca estuvieron repartidos la microcuenca estuvo representada completamente. En cada subárea están presentes tres procesos separados: la proporción de pérdidas, la transformación y el flujo base. Para calcular la proporción de pérdidas se utilizó el número de curva (NC) del SCS donde se introdujo el valor del número de curva correspondiente a cada área de influencia (Cuadro 31), en el método de transformación se utilizó el del SCS y el tiempo de retraso (Cuadro 32) calculado para cada subárea en minutos. El método de flujo base no aplicó. En el Cuadro 34 se muestran los parámetros con los que se alimentó el proceso de proporción de pérdidas.

Cuadro 34. Parámetros de alimentación de las subáreas, escenario de 1985 y 2003.

C. de la estación	Estación	Sup. km ²	1985		2003	
			NC	Tr h.	NC	Tr h
13059	Acatlán	161.775	78	10.48	79	10.05
13061	Alcholoya	17.830	61	12.83	79	10.15
13094	Acaxoxhitlán	3.585	65	14.88	71	12.83
21036	Ahuazotepec	32.913	67	14.31	68	13.67
13082	Esperanza	133.73	74	11.61	81	9.54
13099	Metepec	37.072	80	9.91	81	9.50
21066	P.N. Chignahuapan	40.329	66	14.59	67	14.30
13085	P.Tezoyo	46.258	71	12.79	73	11.98
13031	Santiago	95.074	76	10.96	79	10.22
13116	Sembo	31.300	53	19.99	52	20.54
13033	Singuilucan	108.17	65	14.92	66	14.63
13029	San Lorenzo	130.453	62	16.28	62	16.05
838.491						

C. de la estación: Clave de la estación

El tránsito de la avenida en los cauces se realizó mediante el método Muskingum de la misma forma como se editaron los parámetros de las subáreas, pero en este caso, se introdujo el nombre del cauce, en el método de tránsito de la avenida se eligió el de Muskingum, posteriormente se introdujeron los valores del parámetro K en h. y el factor x . Los valores de K y x se encuentran en el Cuadro 33 de 4.2.3.7.

En la Figura 22 se muestra la distribución de las áreas de influencia de la microcuenca así como el relieve del terreno que indica la dirección norte de los escurrimientos superficiales. El modelo de cuenca se elaboró para cada uno de los escenarios bajo estudio, 1985 y 2003.

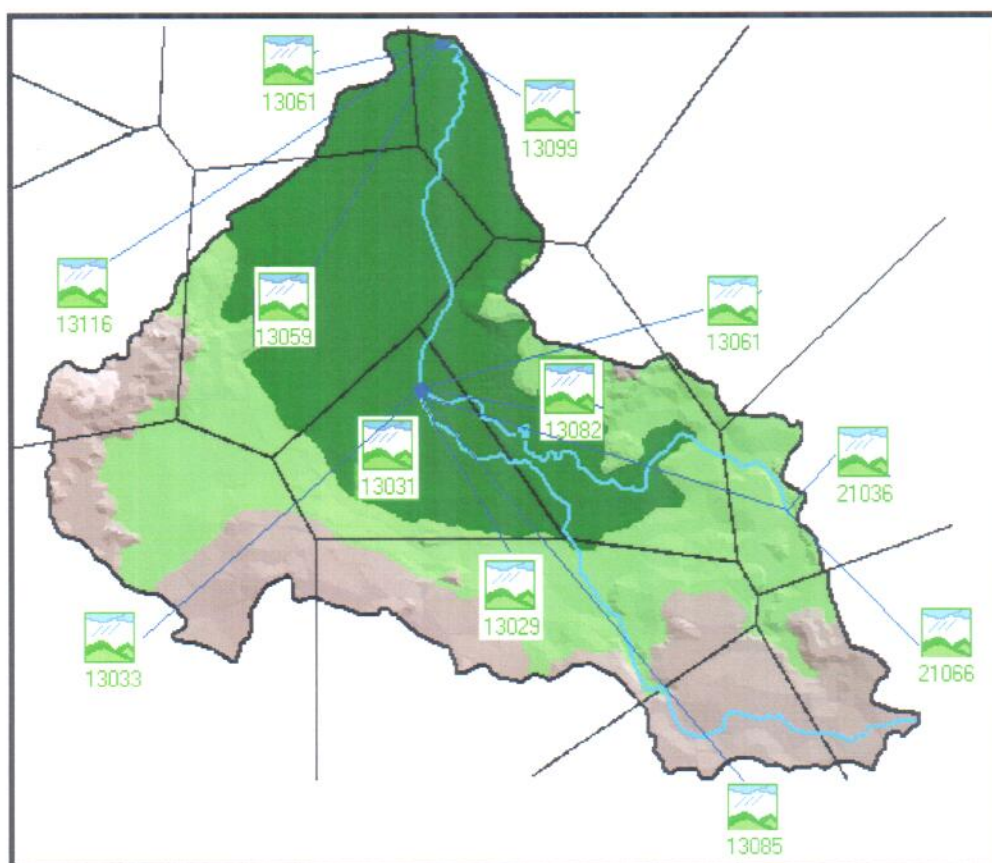


Figura 22. Presentación del modelo de la microcuenca con relieve.

➤ El modelo meteorológico

El modelo meteorológico contiene los datos de precipitación de cualquier evento histórico o hipotético y los datos de evapotranspiración cuando también interviene esta variable. El modelo cuenta con varios métodos de cálculo. En el presente trabajo solo se trabajó con el modelo de precipitación donde se utilizó la tormenta hipotética del SCS, en dicho modelo la PMM24h. calculada se distribuyó de acuerdo a la tormenta tipo II (Cuadro 29) con la que el modelo generó el hietograma de precipitación (Cuadro 30).

En los datos del menú se agregó la estación de referencia. Se tomó como estación representativa a la que ocupa mayor superficie dentro del área de la microcuenca, esta fue la estación Acatlan con 161.771 km². La Figura 23 muestra la ventana del modelo meteorológico.

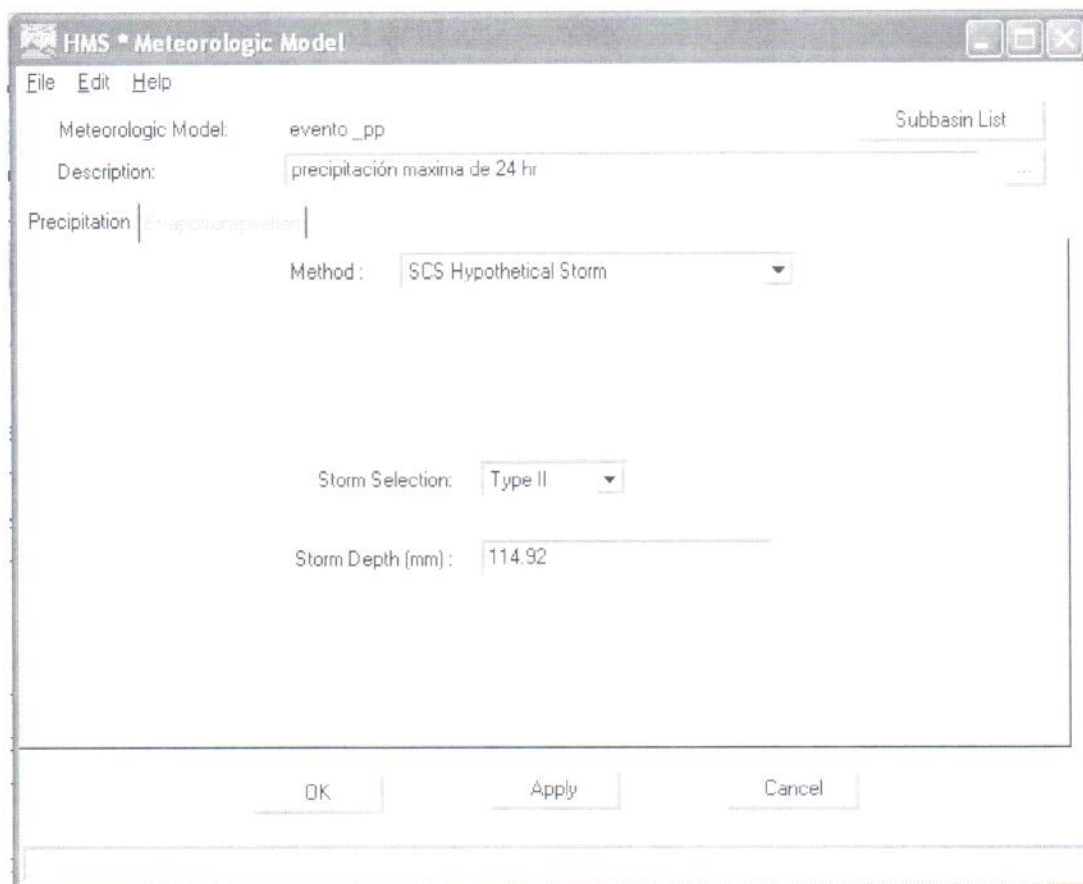


Figura 23. Modelo meteorológico.

➤ Especificaciones de control

Las especificaciones de control se refieren a los tiempos y fechas de inicio y término de la simulación. Esto es, el tiempo y la fecha de inicio del evento, así como la fecha de término de la simulación la cual puede ser de más de un día, ya que los escurrimientos tardan en concentrarse dependiendo de las características físicas de la microcuenca.

En las especificaciones de control se introdujo el periodo sobre el cual el programa haría la simulación en el tiempo, es decir, después de ocurrida la tormenta cuanto tiempo tardó en escurrir el agua hasta la salida de la microcuenca. Se utilizó un tiempo de 72 h. debido a las características físicas de la cuenca, pendiente, uso del suelo, características texturales etc.

El tiempo hipotético que se estableció fue de 10 oct de 1999 al 13 de octubre del mismo año, hora de inicio 06.30 P.M. y hora de término 10: 30 A. M. La Figura 24 muestra la ventana de las especificaciones de control.



The image shows a Windows-style dialog box titled "HMS * Control Specifications". It has a menu bar with "File" and "Help". The main area contains several input fields: "Control Specs ID : mes representativo", "Description : " followed by a text box and an ellipsis button, "Starting Date : 10 Oct 1999", "Starting Time : 06:30", "Ending Date : 13 Oct 1999", "Ending Time : 10:30", and "Time Interval : 2 Hours" with a dropdown arrow. At the bottom are three buttons: "OK", "Apply", and "Cancel".

Figura 24. Especificaciones de control

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Pretratamientos de imágenes de satélite

Conforme a los pretratamientos realizados a las imágenes de satélite se obtuvo que mediante el proceso de calibración se lograron ajustar los datos de la media y la desviación estandar de los niveles digitales de las imágenes de satélite de 2000 y 2003 a los de la imagen de referencia (1985) corrigiendo con ello los cambios en los niveles digitales registrados en los sensores de cada fecha. En el Cuadro 35 se muestran las estadísticas de la imagen de referencia con respecto a la cual se hizo la calibración.

Cuadro 35. Estadísticas de la imagen de referencia.

Imagen 1985				
No. de banda	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media	Desv. Estandar
Banda 1	43	255	71.19	12.34
Banda 2	11	168	31.56	8.59
Banda 3	8	236	40.12	15.43
Banda 4	8	188	48.43	12.35
Banda 5	3	254	86.88	31.93
Banda 7	1	239	43.92	20.118

En los Cuadros 36, 37 y 38 se encuentran las estadísticas de las imágenes que se corrigieron (2000 y 2003) así como los datos resultantes corregidos.

Cuadro 36. Estadísticas de la imagen de 2000 a corregir

Imagen 2000				
No. de banda	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media	Desv. Estandar
Banda 1	0	256	77.56	28.94
Banda 2	0	256	66.77	17.52
Banda 3	0	256	78.95	15.01
Banda 4	0	256	65.37	13.87
Banda 5	0	256	113.6	36.05
Banda 7	0	256	65.37	13.87

Cuadro 37. Estadísticas de la imagen de 2003 a corregir

Imagen 2003				
No. de banda	Valor mínimo	Valor Máximo	Media	Desv. Estandar
Banda 1	0	255	91.16	21.17
Banda 2	0	255	93.42	22.25
Banda 3	0	255	95.57	34.55
Banda 4	0	255	72.89	14.86
Banda 5	0	255	132.58	39.12
Banda 7	0	255	102.91	41.49

Cuadro 38. Estadísticas de las imágenes corregidas

Imagen 2000				
No. de banda	Valor mínimo	Valor Máximo	Media	Desv. Estandar
Banda 1	51	118	71.18	7.67
Banda 2	10	92	31.57	5.57
Banda 3	0	160	40.142	10.34
Banda 4	29	105	48.45	4.13
Banda 5	27	162	86.88	19.09
Banda 7	26	97	43.9	3.84
Imagen 2003				
No. de banda	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media	Desv. Estandar
Banda 1	40	128	71.17	7.31
Banda 2	11	69	31.55	4.79
Banda 3	12	86	40.12	10.03
Banda 4	33	86	48.42	3.07
Banda 5	24	145	86.89	18.6
Banda 7	11	92	43.91	13.16

Los resultados presentados en los Cuadros 36 y 37 con respecto a los que se encontraron en la imagen de referencia (Cuadro 35) muestran una clara diferencia en la media y la desviación estandar. En los datos corregidos del Cuadro 38 con respecto a los datos del Cuadro 35 se aprecia claramente la disminución de la desviación estandar y los datos de la media se aproximan considerablemente a los de la imagen de referencia. Esto indica que se logró hacer la igualación de los histogramas de las imágenes de 2000 y 2003 con respecto a los de la imagen de 1985, tal como lo aplicó Rincón, 2003 en donde logró igualar los histogramas utilizando el mismo proceso de calibración con imágenes Landsat MSS y TM.

5.2. Clasificación supervisada de imágenes

Después de aplicar el realce y las mejoras a las imágenes, se encontró que la combinación de bandas 2, 3 y 4 (azul, verde y rojo) fue la más adecuada para llevar a cabo la clasificación de uso del suelo por reunir las mejores características de interpretación ya que de acuerdo con Chuvieco, 1990 esta es la composición más habitual.

A partir de estas imágenes se identificaron en la microcuenca las clases de uso de suelo que se muestran en el Cuadro 39. Los colores que presentaron en las imágenes se relacionaron con las distintas cubiertas y usos del suelo. Por ejemplo, el color rojizo significó arbolado vigoroso de alta densidad como bosque de abies, el color menos intenso se le asignó la clase de bosque de pino, el color rojo más claro fue para agricultura de riego, en el verde agua se identificó a la agricultura de temporal, el color café correspondió a la clase de otros tipos de vegetación, el azul brillante a blanco a zonas urbanas y pobladas, el azul cielo y negro fue para cuerpos de agua y el color beige a blanco se la asignó a pastizal inducido con erosión aparente.

Cuadro 39. Clases de uso del suelo identificadas

Id	Clase	Clave
1	Bosque de abies	BA
2	Bosque de pino	BP
3	Bosque de pino-encino	BPq
4	Bosque de encino	BQ
5	Otros tipos de vegetación	Otv
6	Agricultura de riego	AR
7	Agricultura de temporal	AT
8	Áreas urbanas o pobladas	AU
9	Cuerpos de agua	CA
10	Pastizal inducido con erosión aparente	Picea

Los campos de entrenamiento que se digitalizaron sobre las clases de uso del suelo identificadas generaron las firmas espectrales mostradas en las Figuras 25, 26 y 27. Como se observa el despliegue fue de manera gráfica colocando a las bandas TM y ETM+ en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas a los niveles digitales promedio. Dado que este despliegue permitió observar las bandas que mostraron mayor sobreposición, se tomó la decisión de eliminarlas del proceso de clasificación, de esta manera se prescindió de las bandas 2 y 3 en la imagen de

de clasificación, de esta manera se prescindió de las bandas 2 y 3 en la imagen de 1985 ya que en las clases cuerpos de agua profundos (CACP) y otros tipos de vegetación (Otv) las líneas se presentaron paralelas y muy juntas lo que puede ocasionar mezcla o traslape de las clases. La finalidad de analizar la confusión entre las clases es para minimizar el error de la clasificación, al respecto Chuvieco (1990) menciona que es preciso evaluar la viabilidad de que las categorías o clases puedan clasificarse sin grave riesgo de error.

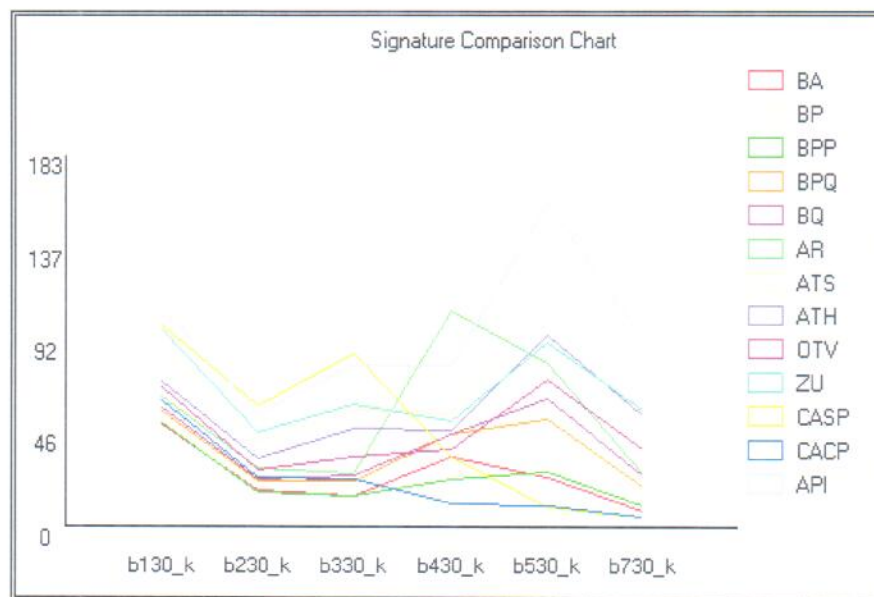


Figura 25. Firmas espectrales de los campos de entrenamiento de 1985.

Para el proceso de clasificación de la imagen de 2000 se eliminó la banda 2 y 3 en 2003 se excluyó a las bandas 1 y 2 ya que el paralelismo entre líneas y muy poca separación entre ellas implica probable sobreposición entre las clases de agricultura de temporal (ta) y (trf)

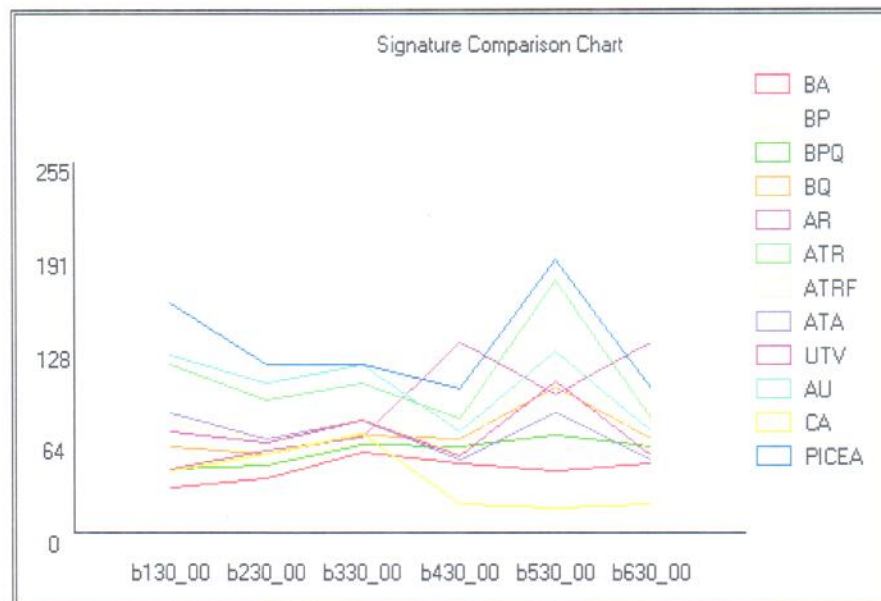


Figura 26. Firmas espectrales de los campos de entrenamiento de 2000.

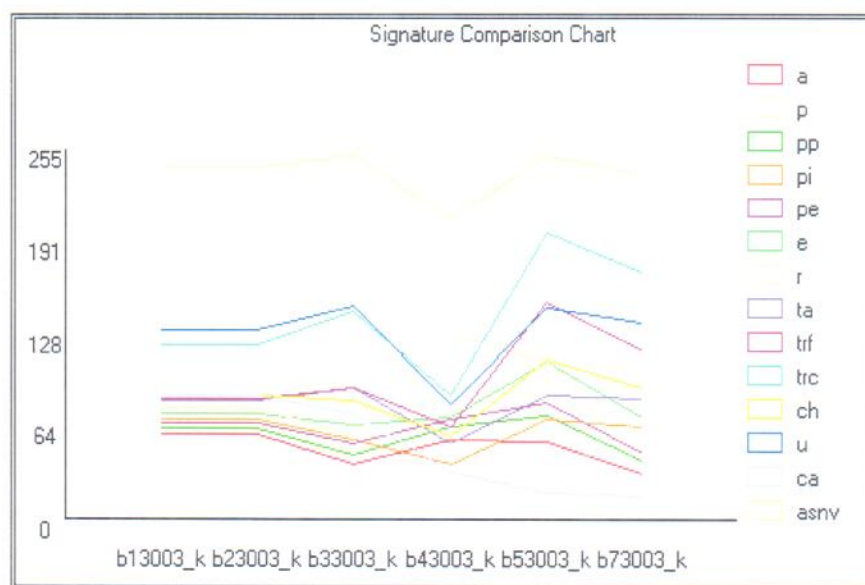


Figura 27. Firmas espectrales de los campos de entrenamiento de 2003.

De la observación de los gráficos de las firmas se puede decir que las bandas que presentan mayor discriminación entre clases son 1, 4, 5 y 7 en las imágenes de 1985 y 2000, y en la imagen de 2003 se utilizaron las bandas 3, 4, 5 y 6.

Por tanto la clasificación procedió con las bandas que presentaron mayor diferenciación entre clases. Una dato importante es que en cada imagen se diferenció un número mayor a 10 clases y finalmente solo se clasificaron 10 en cada una, esto fue debido a que en cada una de las imágenes se diferenciaron cubiertas bajo sombra producidas por la exposición del terreno, por cambios en los niveles de agua o contaminación, cambios en los usos de una fecha a otra, etc.

Una vez hecha la clasificación de uso y cobertura del suelo con MAXLIKE de Idrisi-K se reclasificaron los mapas producidos mediante agregación de clases y la presentación final de la leyenda fue como se mostró en el Cuadro 39. En la clasificación realizada se definió una probabilidad de clasificación del 80% para cada una de las clases utilizando la modalidad de clasificación de todos los píxeles, es decir, sin excluir ninguno.

La clasificación dió como resultado los mapas que se muestran en las Figuras 28, 29 y 30 los cuales fueron usados para calcular las superficies que comprende cada uso de suelo presente en el área, es decir, las superficies por clase en cada clasificación. En el Cuadro 40 se encuentra el concentrado de superficies y porcentajes de cada escenario.

Cuadro 40. Superficies en ha. de uso del suelo en los tres escenarios y el porcentaje que representan.

Clase	1985 ha.	% Sup.	2000 ha.	% Sup.	2003 ha.	% Sup.
Cubierta Forestal						
BA	851.13	1.015	501.04	0.598	321.57	0.38
BP	8021.25	9.566	5582.4	6.658	4914.54	5.86
BPq	2796.75	3.335	2953.2	3.522	3592.17	4.28
Bq	10775.16	12.851	8397.09	10.015	8235.36	9.82
Otv	6988.86	8.335	5628.6	6.713	2102.76	2.51
Cf	29433.15	35.103	23062.33	27.505	19166.40	22.86
Uso de suelo						
Ar	4765.23	5.683	4601.04	5.487	2463.30	2.94
At	45465.84	54.223	49954.81	59.577	54455.94	64.95
Au	2568.51	3.063	5632.2	6.717	7534.89	8.99
Ca	116.64	0.139	102.31	0.122	95.67	0.11
Picea	1499.76	1.789	496.44	0.592	132.93	0.16
U. s.	54415.98	64.897	60786.8	72.495	64682.73	77.14
Total	83849.13		83849.13		83849.13	

Las columnas 2,4 y 6, se observan la superficies en ha. que ocupa cada uso de suelo en la microcuenca. En las columnas 3, 5 y 7 se aprecia el porcentaje de la superficie que ocupan.

Concordando con la revisión de literatura realizada acerca de la vegetación del área de estudio se encontró vegetación de dos de los ecosistemas más importantes que hay en el estado, bosques y vegetación de zonas áridas, esta última se encuentra distribuida en la porción centro del Valle de Tulancingo y fue clasificada dentro de otros tipos de vegetación debido a que se asocia con chaparral, matorrales, nopaleras naturales y cultivadas, así como magueyales.

Todos los tipos de uso del suelo y vegetación encontrados fueron descritos por Trejo (1998) el cual hizo una integración sobre los principales tipos de vegetación del Estado de Hidalgo. Los bosques se distribuyen en las partes elevadas de la microcuenca, encontrando a Bosque de abies (BA) entre los 2800 y 3000 msnm. bajo un clima templado semifrío con verano fresco de acuerdo con Rzedowski (1978), Medina y Rzedowski (1981), Puig (1991) y González (1968), así como CONABIO (1998).

El bosque de pino (BP) compuesto por varias especies se encuentra asociado con oyameles, tascate y ailes. Se le encontró ocupando una superficie de 9.6 y 5%. El bosque de pino-encino (BPq) se presentó ocupando una menor superficie que el bosque de pino en los tres escenarios (3, 3 y 4%) y se distribuye en muy cerca de las masas de bosque de pino.

Otros tipos de vegetación se encuentran distribuidos en la mayor parte de la microcuenca sobre todo en el centro entre 2300 y 2100 msnm. dentro de esta clase se agregó a los tipos de vegetación de nopaleras, magueyales, matorrales, y chaparrales.

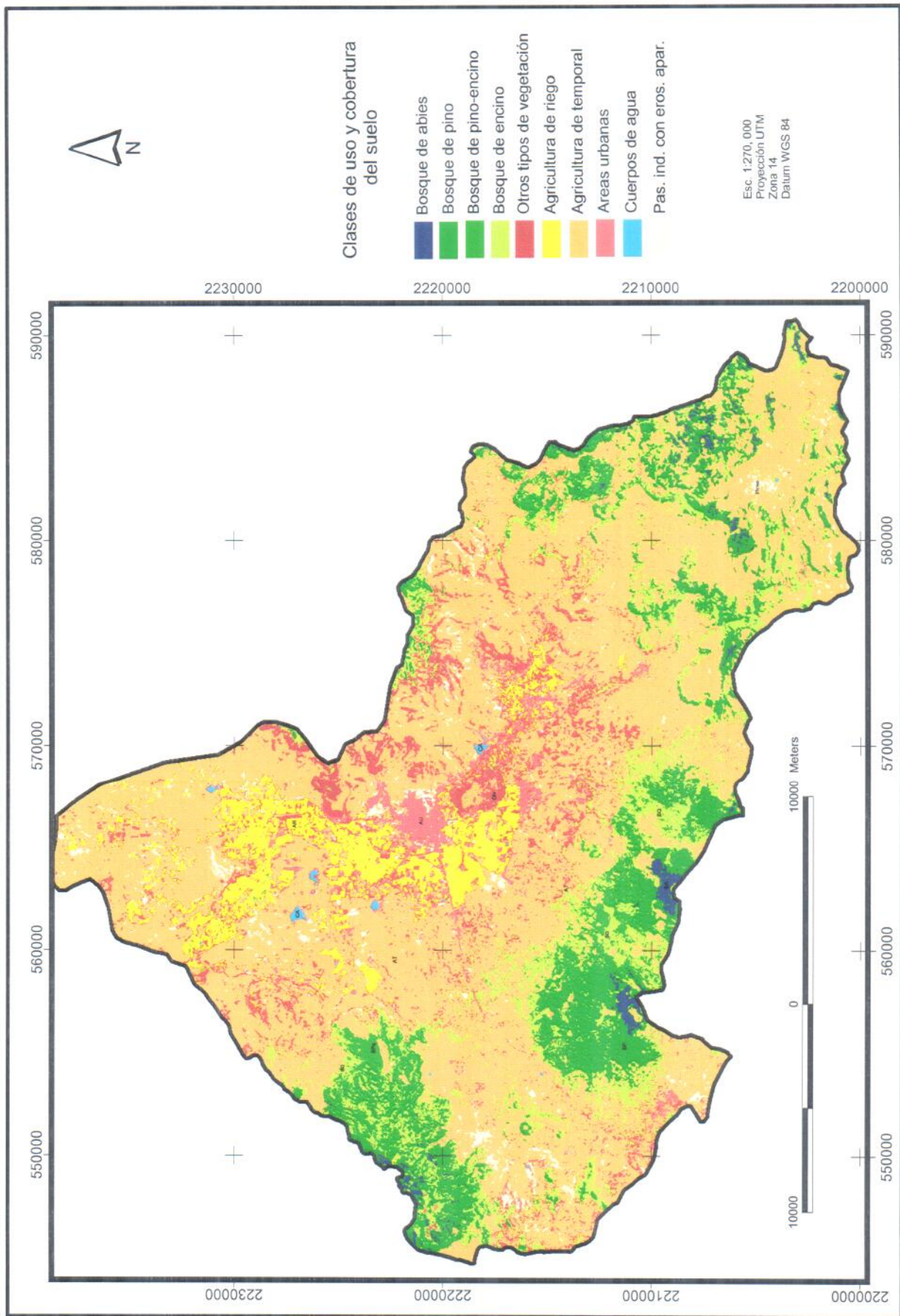


Figura 28. Unidades de uso y cobertura del suelo de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, 1985.

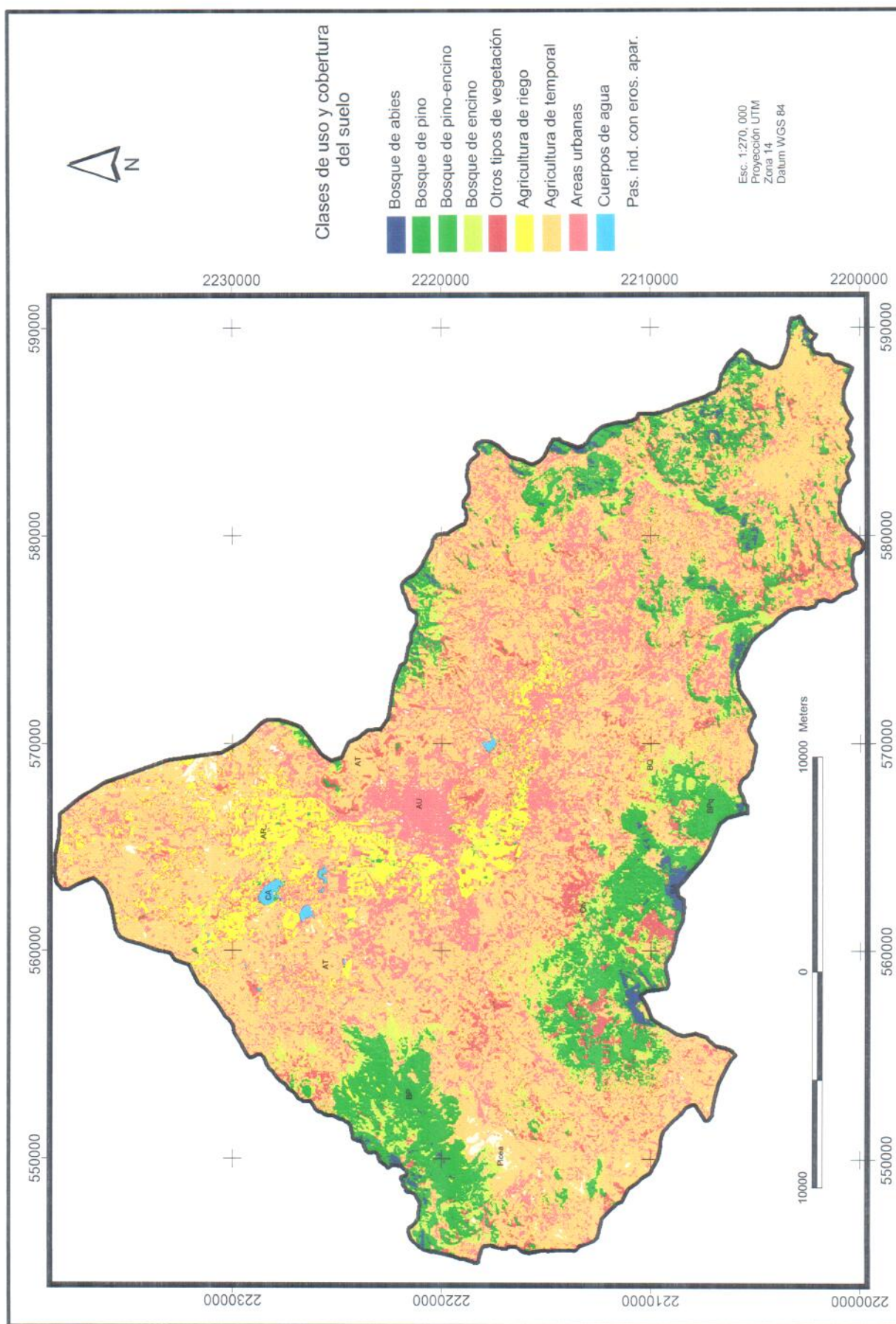


Figura 29. Unidades de uso y cobertura del suelo de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, 2000.

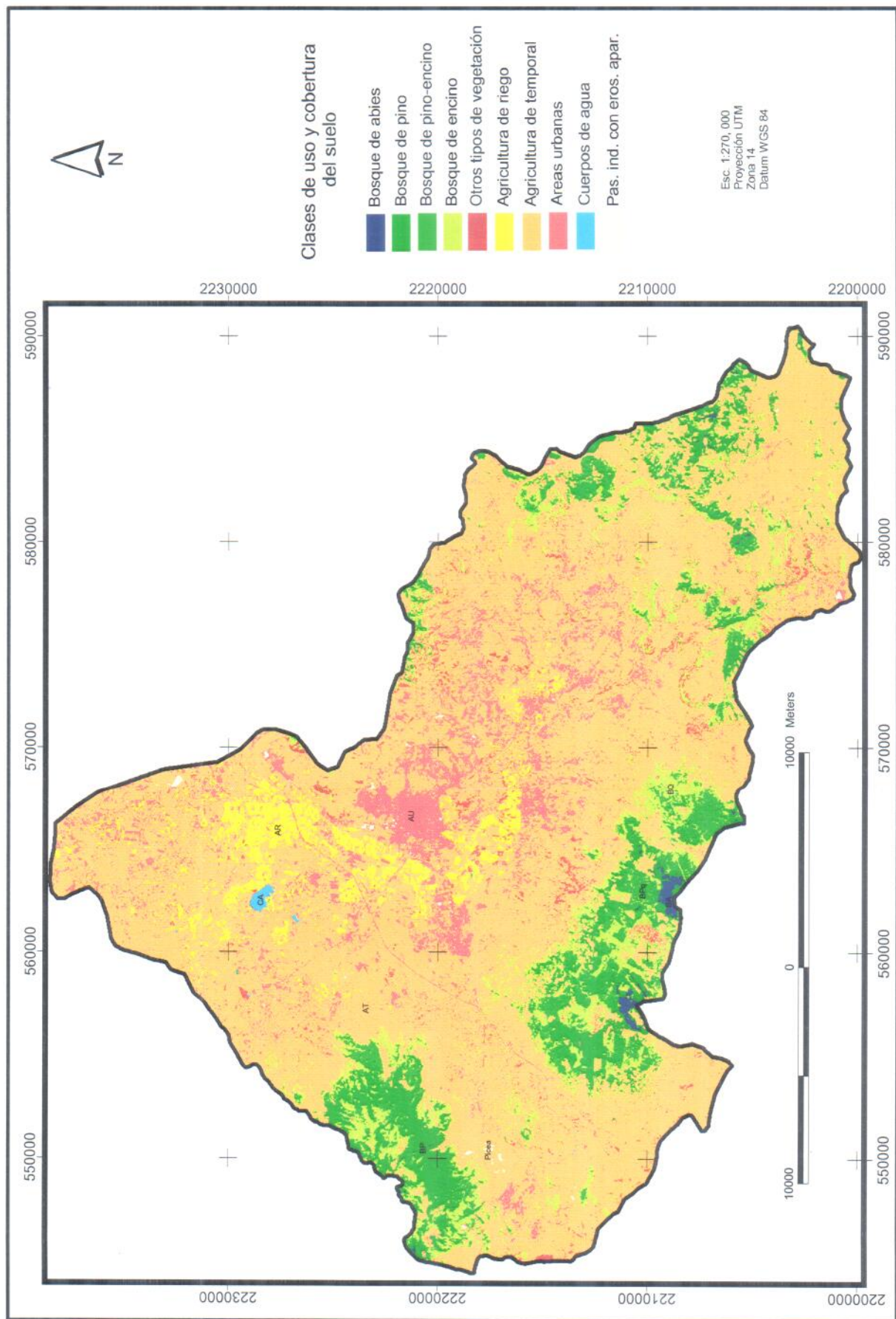


Figura 30. Unidades de uso y cobertura del suelo de la microcuenca del Río Chico Tulancingo, 2003.

Los datos del Cuadro 40 muestran que la cubierta forestal que mayor superficie ocupa es el bosque de encino en las tres fechas clasificadas, en tanto que la agricultura de temporal con 54, 59 y 64 % es el uso del suelo que presenta la mayor superficie de ocupación. El uso de suelo agrícola de temporal de acuerdo con la cartografía de INEGI (1985) incluye a la agricultura de temporal con cultivos anuales y permanentes.

Los datos producidos en la clasificación concuerdan con la fuente de referencia en la que se encontró que este uso del suelo es el que tiene la mayor ocupación dentro de la microcuenca. Se observa el aumento en superficie agrícola de temporal a medida que transcurrió el tiempo de evaluación debido principalmente a que los suelos con cubierta forestal son deforestados por cambios de uso de suelo que se realizan principalmente para ampliar la frontera agrícola o la superficie de pastoreo y para ampliar las zonas urbanas y la construcción de infraestructura de comunicaciones y servicios, menciona SEMARNAT (1996).

En este estudio resultó que la frontera agrícola aumentó 10% entre 1985 y 2003 ganando 8 990 ha. en 18 años. Posteriormente es seguido por el bosque de encino con 12.8, 10.0 y 9.8%, esto es porque como se recordará de la revisión de vegetación el bosque de encino se distribuye en un amplio rango de elevaciones y asociaciones vegetales, por ejemplo en el aspecto altitudinal, de acuerdo a la literatura citada va de 500 a 1 200 msnm pero la observación de esta especie en el área de estudio indica que le puede encontrar asociado con pino en elevaciones mayores de hasta 2700 msnm.

Otra clase sobre la que se puede hacer énfasis es en el uso urbano debido a que en 1985 ocupaba el 3%, entre 1985 y 2000 aumentó a 6.71% y para 2003 ya ocupaba una superficie de 9%. El aumento está asociado al crecimiento poblacional reportado por INEGI, en distintas fechas, desde 1970 hasta 2000 en donde se encuentra un aumento del 161.2% tan solo en el municipio de Tulancingo de Bravo.

En los cuerpos de agua no hay mucha variación tanto en 1985 como en las fechas posteriores han existido los mismos cuerpos de agua, aunque se aprecia claramente un azolvamiento de la presa La Esperanza en la imagen de 2003 por lo

que no fue clasificada como cuerpo de agua sino en la clase otros tipos de vegetación.

También se observa que las áreas cubiertas por vegetación forestal son menores que las áreas bajo algún uso en los tres escenarios y que su tendencia va a la baja, ocurriendo un proceso inverso con las áreas que ocupan los usos (Agrícola de temporal, agrícola de riego, urbano o poblacional y pastizales), esto es, nuevamente porque las áreas forestales están bajo una presión constante no solo del cambio de uso de suelo si no de pastoreo extensivo, plagas forestales, incendios y aprovechamientos bajo manejo y clandestinos.

5.3. Validación de la clasificación

Los Cuadros 14, 15 y 16 presentados en 4.2.2.3. denominadas matrices de confusión muestran la precisión y error por clase y global de las clasificaciones realizadas. Por ejemplo se observa en el Cuadro 14 que para la clase bosque de abies (BA) se clasificaron correctamente 67 píxeles de un total de 68 por lo que la exactitud de la clasificación es de 82 % cometiéndose un error o (error de comisión) de 17%.

En la clasificación de 1985 existe una exactitud en la clasificación de alrededor del 60 al 89 % y el porcentaje de la exactitud en general es del 80% en 1985 y 2000. Lillesand (1994) indica que el mejor indicador de la aceptación de la clasificación es la obtenida clase por clase ya que esta está basada en los sitios de muestreo sin ninguna generalización.

La exactitud de la clasificación general disminuye a 79% en la clasificación de 2003 debido a que esta es 18 años más actual que la fuente de referencia, además en la clasificación de 2003 se muestran cambios importantes en la cobertura y uso del suelo debido a incorporación de algunos usos a otros por causas antrópicas y fenómenos naturales, por citar algunos.

Por tanto la validación de los mapas obtenidos a través de las matrices de confusión determinó una exactitud en la clasificación como se muestra en el Cuadro 41 por lo que de acuerdo con Lillesand (1994) y Rincón (2003) es aceptable ya que este ultimo realizó una valoración donde encontró un índice de Kappa general del 80.14, 80.3 y 82.4 % siendo los valores muy aproximados a los que se obtuvieron el

presente trabajo y mejores a los valores obtenidos por Noguez (1993) donde obtuvo 71.21% de confiabilidad en una clasificación de uso del suelo con imágenes Landsat TM y MSS con tratamiento de filtrado y sin filtrado, y al porcentaje de confiabilidad que encontró Rodríguez (1993) que fue de 59.84% en el valor de Kappa global.

Cuadro 41. Índice de Kappa general obtenido.

Mapa de cobertura y uso del suelo	Exactitud de la clasificación
1985	80.1
2000	80.1
2003	79.9

5.4. Evaluación de cambios de uso de suelo

La detección de cambios en el uso del suelo fue derivado del Cuadro 40. El Cuadro 42 muestra que los valores indicados en porcentaje son los porcentajes de superficie que sufrieron cambios, los valores positivos indican ganancia de superficies y los valores negativos indican pérdida de superficie e incorporación a otros usos.

Los cambios de uso del suelo y cobertura, en términos de porcentaje indican que los usos de suelo que representan mayor ocupación de superficie, la tendencia de la cobertura del suelo es a la baja mientras que los usos ganan superficie en la valoración de la dinámica a lo largo de 18 años. Esto quiere decir, que los usos del suelo tales como la agricultura de temporal, riego, áreas urbanas y pobladas, pastizales y áreas erosionadas han aumentado en superficie y se la han restado a las áreas con cubiertas forestales, estos resultados concuerdan con estudios realizados por Velázquez (2001) y Gráficamente la Figura 31 muestra la tendencia del cambio de uso del suelo.

Cuadro 42. Matrices de cambio superficies ha. en los tres escenarios

Clase	t1	%	t2	%	t3	%	t1-t2	% cambio	t2-t3	% cambio	t1-t3	% cambio
Cubierta forestal												
BA	851.13	1.02	501.04	0.60	321.57	0.38	350.09	0.418	-179.5	-0.214	-530	-0.632
BP	8021.25	9.57	5582.4	6.66	4914.54	5.86	2438.85	2.909	-667.9	-0.797	-3107	-3.705
BPq	2796.75	3.34	2953.2	3.52	3592.17	4.28	-156.45	-0.187	639	0.762	795.4	0.949
Bq	10775.2	12.85	8397.1	10.01	8235.36	9.82	2378.07	2.836	-161.7	-0.193	-2540	-3.029
Otv	6988.86	8.34	5628.6	6.71	2102.76	2.51	1360.26	1.622	-3526	-4.205	-4886	-5.827
Uso del suelo												
Ar	4765.23	5.68	4601	5.49	2563.3	3.06	164.19	0.196	-2038	-2.430	-2202	-2.626
At	45465.8	54.22	49955	59.58	54455.9	64.9	-4489	-5.354	4501	5.368	8990	10.722
Au	2568.51	3.06	5632.2	6.72	7434.89	8.87	-3063.7	-3.654	1803	2.150	4866	5.804
Ca	116.64	0.14	102.31	0.12	95.67	0.11	14.33	0.017	-6.64	-0.008	-21	-0.025
Picea	1499.76	1.79	496.44	0.59	132.93	0.16	1003.32	1.197	-363.5	-0.434	-1367	-1.630
Total	83849		83849		83849							

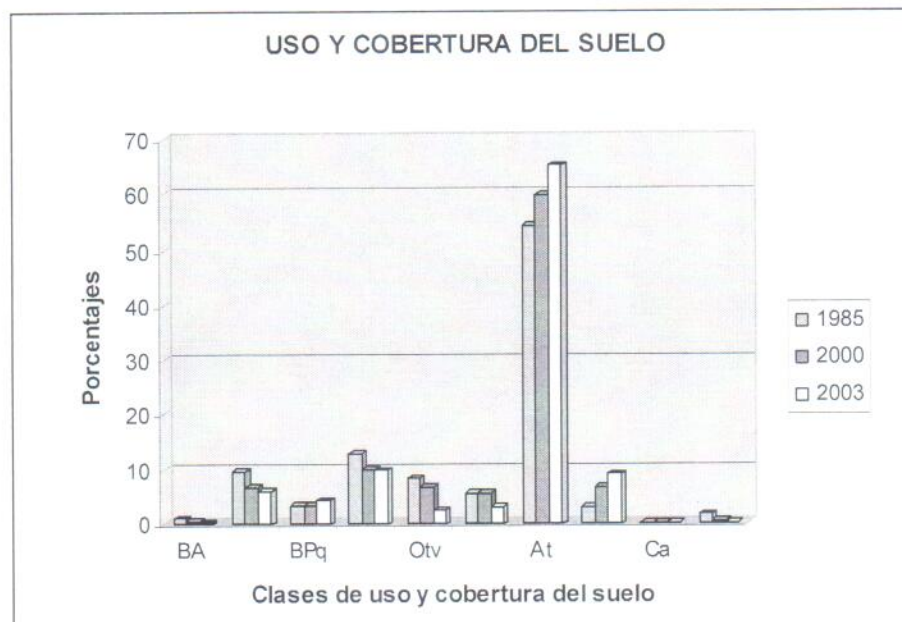


Figura 31. Tendencias de uso del suelo y cubierta vegetal

Las columnas 8, 10 y 12 del Cuadro 42 muestran las diferencias entre el t_1 y t_2 (1985-2000), t_2 y t_3 (2000-2003) y t_1 y t_3 (1985-2003). Las diferencias son proporcionales, esto es, entre más superficie se pierde en las zonas con cobertura forestal mas se gana en los usos.

Los cambios de uso del suelo en términos de clases en los dos periodos de evaluación muestran una tendencia a la baja en la cubierta forestal y de ganancia en los usos del suelo. Por ejemplo, la dinámica entre t_1 y t_2 muestra que el conjunto de las clases en las que se agrupa la cobertura forestal, en t_1 ocupaba una superficies de 29,433.2 ha y para t_2 (2000) ocupaba 23 062.3 ha. lo que significa que hubo perdida de 6 370.8 ha. una cifra baja en comparación con las estimaciones de SEMARNAT (1996) que reporta pérdidas de 1,000 a 1, 500 ha. anualmente en la región mientras que a nivel nacional se han estimado pérdidas de hasta 1,200,000 ha. anualmente de acuerdo con Lichtinger (2001).

Lo mismo ocurre entre el t_2 y t_3 se observa que para t_2 se encontró una superficie de 23 062.33 ha. y para el t_3 solo se registraron 19 166.40 ha., es decir disminuyó de 27.5% a 22.8% la cubierta forestal. El tipo de vegetación forestal sobre el que se observa más drástico el cambio negativo es sobre el BA debido a que la superficie que ocupa es insignificante en comparación con otras cubiertas, incluso hay autores como Trejo (1998) que ni siquiera reportan esta especie en la zona.

En el periodo t_1 y t_3 los mismos datos muestran un cambio más alarmante, se observa el cambio negativo de 29 433.15 ha. a 19 166 .40 ha., es decir, de 35.10% disminuyó a 22.86% lo que equivale a 10 266.75 ha. de cubierta forestal, siendo la clase de bosque de encino la más beneficiada, seguida de bosque de pino, pino-encino y otros tipos de vegetación.

En conclusión el cambio de uso y cobertura del suelo es mas representativo evaluada su dinámica entre t_1 y t_3 mostrando que la cobertura del suelo ha disminuido o se han perdido, en términos generales 12 % de la cobertura y dicha superficie ha sido incorporada a otros usos y en primer término agricultura de temporal, pastizales, áreas urbanas y pobladas y una baja proporción a agricultura de riego.

5.4.1. Tasas de cambio de uso del suelo

La tasa de cambio se calculó con la ecuación (2), la cual expresa la velocidad de cambio como tasa anual.

Derivado del Cuadro 42 se calculó la tasa de cambio anual en términos porcentuales que se presenta en el Cuadro 43.

Cuadro 43. Tasas de cambio de uso del suelo

Clase	1985-2000	2000-2003	1985-2003
Cobertura forestal			
BA	-3.471	-3.354	-5.264
BP	-2.388	-0.975	-2.685
BPq	0.364	1.518	1.400
Bq	-1.649	-0.149	-1.482
Otv	-1.433	-7.294	-6.455
C. f.	-1.613	-1.413	-2.355
Uso del suelo			
Ar	0.630	0.666	-3.599
At	5.374	2.264	1.007
Au	-0.870	-0.515	6.161
Ca	-7.106	-9.639	-1.095
Picea	0.741	0.479	-12.596
U.s.	0.741	0.479	0.965

En términos generales se observan valores negativos y positivos, los primeros expresan la tasa de cambio negativa, es decir, la velocidad de cambio con la cual se pierden las superficies, por el contrario los valores positivos muestran la velocidad de cambio a la alza de las mismas.

Se observa que entre t_1 y t_2 la tasa de cambio es de 0.790 % y entre t_1 y t_3 es todavía más apreciable la velocidad de pérdidas a 2.355%. valor muy cercano al reportado por Ordoñez (1995) y Rincón (2003) de 2.17 y 2.1 % considerando que no existe ordenación en la microcuenca por lo que no toda la superficie forestal se encuentra bajo manejo regular.

Los valores resultantes en el cambio de uso, producto de la ganancia o pérdida de las áreas bajo alguna cobertura forestal muestran una velocidad de cambio positivo, es decir, las áreas sujetas a algún uso están ganando superficies, como se

ha venido mencionando, las áreas con cubierta forestal están siendo fuente de cambios de uso del suelo.

Esta velocidad de cambio es más apreciable a nivel de uso y cubierta que de clase. Por ejemplo el bosque de abies se observa una deforestación de 3.47% entre t_1 y t_2 y de 5.26 entre t_1 y t_3 siendo las clase que más refleja pérdidas dentro de la cubierta forestal. Bosque de abies es seguido de bosque de pino con 2.68% de deforestación entre el t_1 y el t_3 . El bosque de encino a diferencia de las demás clases de cubierta se ve beneficiado con una ganancia de 1.40% entre el t_1 y el t_3 .

Entre los usos se encuentra que el pastizal inducido con erosión aparente es el que presenta mayor tasa de cambio (12.596%) y la agricultura de riego con 3.599 %. Esto se respalda con información vertida por el Centro de Mexicano de Derecho Ambiental que establece que actualmente en México hay una tendencia a la baja de la deforestación ya que no existen procesos importantes de colonización de tierras forestales, que existe una dinámica poblacional que incide en el abandono de tierras marginales, las que recuperan paulatinamente cubierta forestal.

En el uso de suelo urbano ocurre una velocidad de cambio significativo entre el t_1 y t_3 de 6.16% a la alza, es decir, ganó superficie de áreas de agricultura de temporal y otros tipos de vegetación principalmente.

5.5. Predicción de cambios de uso del suelo y su tasa de cambio

El análisis de cadenas de Markov arrojó los primeros datos de la predicción de cambios, en la primera matriz de probabilidades de transición se observan las probabilidades de que una clase pase a otra en el siguiente periodo de tiempo. Por ejemplo el bosque de abies (BA) tiene una probabilidad de pasar a bosque de pino (BP) de 0.2891 (Cuadro 44), el bosque de pino (BP) a agricultura de temporal (AT) tiene una probabilidad de 0.3037, la clase de agricultura de temporal (AT) es la que presenta la más alta probabilidad de permanecer como agricultura de temporal y de pasar a áreas urbanas de 0.6521 y a otros tipos de vegetación (Otv) de 0.7528. Un dato importante es que las clases catalogadas como de cubierta forestal presentan los valores más altos de ser transicionadas hacia otras clases o usos aunque la agricultura de temporal por la superficie que sustenta también tiene posibilidades altas de ser ocupada por otros usos además de que esta se distribuye de manera

uniforme en la mayoría de la zona tanto circundando a los centros poblacionales como en las partes más alejadas de la microcuenca.

El Cuadro 44 muestra la matriz de probabilidades de transición en la cual se observa la probabilidad de que una clase pase a formar parte de la otra o sea completamente una distinta en el siguiente periodo de tiempo.

Cuadro 44. Matriz de probabilidades de transición

Clase	BA	BP	BPq	BQ	AR	AT	Otv	AU	CA	Picea
BA	0.0776	0.2891	0.1421	0.2143	0.0000	0.2587	0.0131	0.0046	0.0001	0.0004
BP	0.0104	0.2169	0.1664	0.2726	0.0008	0.3037	0.0213	0.0070	0.0006	0.0002
BPq	0.0054	0.1946	0.1701	0.2917	0.0016	0.3087	0.0228	0.0040	0.0012	0.0000
BQ	0.0040	0.1110	0.0873	0.1884	0.0055	0.5387	0.0267	0.0371	0.0007	0.0006
AR	0.0001	0.0027	0.0025	0.0262	0.1319	0.6890	0.0218	0.1173	0.0065	0.0021
AT	0.0004	0.0123	0.0108	0.0477	0.0191	0.7604	0.0244	0.1224	0.0005	0.0021
Otv	0.0002	0.0056	0.0052	0.0354	0.0397	0.7528	0.0247	0.1329	0.0012	0.0022
AU	0.0003	0.0061	0.0053	0.0264	0.0391	0.6521	0.0206	0.2452	0.0010	0.0038
CA	0.0001	0.0015	0.0018	0.0228	0.0319	0.7145	0.0222	0.1973	0.0050	0.0028
Picea	0.0001	0.0030	0.0034	0.0287	0.0284	0.7452	0.0222	0.1656	0.0007	0.0028

En la matriz de áreas de transición Cuadro 45 la cual fue calculada usando las probabilidades pero ahora sobre los píxeles indica, en la columna 2 que con un error del 15% de acuerdo con Eastman (2003), 93 ha. pasarán de BA a BP, 20 permanecerán como BA, 46 pasarán de BA a BPq etc. quedando solo 149 de 317 ha. que existían en 2003 según la clasificación. Otro ejemplo se refiere a la AT de la cual existen 54 456 ha en 2003 pero se espera que aumente a 56 852 ha ganando 2 396 ha. de otros usos y coberturas.

Cuadro 45. Matriz de áreas de transición en ha.

Clase	BA	BP	BPq	BQ	AR	AT	Otv	AU	CA	Picea	TOTAL
BA	20	93	46	69	0	83	4	2	0	0	317
BP	51	1066	818	1340	4	1493	105	34	3	1	4915
BPq	19	699	611	1048	6	1109	82	14	4	0	3592
BQ	33	914	719	1552	45	4436	220	305	5	5	8235
AR	0	7	6	64	352	1697	54	289	16	0	2486
AT	22	668	586	2596	1040	41409	1330	6666	25	114	54456
Otv	0	12	11	74	83	1583	52	280	3	5	2103
AU	2	46	40	199	295	4904	156	1848	8	28	7526
CA	0	0	0	2	3	68	2	19	0	0	96
Picea	0	0	0	4	4	99	3	22	0	0	133
Total	149	3506	2837	6948	1832	56882	2008	9479	64	155	83858

El análisis de autómatas celulares de Markov produjo la distribución espacial de la predicción de superficies que se esperan en 2015 haciendo una comparación con el año base.

El Cuadro 46 muestra los datos de uso del suelo de 2003 y los esperados en 2015 los cuales fueron calculados en base a las matrices de probabilidades de transición y de áreas de transición.

Cuadro 46. Predicción de cambios de uso del suelo al 2015 en ha.

Clase	2003	2015	2003-2015	% Cambio	T. de cambio%
BA	321.57	231.21	-90.36	-0.108	-2.712
BP	4914.54	4023.54	-891	-1.063	-1.653
BPq	3592.17	3293.01	-299.16	-0.357	-0.722
BQ	8235.36	8242.92	7.56	0.009	0.008
Otv	2102.76	2736.72	633.96	0.756	2.220
C. Ftal.	19166.4	18527.4	-639	-0.762	-0.282
AR	2463.3	2088.54	-374.76	-0.447	-1.366
AT	54455.94	55469.88	1013.94	1.209	0.154
AU	7534.89	7534.71	-0.18	-0.000215	-0.000199
CA	95.67	95.67	0	0.000	0.000
Picea	132.93	132.93	0	0.000	0.000
U. s. p.	64682.73	65321.73	639	0.762	0.082
Total	83849.13	83849.13			

En el Cuadro 46 se observa que los datos esperados sobre las áreas con restricciones se mantienen estables o con poca variabilidad en las superficies, este comportamiento dentro de la modelación se debe a que se introdujeron restricciones sobre las áreas donde la probabilidad de un cambio de uso es baja (20%), es decir, se trata de áreas sobre las cuales está dado un uso de suelo, como lo son las áreas urbanas cuya vida útil es amplia, lo mismo sucede con áreas ocupadas por carreteras, concretamente sobre sitios que tienen infraestructuras definidas. Por el contrario, es más probable que se de un cambio (80 % de probabilidad para este estudio) ya que se ha venido observando un cambio más dinámico en las áreas bajo cubierta forestal que sobre las que ya tienen un uso establecido.

Con los datos obtenidos se obtuvo nuevamente la tasa de cambio entre las fechas mencionadas usando la expresión matemática mencionada anteriormente.

Como resultado de los datos proporcionados por el cálculo de la tasa de cambio se espera un cambio negativo en la mayoría de las cubiertas forestales por lo que se predice una disminución de la cubierta desde -0.722 a 2.22 % siendo las mas afectada la de bosque de abies (BA) por ser la que menor superficie representa con respecto al resto de las cubiertas. La agricultura de temporal y las áreas con otros tipos de vegetación como matorral crassicaule (cardonal y nopalera), chaparral y otras asociaciones de especies rosetófilas, encinos arbustivos, entre otras; se espera que aumente su superficie ganando tierras a las áreas con bosque y a la agricultura de temporal. Áreas como las pobladas y urbanas aparentemente se mantienen constantes y el resto de las clases podrían presentar variaciones mínimas en su superficie.

La matriz de áreas de transición del Cuadro 45 muestra una sobreestimación del cambio sobre la superficie de las clases ya que hasta este momento no había intervenido el factor espacial (mapa de conveniencia) el cual le dio a la modelación un sentido espacial real de la topografía del terreno. La Figura 31 muestra la distribución espacial esperada para el año 2015.

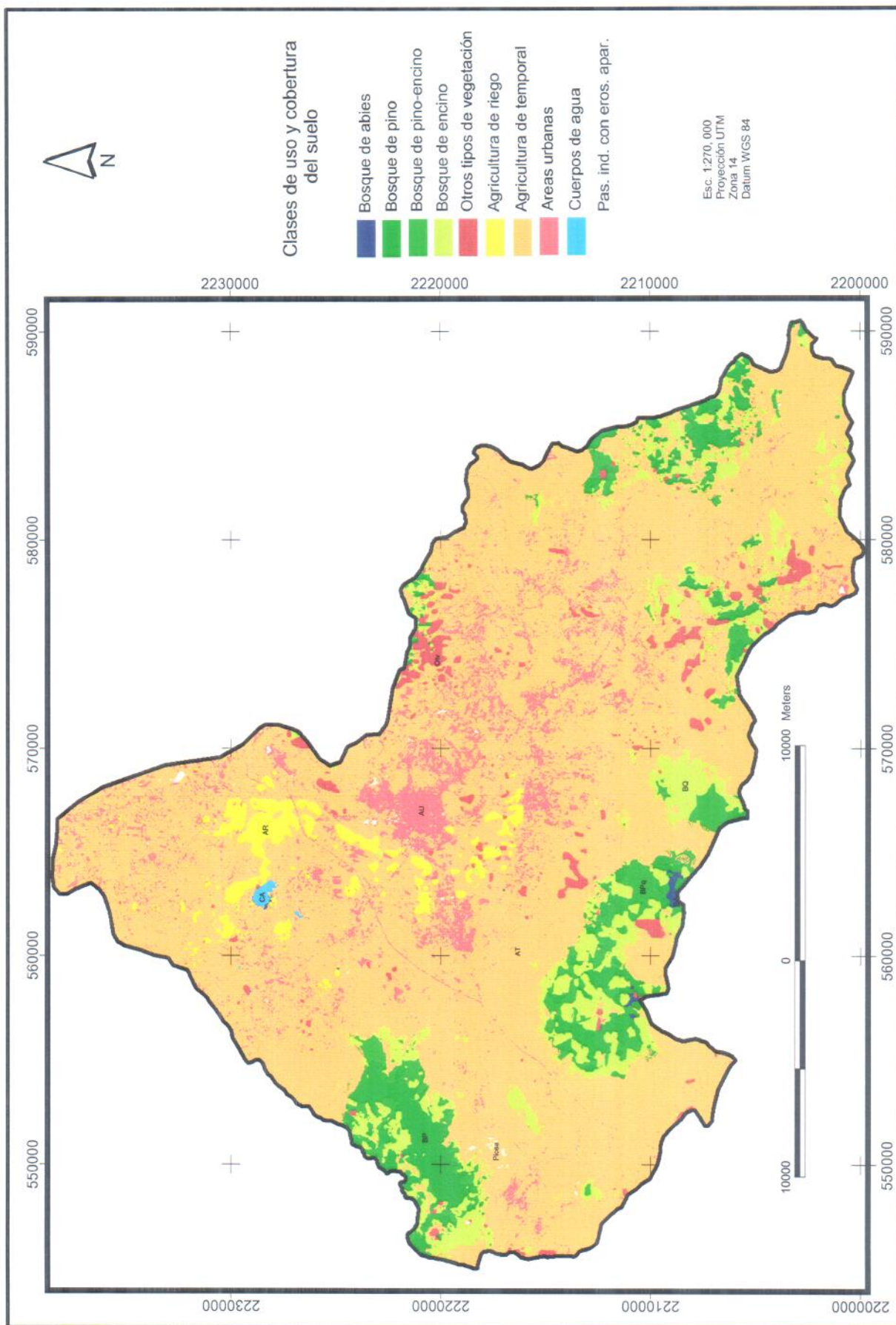


Figura 31. Proyección de uso y cobertura del suelo al 2015 de la microcuenca del Río Chico Tulancingo.

5.6. Superficies potenciales a deforestarse

Del presente estudio es importante destacar de manera general la cubierta sobre la cual se esta efectuando la tendencia de cambio. Se dice que hacer la agregación de las clases permite obtener la confiabilidad de la cartografía ya que la mayoría de las confusiones se da entre categorías a fines (Mas at al., 2002). Para calcular la parte final que se refiere a la predicción de las superficies potenciales a deforestarse se extrajeron los dos grupos de uso y cubierta del suelo con la finalidad de hacer más evidente el cambio. En el Cuadro 47 muestra que la tendencia del cambio de uso del suelo se está dando sobre la cubierta forestal.

Cuadro 47. Tasa de cambio de uso y cobertura del suelo entre 2003 y 2015.

Clase	2003	2015	2003-2015	% Cambio	T. de cambio%
C. Ftal.	19166.4	18527.4	-639	-0.762	-0.282
U.s.	64682.73	65321.73	639	0.762	0.082
TOTAL	83849.13	83849.13			

C. Ftal: Cubierta forestal.

U.s.: Uso de suelo.

Por lo que las superficies potenciales a deforestarse son las de uso forestal o de cubierta forestal. De esta manera observamos que las áreas cubiertas por bosques en el 2003 ocupaban 19 166.4 ha. mientras que para 2015 probablemente ocuparan 18 527 ha, es decir 0.762 % menos de la superficie actual y el avance de la tasa de cambio será de -0.282 % anual. Este valor no es representativo en comparación con la tasa de cambio que produjo el cálculo para el periodo entre 1985 y 2003 siendo que la diferencia de la tasa fue de -2.3 %.

5.7. Estimación de escurrimientos

De la información vertida anteriormente se tiene que existe una disminución de la vegetación entre escenarios, en 1985 existía 35.10%, en 2000 había 27.5%, en 2003, 22.83% y para el 2015 se esperan 22.0% de cubierta forestal, por lo que la estimación de los escurrimientos producidos por la PMM24h mediante modelación en HEC-HMS proporcionó los resultados presentes en los Cuadros 48, 49 y 50 para 1985 y los Cuadros 51, 52 y 53 para 2003, se eligieron estos dos escenarios por ser los que presentaron mayor tasa de deforestación (-2.35%) con tendencia hacia el uso agrícola de temporal, pastizales y uso urbano.

5.7.1. Estimación de escurrimientos, escenario 1985

Cuadro 48. Escurreimientos totales, gasto pico y pérdidas de una precipitación total de 114.92 mm. de Tr = 85 años.

C. estación	Nombre	Q. pico m ³ /s	Esc. Total mm	Perd. totales mm
13059	Acatlan	147.08	58.7	56.2
13061	Alcholya	6.49	27.7	87.2
13094	Acaxochitlán	1.44	34	80.7
21036	Ahuazotepec	15.08	37.5	77.3
13082	Esperanza	96.45	50.6	64.3
13099	Metepec	37.66	63.1	51.9
21066	Chignahuapan	17.31	35.7	79.1
13085	P. Tezoyo	27.54	44.8	70.1
13031	Santiago	78.51	54.6	60.3
13116	Sembo	4.82	16.1	98.4
13033	Singulucan	43.54	34.2	80.7
13029	San Lorenzo	41.99	29.1	85.6

Cuadro 49. Escurreimientos en el cauce.

Cauce	Q. entrada m ³ /s.	Q. salida m ³ /s.	Salida total mm.
Río san Lorenzo	17.31	17.19	35.7
Río Santa María	16.52	16.03	37.1
Río Chico Tulancingo	306.22	305.55	41.1

Gasto de entrada en metros cúbicos por segundo.

Cuadro 50. Escurreimientos en la intercepción de Río San Lorenzo y Santa María y salida de la microcuenca.

Intercepción	Q total m ³ /s	Salida total mm
Río San Lorenzo-Santa María	306.22	41.1
Salida de la microcuenca	483.11	44.33

5.7.2. Estimación de escurrimientos, escenario 2003.

Cuadro 51. Escurreimientos totales, gasto al pico y pérdidas de una precipitación total de 114.92 mm de Tr = 85.

C. estación	Nombre	Q. pico m ³ /s	Esc. Total	Perd. totales
13059	Acatlan	156.33	60.9	54
13061	Alcholya	17.35	60.9	54
13094	Acaxochitlán	2.01	44.7	70.1
21036	Ahuazotepec	42.4	39.3	75.6
13082	Esperanza	145.18	63.3	49.7
13099	Metepec	40.36	65.3	49.7
21066	Chignahuapan	47.9	37.5	77.3
13085	P. Tezoyo	81.45	48.6	66.3
13031	Santiago	91.01	60.9	54
13116	Sembo	11.32	14.8	99.6
13033	Singulucan	37.21	30.7	84
13029	San Lorenzo	91.02	60.9	54

Cuadro 52. Escurrimientos en el cauce.

Cauce	Q. entrada m ³ /s	Q. salida m ³ /s	flujo salida total
Río San Lorenzo	47.9	47.5	37.4
Río Santa María	42.4	40.94	39.2
Río Chico Tulancingo	503	497.13	41.4

Cuadro 53. Escurrimientos en la intercepción del Río San Lorenzo y Santa María y salida de la microcuenca

Intercepción	Gasto total m ³ /s	Salida total mm
San Lorenzo-Sta. María	503	41.4
Salida Río Chico Tulancingo	700.71	73.1

La modelación de los escurrimientos en la microcuenca, basados en una precipitación máxima de 24 horas representativa para el área muestra que estos, se ven influenciados por el cambio de uso y cobertura del suelo de un escenario a otro. A manera de ejemplo, en el área de influencia de la estación Acatlan del Cuadro 48, se observan 58.7 mm. de escurrimiento total y una pérdida de 56.2 mm. donde las áreas cubiertas con vegetación forestal representan el 22.65 % mientras que en el escenario de 2003 la cubierta disminuyó a 12.70 % y por tanto el escurrimiento aumentó a 60.9 mm. (Cuadro 51) en toda el área de influencia de esa estación donde los usos de suelo predominante es el uso agrícola de temporal y riego.

Las pérdidas totales bajo esta metodología se refiere a las abstracciones iniciales que es la cantidad de lluvia al inicio de la tormenta que no está disponible para el escurrimiento tales como las retenciones por presencia de vegetación, almacenamientos en pequeñas depresiones, evaporación en los primeros minutos de la lluvia de acuerdo con MacCuen (2005), aunque generalmente éstas se presentan en casos donde los suelos se encuentran completamente secos o sin ningún antecedente de humedad, lo cual no es el caso ya que por el evento que se analizó se considera que el suelo se encuentra con el máximo contenido de humedad.

Los Cuadros 49 y 52 muestran el volumen de escurrimiento a lo largo del cauce. El Río San Lorenzo y Santa María no presentan variaciones importantes en el volumen de entrada y el de salida pero sí entre escenarios indicando que a menor vegetación las avenidas pueden ser más cuantiosas y violentas produciendo mayores daños a la población de las partes bajas de la microcuenca, tal como se

reporta en el trabajo realizado por Sánchez *et al.* en donde en 20 años se aumentó el escurrimiento de en 10%.

Los Cuadros 50 y 53 muestran la concentración de los escurrimientos, el volumen escurrido en la unión entre el Río San Lorenzo y Santa María representa a los escurrimientos de ladera de las estaciones: P. N. Chignahuapan, Ahuazotepec, Acaxochitlán, Presa Tezoyo, San Lorenzo, Singuilucan, Santiago y Esperanza, mientras que a la salida de la microcuenca se concentran los de la unión más los de las estaciones restantes.

De manera general se observa que si hay efecto del cambio de uso y cobertura del suelo en los escurrimientos de la microcuenca del Río Chico Tulancingo. Los resultados obtenidos muestran una clara tendencia hacia la mayor concentración de escurrimientos en las partes bajas de la microcuenca como son las áreas de influencia de las estaciones que se ubican entre los 2200 y 2000 msnm (estación Esperanza, Alcholoya, Santiago Tulantepec), además son las áreas que presentan menor cobertura de vegetación forestal, la mayoría de la superficie sustenta uso agrícola de temporal, riego, áreas urbanas y pobladas y pastizales.

Para respaldar lo mencionado el Cuadro 54 muestra la relación de cubierta forestal con la cantidad de escurrimientos generados en cada una de las unidades de trabajo.

Los datos vertidos evidencian que a menor superficie con cubierta forestal es mayor la cantidad de escurrimientos. Hay áreas de influencia de estaciones como Ahuazotepec y P. N. Chignahuapan donde la cantidad de escurrimientos no varía, es decir, entre una fecha y otra la diferencia es de 1.8 mm., lo cual es una cantidad mínima en comparación con otras áreas de influencia, esto se debe a que las rocas presentan posibilidad media de contener agua y el tipo de rocas que predominan son las sedimentarias, ígneas y metamórficas lo cual permite que estas zonas funcionen como zonas de recarga debido al fracturamiento que las caracteriza, los suelos en su mayoría presentan textura media y un coeficiente de escurrimiento del 10 al 20 % de acuerdo con la información vertida en las cartas de hidrología de aguas subterráneas y superficiales de INEGI (1983). Además a pesar de que las zonas se encuentran en el rango de elevación de 2600 a 2400 msnm.

dentro de las áreas de influencia no presentan variaciones abruptas de pendiente sino que esta va de 4 a 6 % en ambas áreas de influencia.

En zonas de influencia donde la cantidad de escurrimientos es considerable tales como Alcholoya, Esperanza y San Lorenzo se explica porque presentan un porcentaje de ocupación del 60 al 90% de uso de suelo agrícola de temporal, áreas urbanas, pastizales y otros tipos de vegetación, la pendiente en las áreas de influencia de Esperanza y San Lorenzo es de 8 a 10% y la topografía es abrupta. El material geológico tiene posibilidades bajas, medias y altas, las áreas con posibilidades altas se localizan en las partes mas elevadas donde hay presencia de vegetación forestal, lo que explica que las áreas forestales actúen como captaciones de agua, por lo que a menor capacidad de escurrimiento un área tiene mayor capacidad de infiltración.

La diferencia en el gasto al pico muestra que el volumen de escurrimientos es mayor en áreas donde la disminución de la vegetación es considerable como el caso del área de influencia de la estación Esperanza donde de 25.59% disminuyó la cubierta forestal a 6.89% por lo tanto el volumen máximo de escurrimientos se reflejó alcanzando 145.18 m³/s en 2003 mientras que en 1985 tan solo fue de 96.45 m³/s.

La presencia de la cubierta forestal también repercute en la velocidad de los escurrimientos, retomando el mismo ejemplo y utilizando el Cuadro 36 de 4.2.3.7. se tiene que el volumen alcanzado en 1985 tomó un tiempo de 12.90 h. mientras que para 2003 el volumen máximo ocurrió a 10.60 h. de iniciada la tormenta. Las Figuras 32 y 33 muestran gráficamente el comportamiento del gasto pico o volumen máximo escurrido en m³/s en las áreas de influencia más representativas como lo son estación Esperanza y San Lorenzo. La observación de estos datos están escritos en Bedient y Huber (2002) en donde mediante un hidrograma evidencian que un cambio de uso del suelo a urbano el volumen escurrido es mayor y en menor tiempo.

Cuadro 54. Escurrimientos en relación a las superficies de los dos escenarios evaluados.

Estación	U. y C. Suelo	Escenario 1985			Escenario 2003			Dif. Esc.	Dif. Qp
		Sup. ha.	% sup.	Es. mm.	Sup. ha.	% sup.	Es. mm.	t1 y t2 mm	t1 y t2 m ³ /s
Acatlán	Cub. Ftal	3664.8	22.65	58.7	2055.6	12.7	60.9	2.2	9.25
	Uso predom.	12512.7	77.24		14121.9	87.29			
Alcholya	Cub. Ftal	17.9	1	27.7	204.21	11.45	60.9	33.2	10.86
	Uso predom.	1765.2	98.99		1578.87	88.54			
Acaxochitlán	Cub. Ftal	93.2	25.96	34	63.27	17.64	44.7	10.7	0.57
	Uso predom.	265.7	70.03		82.35	82.35			
Ahuazotepec	Cub. Ftal	1710.6	51.97	37.5	1176.66	35.75	39.3	1.8	27.32
	Uso predom.	1580.5	48.02		2114.64	64.25			
Esperanza	Cub. Ftal	3423.1	25.59	50.6	921.96	6.89	63.3	12.7	48.73
	Uso predom.	9950	74.4		12451.05	93.11			
Metepec	Cub. Ftal	222.80	6.00	63.1	24.48	0.66	65.3	2.2	2.7
	Uso predom.	3484.40	93.99		3682.71	99.34			
P.N. Chign.	Cub. Ftal	2064.06	51.18	35.7	1641.69	40.71	37.5	1.8	30.59
	Uso predom.	1968.84	48.82		2391.21	59.29			
P.Tezoyo	Cub. Ftal	1556.10	33.64	44.8	1055.16	22.81	48.6	3.8	53.91
	Uso predom.	3069.72	66.36		3570.66	77.19			
Santiago	Cub. Ftal	2773.35	29.17	54.6	1446.03	15.21	60.9	6.3	12.5
	Uso predom.	6734.07	70.83		8061.39	84.79			
Sembo	Cub. Ftal	2732.94	87.32	16.1	2488.59	79.51	14.8	-1.3	6.5
	Uso predom.	396.90	12.68		641.25	20.49			
Singuilucan	Cub. Ftal	4725.90	49.71	34.2	3126.51	28.90	30.7	-3.5	-6.33
	Uso predom.	6091.11	64.07		7690.50	71.10			
San Lorenzo	Cub. Ftal	6411.69	67.44	29.1	5159.70	39.55	60.9	31.8	114.34
	Uso predom.	6633.63	69.77		7885.62	60.45			

Dif.Es. Diferencia en escurrimiento

Dif. Qp. Diferencia en el gasto al pico

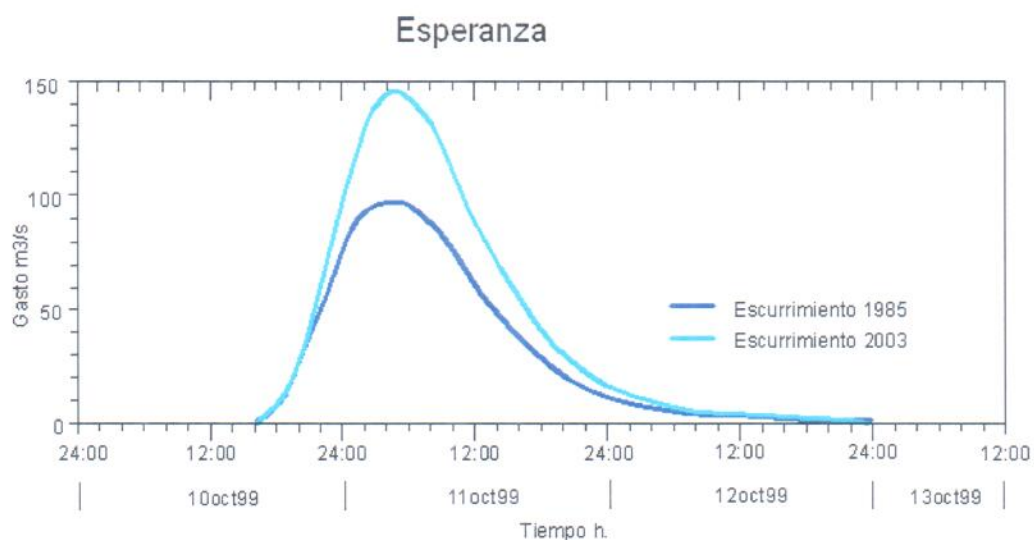


Figura 32. Hidrograma unitario de escurrimiento del área de influencia de la estación Esperanza.

Otro ejemplo se tiene en el área de influencia de la estación San Lorenzo donde la disminución en la vegetación del 27.89% se ve reflejado en el volumen escurrido aumentando un 109% entre el escenario de 1985 y 2003.

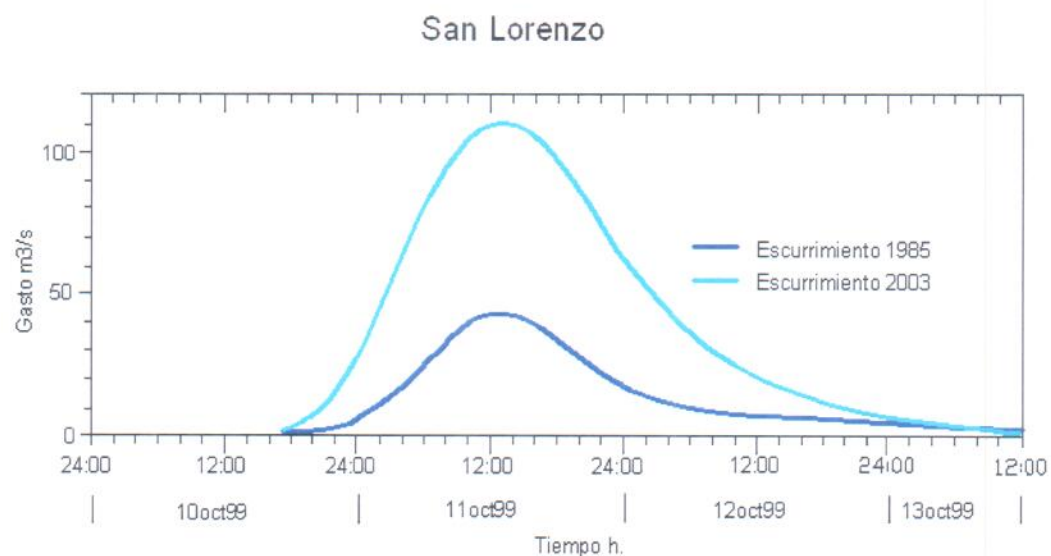


Figura 33. Hidrograma unitario de escurrimiento del área de influencia de la estación San Lorenzo.

No solo el volumen escurrido en cada área de influencia es importante, también el que se registra en los puntos de intersección y a la salida de microcuenca. El punto

de intersección entre el Río San Lorenzo y Santa María se le llamó zona inundable, ya que es la confluencia de las dos corrientes, aunado a la elevación del lugar de 2160 msnm. la cual es la mas baja y a la concentración de la población hacen que esta sea la zona de mayor riesgo. En la Figura 34 se observa gráficamente el volumen escurrido producido por las áreas de influencia de las estaciones Ahuazotepec, Acaxochitlán, Presa Tezoyo, San Lorenzo, Singuilucan, P. N. Chignahuapan, Esperanza y Santiago. Cabe destacar que la unión entre estos dos ríos es considerada como una zona crítica debido a que su ubicación corresponde a la zona más baja de la ciudad de Tulancingo donde hay concentración de población por lo que existe la presencia de puentes cuyas construcciones tienen efectos significativos en las inundaciones de acuerdo con Mahesh (2003).

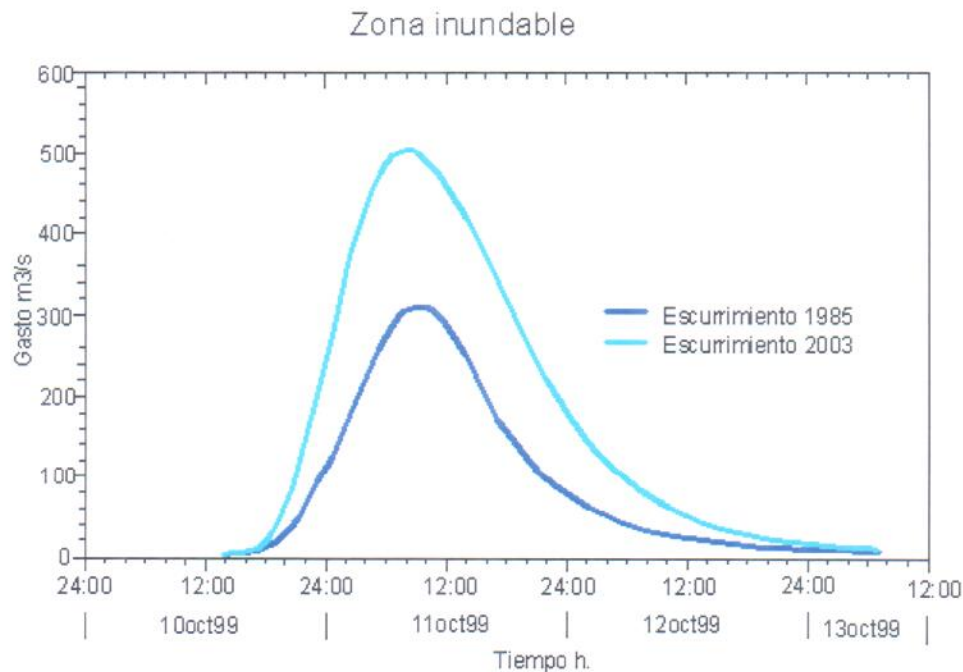


Figura 34. Hidrograma unitario de escurrimiento en la zona inundable.

Por tanto los escurrimientos en términos de gasto o volumen escurrido de los Cuadros 50, 53 y 54 indican que la cobertura del suelo de 35.10% en 1985 disminuido a 22.84% en 2003 produjo una diferencia en el volumen escurrido de 196.78 m³/s asumiendo una tormenta de con una altura de precipitación de 114.92 mm.

A la salida de la microcuenca se encontró un aumento del 45 % en el volumen escurrido entre el uso y cobertura del suelo de 1985 y el de 2003, es decir, se perdieron 10 266 ha en 18 años lo que produjo 217.6 m³/s más que en 1985. La Figura 35 muestra el comportamiento del volumen escurrido. En el apartado de anexos se pueden apreciar los hidrogramas de escurrimientos de cada una de las áreas de influencia restantes.

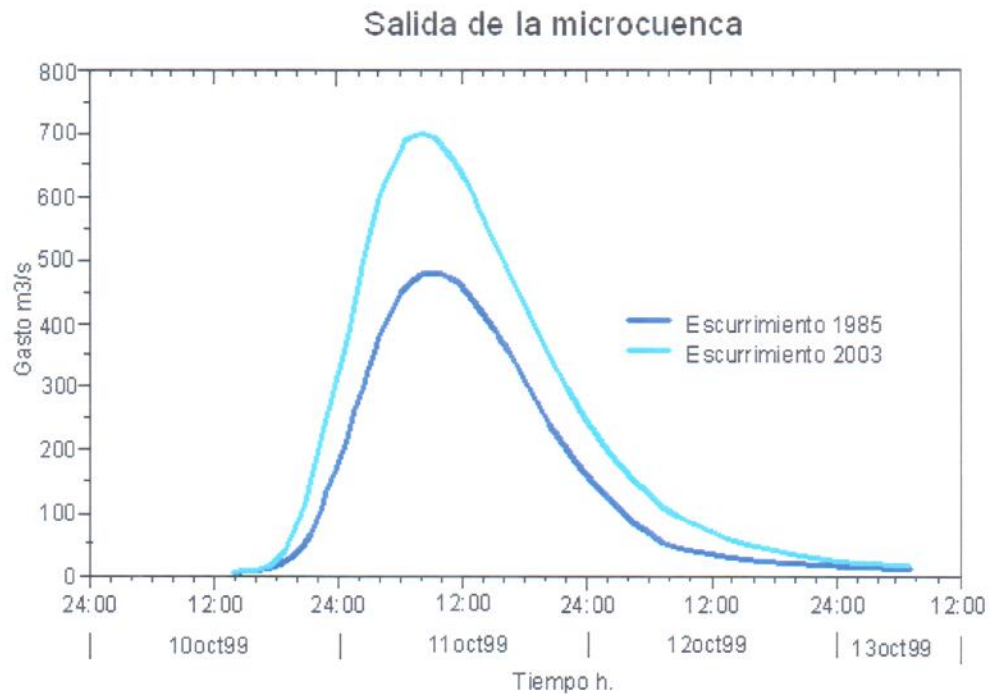


Figura 35 Hidrográfico unitario de escurrimiento a la salida de microcuenca.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

De acuerdo con los objetivos planteados e hipótesis propuestas así como los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye que la dinámica del cambio de uso del suelo en términos de porcentaje y tasa de cambio entre los escenarios evaluados es de 3.99% de pérdida de superficie forestal con una tasa de cambio de 0.790 % lo que equivale a la pérdida de 3 300 ha. de bosque agregados a otros usos entre el periodo de tiempo de 1985 y 2000.

En el segundo periodo de evaluación entre 2000 y 2003 se encontró un porcentaje de pérdida de superficie forestal de 8.30% con una velocidad de cambio de 9. 819% equivalente a 6 966 ha.

Finalmente entre la fecha 1 y 3, es decir, 1985 y 2003 se encontró un porcentaje de pérdida de 12.230%, a una velocidad de cambio del 2.355% anual equivalente a 10 267 ha. menos que en 1985.

La predicción de cambios proporcionó un porcentaje de deforestación en el 2015 de 0.762%, a una velocidad de 0.282 % equivalente a 639 ha.

El deterioro del 12% de la vegetación forestal tiene efectos en los escurrimientos superficiales producidos por la precipitación máxima media de 24 horas. Este resultó negativo entre la proporción de la cubierta vegetal y la cantidad de escurrimientos. La modelación de los escurrimientos en el escenario 1985 proporcionó 483.11 m³/s y en el escenario de 2003 aumentaron a 700.1 m³/s., es decir, un volumen de 217 m³/s más que en 1985, lo cual en las condiciones bajo las que se rige la microcuenca de partes muy bajas representan riesgos de inundaciones en periodos pico de lluvia.

6.2. Recomendaciones

En este tipo de estudios es importante realizar el tránsito de los almacenamientos de agua, no solo de sus avenidas en cauces ya que de ello depende la prevención de eventos catastróficos. En el presente estudio no se realizó el tránsito de la avenida en la Presa la Esperanza debido a que los objetivos estuvieron enfocados a evaluar el escurrimiento en laderas para observar el efecto amortiguador de la vegetación, sin embargo, es importante conocer el tránsito de la avenida o del volumen en los cuerpos de agua incluyendo el factor "cobertura del suelo con vegetación forestal" ya que comúnmente esta estimación se hace considerando solo variables hidráulicas.

Trabajar con una superficie grande implicó dificultad en el manejo de la información por lo que se recomienda observar y elegir unidades de trabajo mas pequeñas, por ejemplo un área de influencia de una estación en donde se pueda observar el efecto del cambio de uso de suelo en los escurrimientos de manera individual sobre las clases de uso.

Una manera de complementar el presente trabajo encaminandolo hacia el manejo integral de cuencas es definir áreas de protección y restauración de atención prioritaria en donde desarrollar e implementar programas de reforestación o forestación para el control de los escurrimientos.

Trabajar de manera conjunta con las instancias gubernamentales en la prevención de eventos catastróficos, mediante la planificación de la expansión urbana u ordenación en los municipios, desazolve de cuerpos de agua, reforestación, forestación, recolección de basura, concientización de la sociedad etc.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Adame, G. J. y P. Estrada B. 2003. Efecto de una doble concentración de bióxido de carbono en la atmósfera sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del Río Guayalejo- Tamesí en el Edo. de Tamaulipas de México. *Revista Climatológica*.
- Aparicio, M. F. J. 2004. Fundamentos de hidrología de superficie. Edit. LIMUSA. México, D. F.
- Barry, G.R. and J.R. Chorley. 1987. *Atmosphere, Weather and Climate*. 5^{ta}. Ed. Methuen. New York.
- Bedient, P.B. and W.C.Huber. 2002. *Hydrology and floodplain analysis*. 3era. ed. prentice-hall.
- Briassoulis, H. 2002. *Análisis of land use change: Theoretical and modeling approaches*.
- Bowling, M. B. P. 1996. Impacto ambiental en el corredor Los Reyes-Texcoco. Depto. De Sociología Rural. UACH. Texcoco Edo. De México.
- Caballero, D. M. 1990. El bosque como sistema de producción de agua. Ponencia presentada en el primer simposio nacional sobre el agua en el manejo forestal, Universidad Autónoma Chapingo,
- Castillo, P. E., P. Lehtonen, M. Simula, V. Sosa, y R. Escobar, 1989. Proyecciones de los principales indicadores forestales de México, a largo plazo (1988- 2012), reporte interno Subsecretaría Forestal, Cooperación México-Finlandia, SARH, México.
- Castillo, G. J., M. Luna R. y G. Martínez F. 1990. Impacto de la edad de la reforestación zapaliname sobre la infiltración y la erosión. Ponencia presentada en el primer simposio nacional sobre el agua en el manejo forestal, Universidad Autónoma Chapingo,
- Chow. V.T., D.R. Maidment y L.W.Mays. 1994. *Hidrología aplicada*. ed. mcgraw-hill interamerica, s.a. 1^{era} edición en español.
- Chuvieco, T. D. 1990. *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp. Madrid, España. 453 p.
- Clark, C. O. 1943. Storage and the unit hydrograph. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* Vol. 9, pp. 1333-1360.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). "Climas (Clasificación de Koppen, modificado por García)". Escala 1:1 000 000. México.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 1991. Estudio de Actualización Geohidrológica en el Valle de Tulancingo Edo. de Hgo. Subgerencia General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial. Gerencia Regional del Valle de México y de Hidalgo. 75 pp.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 1998. Programa Estatal Hidráulico 1996-2020 (Texto). CNA., Hidalgo; 198 pp.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2003. Programa Hidráulico Regional. 2002-2006 región XIII, Aguas del Valle de México y sistema cutzamala. México.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Principales almacenamientos del Edo. de Hgo. Área de hidroclimatología. Pachuca, Hgo. Información obtenida directamente del área de hidrometeorología.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Datos de estaciones meteorológicas. Área de hidroclimatología. Pachuca, Hgo. Información obtenida directamente del área de hidrometeorología.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Datos de estaciones meteorológicas. Jefatura de Hidrología Operativa. México, D.F. Información obtenida directamente en la Jefatura de hidrología operativa.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2006. Resultados de la modelación hidráulica en HEC-RAS de los Ríos de Tulancingo, Hgo. Área de hidroclimatología. Pachuca, Hgo. Información obtenida directamente del área de hidrometeorología.

Croke, B. F. W., W. S. Merritt and A. J. Jakeman. 2004. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments, *Journal of Hydrology* 291 (2004) 115-131.

Dirso, R. y M. C. García. 1992. Rates of deforestation en los Tuxtlas, a neotropical area in suotheast México. *Conservation Biology*, 6(1):84-90.

Eastman, R. J. 2003. Guide to GIS and image prossesing. Manual version 14. Clark Labs. USA. 306 pp.

FAO/UNESCO. 1970. Sistema de Clasificación de suelos modificada por la Dirección General de Geografía de INEGI. Aguascalientes, Ags.

FAO. 1995. Evaluación de los recursos forestales (1990), países tropicales. Estudios FAO Montes, núm. 112. Roma.

FAO. 1997. State of the World Forest in 1997.

FAO. 1988. An intern on the state of forest resorcesin the developing countries, Forest Resource Division, Forestry Department, Roma, Italia.

García, D. G. 2002. Lluvias Máximas y escurrimientos superficiales en zonas tropicales con fines de drenaje superficial. Depto. De Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Texococo, Edo. De México. 90 p.

García. M. F. 2003. Curso básico de topografía, planimetría, agrimensura y altimetría. Ed. PAX México. México, D.F.

Grainger, 1984. Quantifying changes in forest cover in the humid tropics: overcoming current limitations. Journal of Forestry Resource Management. Num. 1 pp. 3-63.

GOBIERNO DEL EDO. DE HIDALGO. 2001. Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hgo. México.

Gray, D. M. 1961. Synthetic unit hydrographs for small watersheds. J. Hyd. Div. Am. Soc. Civ. Eng. Vol. 87. No. HY4. pp. 33-54.

González, Q. L. 1968. Tipos de Vegetación de Valle de Mezquital, Hgo. INAH. Departamento de Antropología; México, D. F.

Gonzales G. R., Zaldivar M. P. Hernández Valera, G., I. Padilla, Olmedo M. de L. Carmona R. V. 1995. Las repercusiones socioeconómicas de la política agraria en el oriente del estado de México. Tesis DEIS. Sociología Rural. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Gumbel, E. J. 1958. Statistics of Extremes. Columbia. Univ. press.

Heerdegen, R. G. 1974. The unit hydrograph. A satisfactory model of watershed response. Water resour. Bul. Vol 10. No. 6. pp 1143-1161.

Henry, M. 1998 Land cover change monitoring, tutorial as part of an Arid Lands Graduate Seminar, The University of Arizona (en línea) disponible en: <http://aria.arizona.edu/courses/tutorials/change/intro.html>

Hundecha, Y and A. Bárdossy. 2003. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of river basin through parameter regionalization of a watershed model. Journal of Hydrology 292 (2004) 281-295.

INEGI. 1981. Anuario estadístico del estado de Hidalgo. Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP), Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística Geografía e Informática. México. D. F.

INEGI. 1983. Carta hidrológica de aguas superficiales. EDIC. 2003. Clave F14-11 y E14-2 escala 1:250,000. Aguascalientes, Aguascalientes.

INEGI. 1983. Carta hidrológica de aguas subterráneas. EDIC. 2003. Clave F14-11 y E14-2 escala 1:250,000. Aguascalientes, Aguascalientes.

INEGI. 1985. Cartas de uso del suelo y vegetación. Claves F14-11 y E14-2 escala 1:250,000. Aguascalientes, Aguascalientes.

INEGI. 1983. Cartas edafológicas. 2^{da} impresión 1999. Claves F14-11 y E14-2 escala 1:250,000. Aguascalientes, Aguascalientes.

INEGI, 1995. Cuaderno estadístico municipal de Huasca de Ocampo, Hgo. Ed. 1997. Aguascalientes, Aguascalientes.

- INEGI, 1995. Cuaderno estadístico municipal de Chignahuapan, Puebla . Ed. 1997. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1996. Carta topográfica F14D82, Tulancingo, Hgo. Ed. 1999. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1996. Carta topográfica F14D83, Huachinango, Hidalgo y Puebla. Ed. 1999. primera impresión 2000. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1996. Carta topográfica E14B12, Ciudad Sahagun, Hidalgo. Ed. 1999. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1996. Carta topográfica E14B13, Chignahuapan, Puebla. Ed. 1999. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 1999. Anuario estadístico del estado de Hidalgo. Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. 2000. Anuario estadístico del estado de Hidalgo. Aguascalientes, Ags. México.
- Johnnsen, J. CH and L.S. James, 1982. Remote Sensing for resourse management. Soil Conservation Society o America. Iowa.
- Jong, B, M. A. Castillo, O. Masera y A. Flamenco. 2001. Dinámica del cambio de uso del suelo y emisiones de carbono en el trópico húmedo de México. Informe final. ECOSUR y Instituto de Ecología de la UNAM Campus Morelia. 33 p.
- Lichtinger, V. 2001 Boletín 201. comunicado de prensa del 3 de diciembre del 2001. SEMARNAT.
- Lillesand, M. T. 1994. Remote Sensing and image interpretation. Ed. 3^{era}. University of Wisconsin-Madison EUA.
- Mahesh, R. G., Watanabe, K. and Ohno, H. 2003. Effect of bridge construction of floodplain hydrology- assessment by using monitored data and artificial neural network models. Journal of Hydrology 292(2004) 182-197.
- Malczewski, J. 1999. GIS And Multicriterio Decision Análisis. John Whey & Sons. Inc. DEpartament of Geography, University of Western Ontario. Canada. 392 p.
- Martínez, G. G. ---. Estimación de escurrimientos superficiales en la región de los Cabos, B. C. S. integrando percepción remota, sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos (HEC-HMS). Facultad de Geomorfología, Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Disponible en la página web www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/SELPER01-3.pdf revisado el 24 de febrero de 2006.
- Martínez et al. 2001. Variación promedio de la precipitación, escurrimiento y pérdidas de suelo en tres regiones de Oaxaca. Documento revisado el 8 de febrero, 2006 en http://www.colpos.mx/proy_rel/ladera/

Masera, O., M. J. Ordoñez y R. Dirso. 1992. emisiones de carbono a partir de la deforestación en México. Ciencia, Num. 43, pp. 151-153.

Masera, O. R., 1996. Deforestación y degradación forestal en México. Documentos de trabajo, No. 19, GIRA a.c. Pátzcuaro, México.

McCuen, R. H. 2005. Hidrologic análisis and desing. 3era. Edición. Prentice-Hall. 853 pp.

Medina-Cota, M. A. y J. Rzedowsky. 1981. Guía Botánica Forestal de la parte alta de la Sierra de Pachuca, en Guías Botánicas de Excursiones en México Vol. IV; Sociedad botánica de México; México, D. F., pp. 1-26.

Mejía, V. L. E. y Ortiz, S., C.A. 1986. Uso del levantamiento fisiográfico para propósitos de evaluación de tierras en la cuenca del Río Texcoco. Agrociencia No. 65. Centro de Edafología, Chapingo, México. Pp. 79-104.

Montenegro, E. 1993. Caracterización hidrológica y estimación de crecidas en la cuenca Taquiña. Convenio LHUMSS-PROMIC. Serie de estudios hidrológicos. Publicación No. 1. Cochabamba, Bolivia.

Myers, N. 1989. Deforestation rates in tropical forest and their climatic implications. Friends of the Herat, London England.

Noguez, H. R. 1993. Comparación entre imágenes Landsat Themathic Mapper (TM) y Multiespectral Scanner (MSS) en la clasificación de uso del suelo. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Edo. De México.

Ordoñez, J.A.B., F. Rosete, O. Masera y B. de Jong. 1995. Dinámica de cambio en la cobertura forestal y uso del suelo asociada a los almacenes y emisiones de carbono: caso de Santiago Tingambato, Michoacán, Mexico. 45 p.

Ortiz, V. B y C. A. Ortiz S.1984. Edafología. Universidad Autónoma Chapingo. Depto. De Suelos. Texcoco, Edo. de Méx.

Pérez, N. J. y E. Valdez, E. 2004. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. Publicado como ensayo en Agro ciencia. 39:409-418. 2005.

Pontius, R. G., J. D. Cornell y C. A. S. Hall. 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation for Costa Rica. Agriculture Ecosystem & Environment, 85(2001):65-81.

Puig, H. 1991. Vegetación de la Huasteca. Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Developpement en coopération (CEMCA). 1ª edición en español; México, D. F. 625 pp.

Repetto, 1988. The forests for the trees Government policies and the misuse of forests resources. World Resource Institute, Washington, DC.

Rincón, R. J. A. 2003. Cambio de uso del suelo en la sierra sur de Oaxaca mediante técnicas geomáticas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco Edo. de México.

Rodríguez, T. F. 1981. Elementos de escurrimiento superficial. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México. 224 pp.

Rodríguez, A. M. 1993. Clasificación automatizada de superficies arboladas mediante imágenes de satélite Landsat TM. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Edo. De México.

Ruiz, V. J. y M. Bravo E. 2001. Cubiertas vegetales y barreras vivas: Tecnología con potencial para reducir la erosión en Oaxaca, México. Terra. Vol. 19. No. 1.

Rzedowski. J. 1978. Vegetación de México. LIMUSA. México, D. F.

Sánchez, M. E., F. Lozano G. M. Bremen. B. y V.H. Guerra C. ---- Efecto del Cambio de uso del suelo en el escurrimiento de la subcuenca 24BF "Monterrey", Aplicando un SIG. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey y la Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en la página web www.ugm.org.mx/pdf/geos01-3/SELPER01-3.pdf revisado el 24 de febrero de 2006.

SARH. 1992. Inventario Nacional Forestal de gran visión, reporte principal. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, México. 49 pp.

SARH. 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico, México 94. Memoria Nacional. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, México. 81 pp.

SAGAR. 1997. Informe anual. México. D. F. 50 pp.

SEMARNAP. 1996. Panorama del Sector Forestal en Hidalgo. Delegación Federal en Hidalgo, Subdelegación de recursos naturales; SEMARNAP; Pachuca, Hgo. (inédito).

SEMARNAP. 1998. Diagnostico de la deforestación en México. Dirección General Forestal. 29 pp.

SEMARNAT. 2003. La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de los recursos naturales. México D. F.

Soria R. J., C.A. Ortiz, S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores Remotos, Principios y Aplicaciones en la Evaluación de los Recursos Naturales, Experiencias en México. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo México. 93 pp.

Snyder, W. M. 1955. Hydrograph analysis by the method of least squares. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. Vol 81. pp 1- 24.

Sánchez, V.A. 1987. Conceptos elementales de hidrología Forestal: agua, cuenca y vegetación. Vol. 1. Chapingo, Edo de México.

Scharffenberg, W. A. 2001. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual. U. S. Army Corps of Engineers.

Schneider, C. L. y R.L. Pontius Jr. 2001. Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 85(2001): 83-94.

Serneels, S. y E. F. Lambin. 2001. Proximate causes of land-use change in Narok District, Kenya: a spatial statistical model. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 85(2001):191-203.

Trejo, R. O. 1998. Principales tipos de vegetación en el estado de Hidalgo. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo Texcoco Edo. de México. 188 p.

Toledo, V. M. 1989. Bio-economic cost of transforming tropical forest to pasture in Latinoamerica. In: S. Hecht editor, *Cattle ranching and tropical deforestation in Latinoamerica*, Westview press, Boulder Colorado.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2001. User's Manual. Versión 2.1 U. S. A.

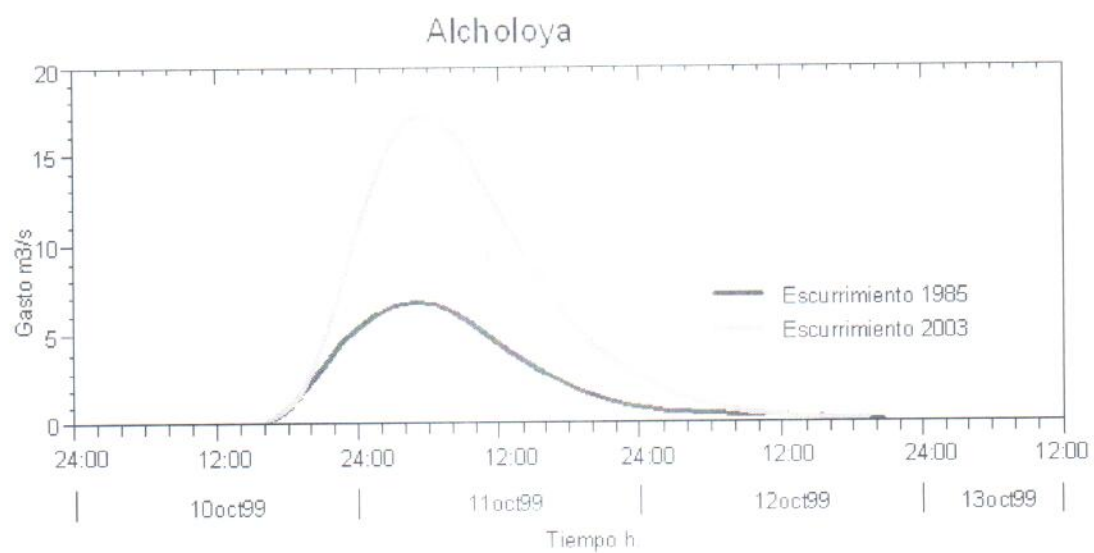
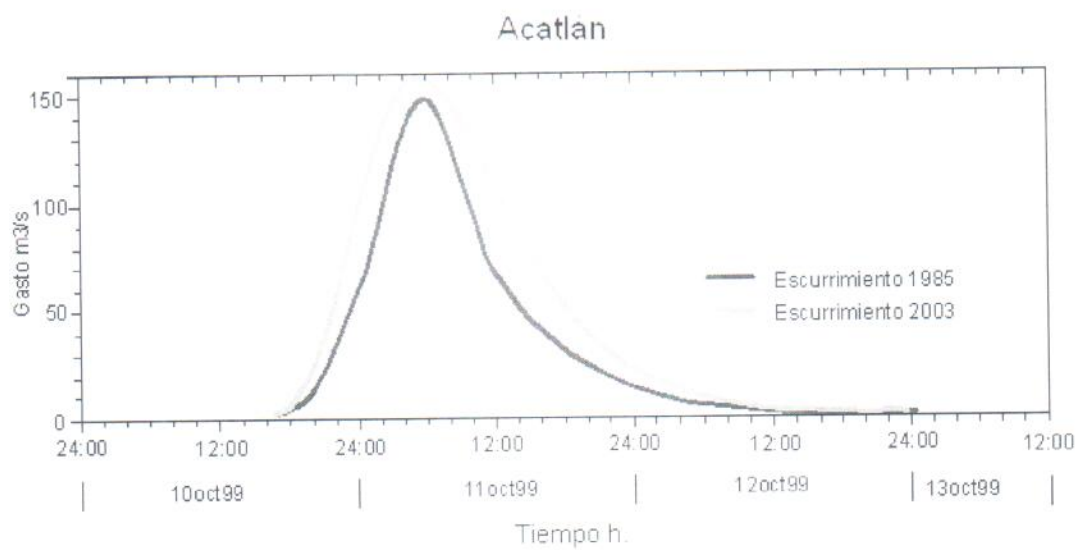
U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. U.S.A.

Velázquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga-Saucedo, J. L. Palacio, G. Bocco, G. Gómez-Rodríguez, L. Luna-González, I. Trejo, J. López-García, M. Palma, A. Peralta y J. Prado, Molina. 2001 El inventario Forestal Nacional 2000. Potencial de uso y alcances. *Ciencias*, pp. 64:13-19.

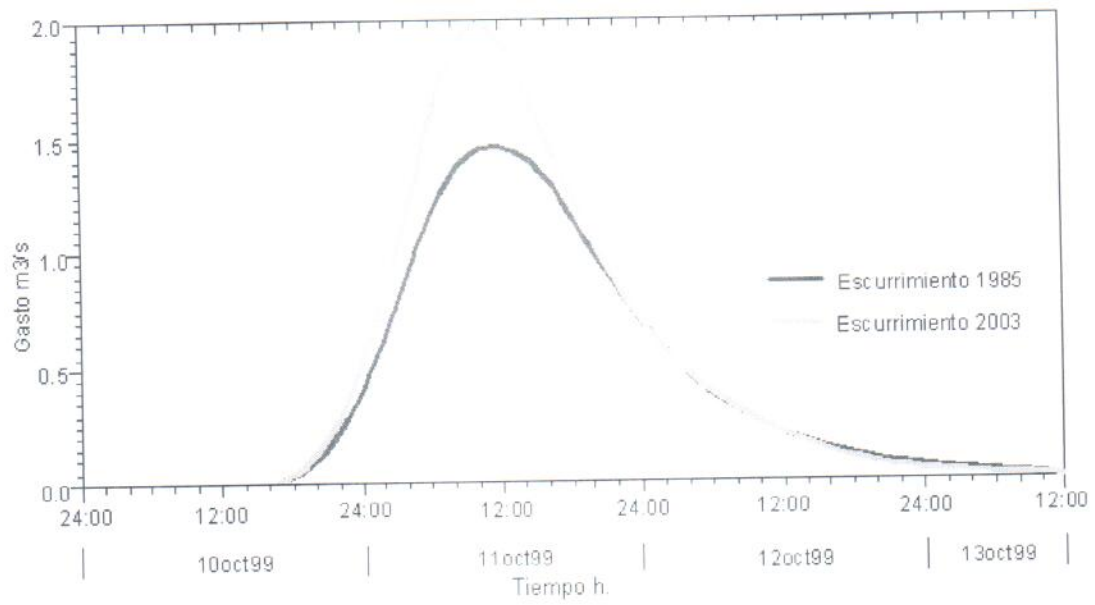
Velázquez, A., J. F. Mas, J. L. Palacio. 2002. Análisis de Cambio de uso del suelo. Convenio INE-IG (UNAM). México, D. F. 83 pp.

Zaldivar, M. P. 1998. Expansión urbana e intensificación agrícola en el uso del suelo y agua en la región Texcoco Edo. de México. Tesis de maestría. Colegio de Potsgraduados. Montecillo, Texcoco Edo. de México.

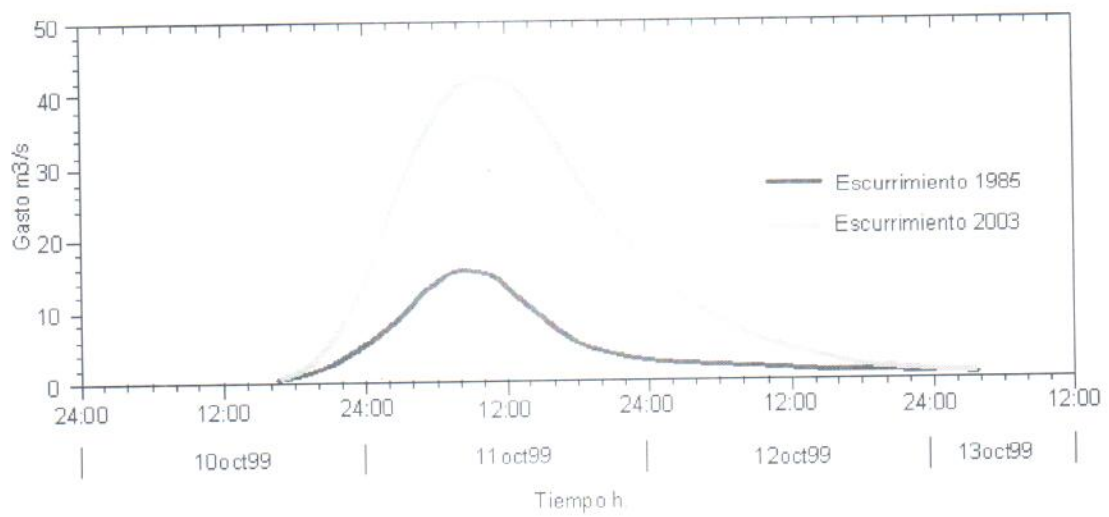
ANEXO



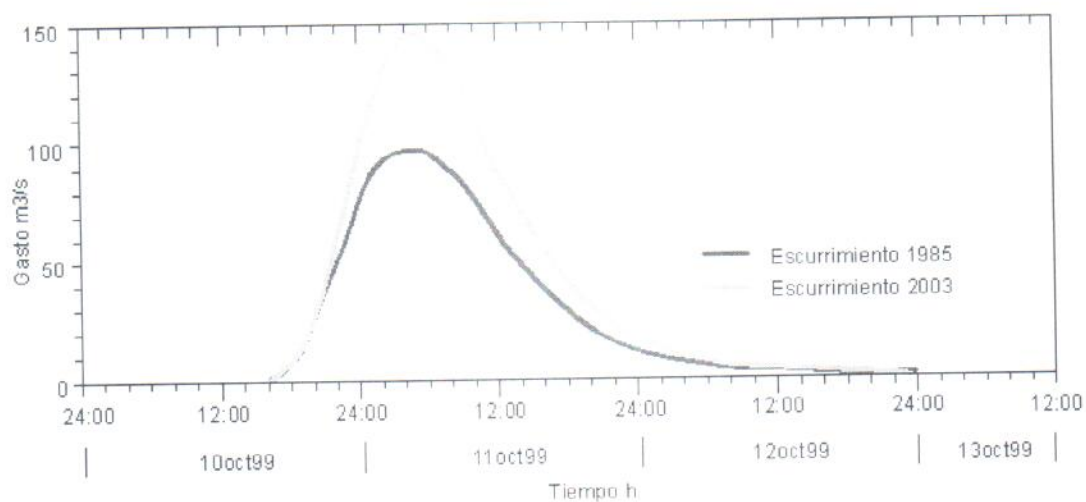
Acaxoxhitlan



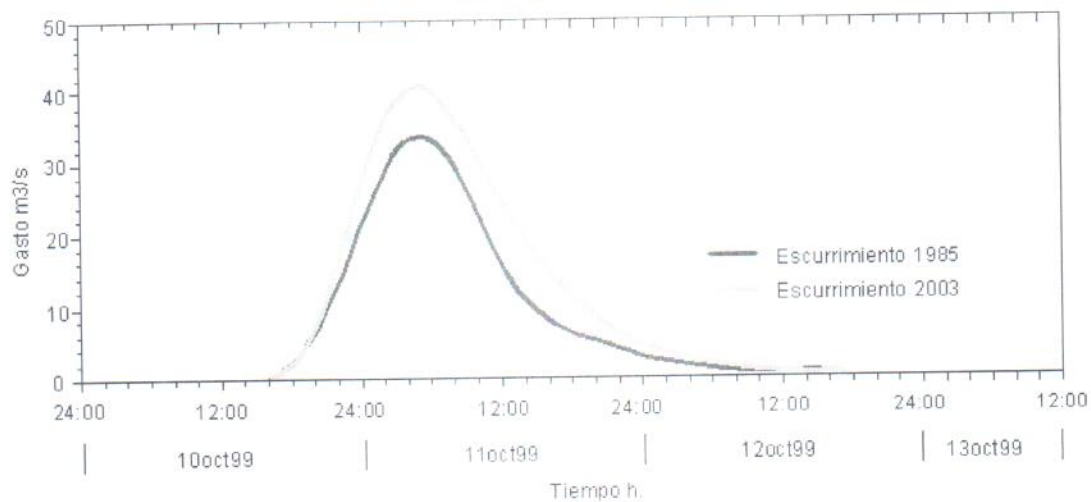
Ahuazotepec



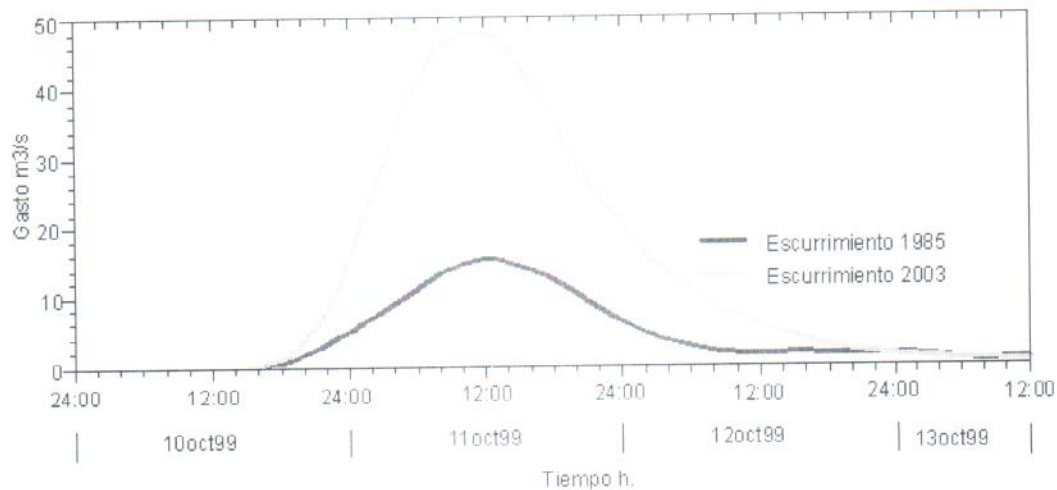
Esperanza



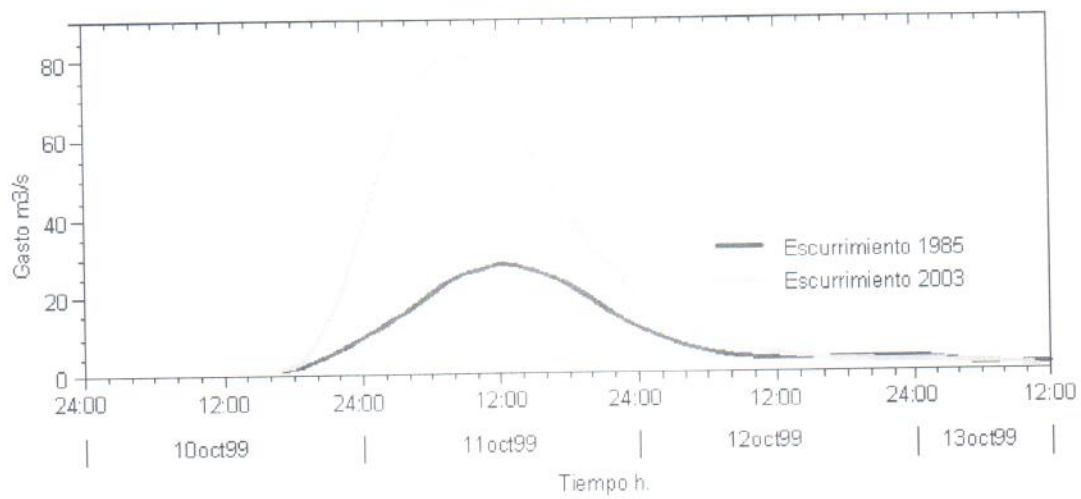
Metepec



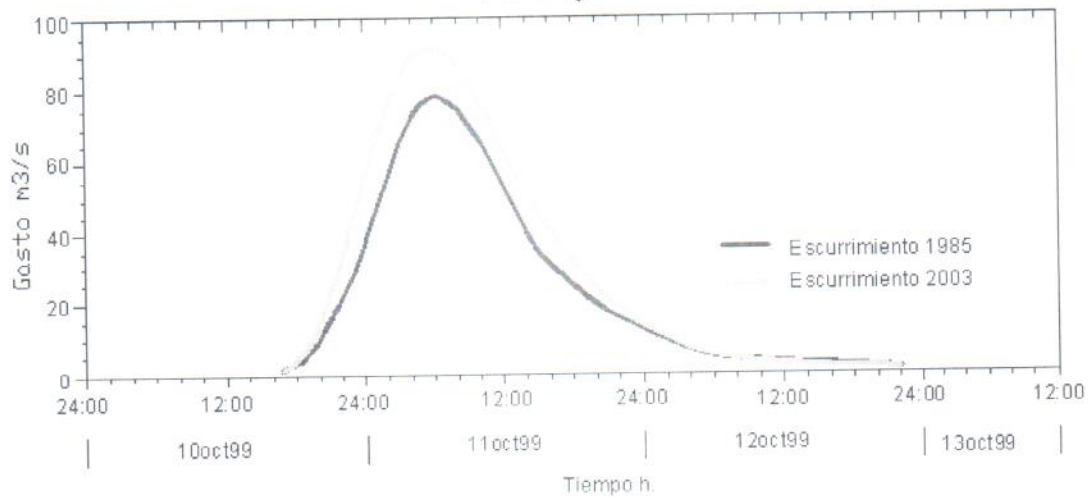
Chignahuapan



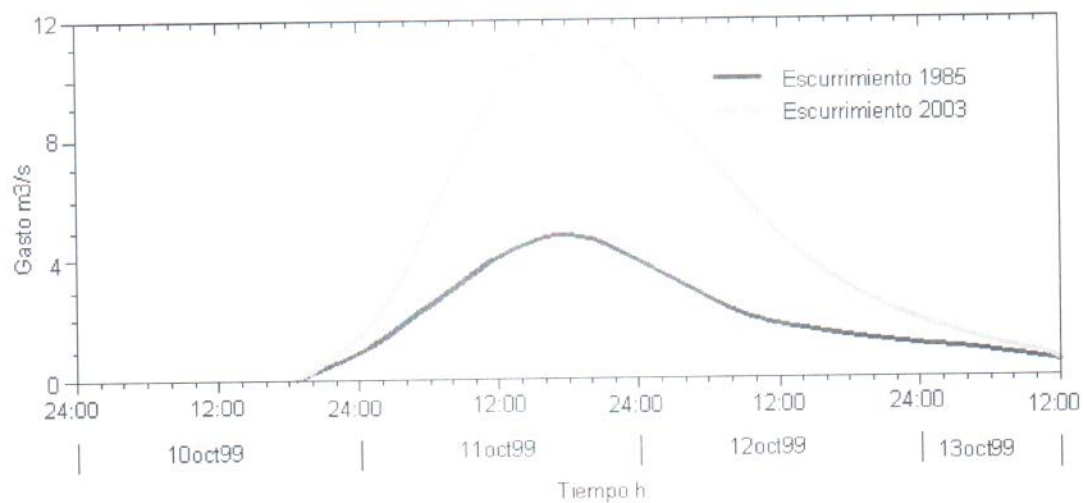
Presa tezoyo



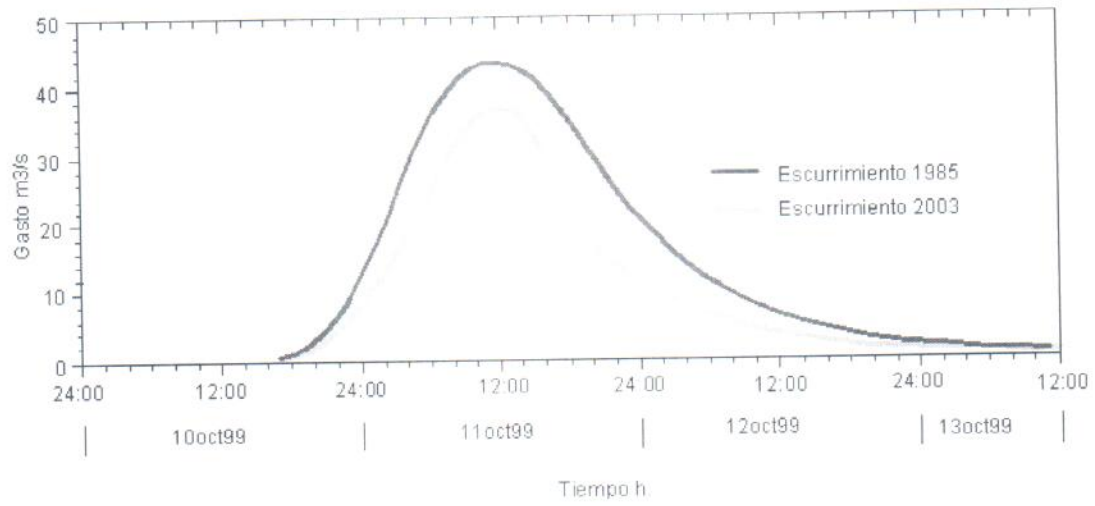
Santiago



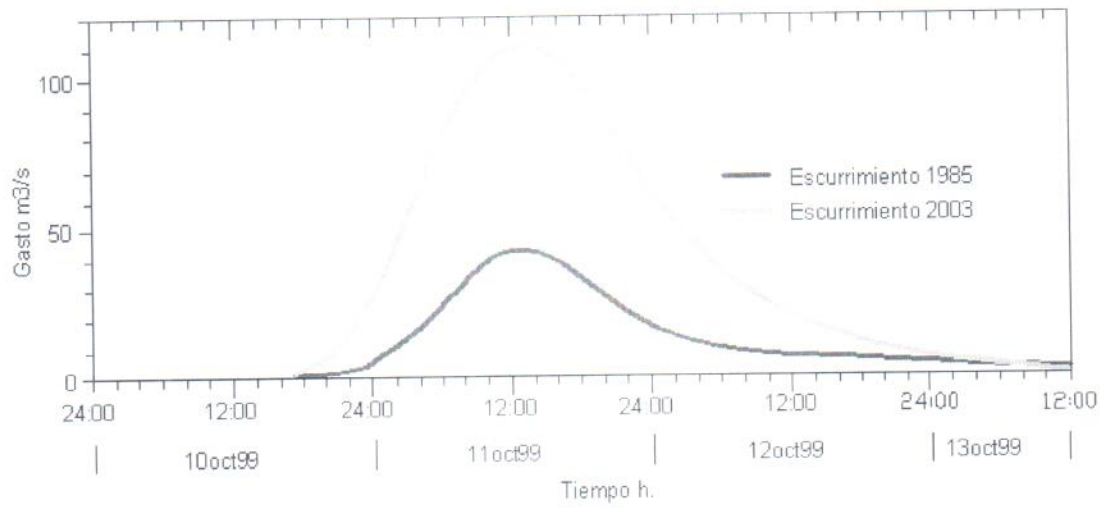
Sembo



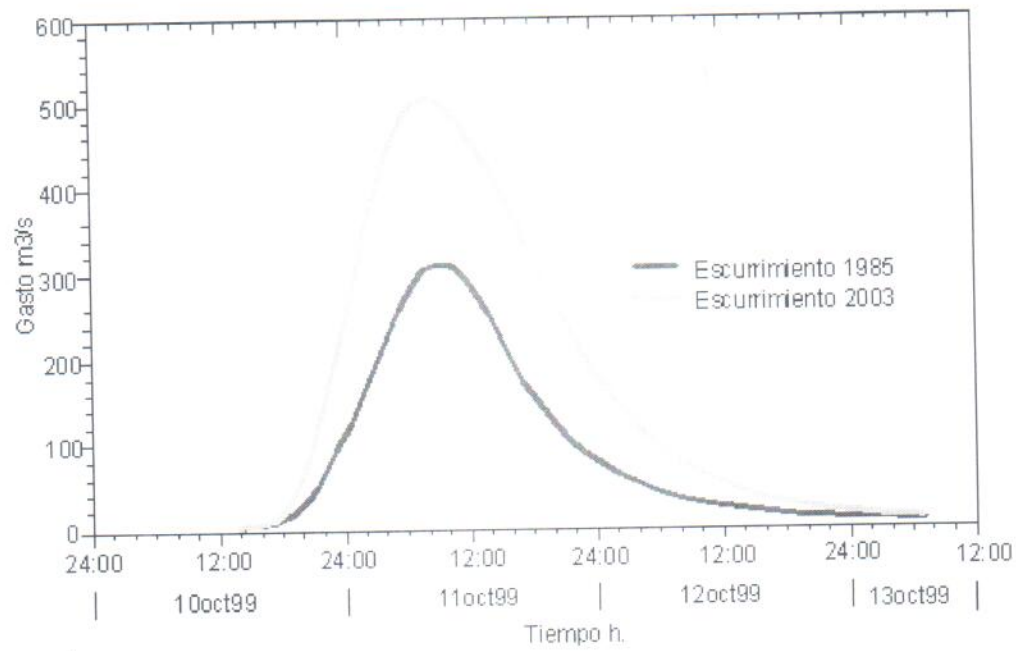
Singuilucan



San Lorenzo



Zona inundable



Salida de la microcuenca

