



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA**

**ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO
EN LA EROSIÓN CON UN MODELO HIDROLÓGICO:
CASO NEVADO DE TOLUCA**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

P R E S E N T A:

HOMERO ALONSO SÁNCHEZ

CHAPINGO, MÉXICO, JULIO DE 2009





ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA EROSIÓN CON UN MODELO HIDROLÓGICO: CASO NEVADO DE TOLUCA

Tesis realizada por Homero Alonso Sánchez, bajo la dirección del Dr. Lamine Diakite D., aprobada y aceptada por el Comité Asesor indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

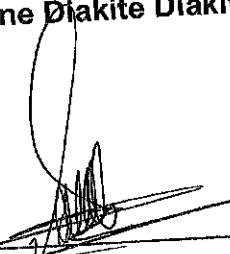
COMITÉ ASESOR:

DIRECTOR:



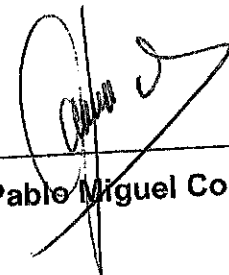
Dr. Lamine Diakite Diakite

ASESOR:



Dr. Aurelio Reyes Ramírez

ASESOR:



Dr. Pablo Miguel Coras Merino

Chapingo, México, Julio de 2009.



AGRADECIMIENTOS

A mí, al todo poderoso, a mi madre y hermanos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por haberme otorgado una beca para mis estudio de posgrado.

A mi alma mater la UACH

A Ronald Ernesto Ontiveros Capurata por la asesoría en la realización de este trabajo

A Flor María Segundo Roldan y Norverto Zavala Frutero por compartir sus conocimientos y contribuir así en la presente investigación

Al Dr. Lamine Diakite Diakite por la correcta dirección, asesoría y apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación

Al Dr. Aurelio Reyes Ramírez por su asesoría en la elaboración de esta tesis

Al Dr. Pablo Miguel Coras Merino por su asesoría en la elaboración de la tesis



DEDICATORIA

A mi madre, padre(+), hermanos y esposa; porque son mi genética, son mi motivo efectivo de seguir respirando, por ellos trato de superarme cada día y en aras de esto último he perdido tiempo que debería haberles dedicado.



DATOS BIOGRÁFICOS

Homero Alonso Sánchez nació el 19 de agosto de 1985 en Santa María Michimaltongo, Tula de allende, Hidalgo, donde curso el preescolar y la primaria en la escuela "Çuitlahuac", en 1996 ingreso a la escuela Telesecundaria #188 en Michimaloya, posteriormente en 1999 ingreso a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) terminando en 2002 continuando en el mismo lugar la Ingeniería en Irrigación del Departamento de Irrigación, egreso de la UACH en 2006 titulándose ese mismo año con la tesis que lleva por nombre INTEGRACION DE INFORMACION PARA LA OPERACIÓN DE UN MODULO DE RIEGO EN UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA. En el periodo de enero a junio de 2006 trabajo en la elaboración del Sistema de Información Geográfica del Distrito de Riego (DR) 030 Valsequillo, Puebla, en un convenio de colaboración entre la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la UACH. En el periodo de Julio a diciembre de 2006 trabajo en la elaboración del Sistema de Información Geográfica y actualización de Padrón de Usuarios de la Unidad de Riego "Los Insurgentes" en Zumpango, México, en un convenio de colaboración entre la CONAGUA y la UACH para la conformación del Distrito de Riego "Los Insurgentes". En el periodo de enero a diciembre de 2007 trabajo en la elaboración del Sistema de Información Geográfica y actualización del Padrón de Usuarios del DR 044 Jilotepec, México, también participo en la elaboración del Plan Director para la modernización del mismo DR y en la elaboración de un SIG para un estudio de inundaciones en las cuencas de los Ríos; Huhehuetan, Cacahuatan y Huixtla en el estado de Chiapas. En Agosto de 2007 ingreso al posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua de la UACH donde con la dirección del pHD. Lamine Diakite Diakite desarrollo estudios de cambio climático en glaciares tropicales usando SIG y Percepción Remota.

RESUMEN



ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA EROSIÓN CON UN MODELO HIDROLÓGICO: CASO NEVADO DE TOLUCA

Homero Alonso Sánchez¹ y Dr. Lamine Diakite Diakite²

RESUMEN

En este trabajo se evalúa el impacto del cambio climático sobre la erosión mediante el uso de un modelo hidrológico adaptado de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) y de una serie multitemporal de imágenes multiespectrales LANDSAT y SPOT de la década de los 80's y 2000. Esta evaluación se realizó en 52 microcuencas localizadas alrededor del volcán Nevado de Toluca.

Los resultados indican que 36 de las 52 microcuencas presentan un incremento promedio en la tasa de erosión de 25% y las 16 restantes mostraron un decremento debido a que tuvieron un cambio favorable en el uso del suelo.

Palabras Calve: Cambio Climático, Erosión, Imágenes de Satélite, Modelo Hidrológico, multitemporal.

1 Tesista

2 Director de Tesis



STUDY OF THE IMPACT OF CLIMATIC CHANGE ON LAND SOIL LOSS WITH AN HIDROLOGICAL MODEL: CASE NEVADO DE TOLUCA

Homero Alonso Sánchez¹ y Dr. Lamine Diakite Diakite²

ABSTRACT

This work evaluates the impact of climatic change on erosion by using an adapted hydrologic model of the Universal Equation of Loss Soil and of a multitemporary series of LANDSAT and SPOT multispectral images of the 80's and 2000 decades. This evaluation was carried out in 52 small watersheds located around the Nevada de Toluca volcano.

The results indicate that 36 of the 52 small watersheds show an average increase in the erosion rate of 25% and the 16 rest basins showed a decrease because they had a favorable change in land use.

Key words: Climatic Change, Soil Loss, Satellite Images, Hydrologic Model,

1 Thesis Autor

2 Thesis Director



INDICE GENERAL

	Pag.
1. INTRODUCCION	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 General	3
2.2 Específicos	3
3 HIPOTESIS	3
4 REVISION DE LITERATURA	4
4.1 EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EROSIÓN	4
4.2 DESERTIFICACIÓN Y DEGRADACIÓN	5
4.3 CUANTIFICACION DE LA EROSION	5
4.3.1 ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO CON USLE	6
4.4 EL PROCESO DE EROSIÓN	7
4.4.1 EROSION HIDRICA	8
4.4.1.1 Erosión por salpicamiento	8
4.4.1.2 Flujo superficial	9
5 MATERIALES Y METODOS	10
5.1 MATERIALES	10
5.1.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	10
5.1.1.1 Características fisiográficas de la región de estudio	10
5.1.1.2 Características Climáticas de la región de estudio	11
5.1.1.2.a <i>Temperatura</i>	11
5.1.1.2.b <i>Precipitación</i>	11
5.1.1.2.c <i>Evaporación</i>	12
5.1.1.3 Geología	12



5.1.1.4 Hidrografía y Geomorfología	13
5.1.1.4.a Geomorfología	13
5.1.1.4.b <i>Región Hidrológica y cuenca</i>	14
5.1.1.4.c Hidrografía	14
5.1.2 MATERIALES CARTOGRAFICOS	15
5.1.2.1 Cartas topográficas y mapas	15
5.1.1.2 Imágenes de Satélite	15
5.1.2.3 Software y Hardware utilizado para procesamiento de información digital	16
5.2 METODOS	16
5.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	17
5.2.1.1 Modelos Digitales de Elevación (DEM)	18
5.2.1.2 Partiendo del MDE a la red hidrológica	19
5.2.1.3 Dirección del Flujo	19
5.2.1.4 Área tributaria de drenaje	20
5.2.2 CUENCAS	20
5.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS	21
5.2.2.1.a <i>Área de la cuenca</i>	21
5.2.2.1.b <i>Pendiente de la cuenca</i>	22
5.2.2.1.c <i>Pendiente del cauce principal</i>	22
5.2.3 APLICACIÓN DEL MODELO MUSLE	22
5.2.3.1 Erosión	22
5.2.3.2 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada EUPSM	23
5.2.3.2.a <i>Calculo de la erosionabilidad de los suelo, K</i>	25
5.2.3.2.b <i>Calculo del factor por longitud e inclinación de la pendiente LS</i>	26
5.2.3.2.c Factor de manejo y cobertura C	28
5.2.3.3 Escurrimiento	28
5.2.3.3 a <i>Estimación del escurrimiento superficial por el</i>	29



<i>método del Número de Curva</i>	
5.2.3.3.b <i>Mapa de Grupo Hidrológico</i>	31
5.2.3.3.c <i>Mapa de Uso de Suelo</i>	31
5.2.3.3.d <i>Mapa de Escurrimiento</i>	34
5.2.3.3.e <i>Gasto al pico con el hidrográma unitario sintético</i>	35
5.2.3.4 <i>Cálculo de la Erosión</i>	37
6 RESULTADOS	38
6.1 EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	38
6.2 MICROCUENCAS HIDROLÓGICAS	39
6.3 FACTORES DE LA ECUACIÓN MUSLE	43
6.4 USO DE SUELO Y GRUPO HIDROLÓGICO	46
6.5 ESCURRIMIENTO	50
6.6 MAPA DE EROSIÓN	54
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
7.1 CONCLUSIONES	62
7.2 RECOMENDACIONES	63
ANEXOS	64
REFERENCIAS	70



INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla1. Bandas espectrales y resoluciones de los sensores LANDSAT	15
Tabla 2. Bandas espectrales y resoluciones de los sensores Spot	16
Tabla 3. Valores del Exponente (m) Dependiendo del Grado de Inclinación. Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.	27
Tabla 4. Grupos de suelos (HSGs)	30
Tabla 5. Características hidrológicas y de relieve de las microcuencas	40
Tabla 6. Porcentajes de los valores del factor K	44
Tabla 7. Porcentaje que ocupa cada grupo hidrológico de suelo	47
Tabla 8. Porcentajes de uso de suelo en la década de los 80's y 2000	49
Tabla 9. Erosión por cuenca en toneladas por año para 1989 y 2007 y el cambio	56
Tabla 9. Continuación. Erosión por cuenca en toneladas por año para 1989 y 2007 y el cambio	57



INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 Diagrama general para estimación de pérdida de suelo por erosión	17
Figura 2 Construcción del MDE (derecha) a partir de curvas de nivel (izquierda)	18
Figura 3 Dirección del flujo (derecha) a partir del MDE (izquierda)	20
Figura 4 Diagrama para generar las cuencas hidrológicas	21
Figura 5. Metodología para la estimación de pérdida de suelo con la ecuación MUSLE	25
Figura 6. Diagrama de dispersión Feature Space	32
Figura 7 Diagrama para generar el mapa de CN	34
Figura 8 Modelo Digital de Elevación	38
Figura 9 Microcuencas en un radio de 60 km del Nevado de Toluca	39
Figura 10 Mapa del factor de erosionabilidad k	43
Figura 11 Factor LS por inclinación y longitud de pendiente	45
Figura 12 Mapa del Factor C	46
Figura 13 Mapa de Grupos Hidrológicos de suelo	47
Figura 14a Uso de Suelo en la década de los 80's	48
Figura 14b Uso de Suelo en la década 2000	49
Figura 15 Mapa de cambio de uso de suelo	50
Figura 16a Número de Curva, CN en la década de los 80's	51
Figura 16b Número de Curva, CN en la década 2000	52
Figura 17a Escurrimiento (m^3) en la década de los 80's	53
Figura 17b Escurrimiento (m^3) en la década 2000	54
Figura 18a Erosión (ton/ha/año) en la década de los 80's	58
Figura 18b Erosión (ton/ha/año) en la década 2000	59
Figura 19 Mapa de cambio en la erosión	60
Figura 20 Cuencas con incremento de erosión	61



INDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1 <i>Características Geométricas de las cuencas</i>	64
Anexo 2 <i>Valores del Factor de Erosionalidad K, (FAO, 1980).</i>	66
Anexo 3 a <i>Valores del Factor C para diferentes Manejos del Suelo y Cultivos en México a partir de varios autores (Santos, 1995).</i>	67
Anexo 3 b <i>Factor C para Terrenos Forestales no Disturbados (Wischmeier et al., 1978)</i>	68
Anexo 3 c <i>Factor de Cobertura Vegetal C para Pastizales, Agostaderos y Terrenos en Descanso (Wischmeier et al., 1978)</i>	68
Anexo 4 <i>Valores de Numero de Curva</i>	69



1 INTRODUCCION

La temperatura de la tierra se ha incrementado de 0.74°C durante los últimos 100 años (IPCC, 2007), y estudios regionales realizados en el área de influencia del volcán Nevado de Toluca mostraron que la temperatura máxima se incremento cerca de 1.87°C en los últimos 34 años (Diakite *et al*, 2008). Estos cambios inciden en el ciclo vegetativo de los cultivos, además de que las intensas sequias favorecen la propagación de incendios dando cavidad a la desertificación y degradación de los suelos. Así mismo, los aumentos de temperatura vienen acompañados de cambios en el índice de precipitación que tienen un impacto directo en la tasa de erosión.

El cambio climático implica aumento de temperatura, muestra de ello es que el año 1998 fue el año más caluroso de los últimos 1000 años y el año 2001 fue el segundo más caluroso (NCDC,2002), además 9 de los 10 años más calurosos desde 1860 han ocurrido de 1990 a la fecha (WMO,2001). Además el calentamiento global traerá consigo un ciclo hidrológico más vigoroso, incluyendo mayor precipitación y más frecuentes e intensos eventos de lluvia. El promedio de lluvia y su intensidad aumentaron durante el siglo XX y de acuerdo con modelos de cambio climático se espera que siga aumentando (MA Nearing *et al*, 2009).

Los posibles impactos regionales de los cambios climáticos sobre la erosión, deben evaluarse por medio de modelos hidrológicos adecuados y sobre la base de escenarios climáticos plausibles, de cambios en la temperatura y precipitación a objeto de precisar la sensibilidad de las características hidrológicas de una cuenca o región.

La pérdida de suelo por erosión es un problema local, nacional y global que trae consigo problemas de fertilidad en los suelos, acarreo de contaminantes, azolve de embalses y degradación de hábitat acuático (Brady, 2000). El estudio del proceso de erosión es reciente en México en lo que se refiere a su evaluación



regional así como su distribución en el tiempo y espacio. Los estudios relativos a este proceso se han intensificado en los últimos 20 años con más del 70% de ellos realizados a partir de los años setenta (Maass *et al*, 1990).

La estimación de la erosión por métodos indirectos implica el uso de modelos basados en las características físicas de la cuenca (roca, suelo, cobertura vegetal y relieve). Las características físicas determinan la tasa y tipo de ocurrencia de los procesos hidrológicos. En este trabajo se compararon los resultados de la estimación en subcuencas utilizando el método del Numero de Curva (USDA, 1986) con un enfoque espacial, haciendo uso de información de cobertura vegetal para dos periodos (1989 y 2007), obteniéndola del procesamiento digital de imágenes de satélite. La reducción de la cobertura vegetal a través del tiempo constituye un factor importante de variación en los valores de erosión.



2 OBJETIVOS

2.1 General

Determinar el efecto del cambio climático en la erosión a nivel de microcuencas en el área de influencia del volcán Nevado de Toluca, usando un modelo hidrológico para cuencas pequeñas.

2.2 Específicos

Usar las herramientas de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica para estimar los parámetros del escurrimiento superficial calculado por el método del Número de Curva.

Cuantificar el impacto del cambio climático sobre el uso de suelo y vegetación.

Evaluar la pérdida de suelo por erosión en las microcuencas del Nevado de Toluca utilizando el modelo hidrológico que es una modificación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para cuencas pequeñas.

3 HIPOTESIS

El cambio climático ha generado una alteración del uso del suelo y distribución de la vegetación natural y consecuentemente un cambio en la tasa de erosión y de degradación de suelos.



4 REVISION DE LITERATURA

4.1 EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EROSIÓN

El año 1998 fue el año más caluroso de los últimos 1,000 años en el mundo y el año 2001 fue el segundo más caluroso (NCDC,2002), además 9 de los 10 años más calurosos desde 1860 han ocurrido de 1990 a la fecha (WMO,2001).

El cambio climático a nivel mundial se ha detectado desde el siglo pasado, la temperatura en la superficie de la tierra aumentó de 1 a 3.5°C (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2001) y de acuerdo con el cuarto informe del IPCC (2007), el promedio mundial de la temperatura de la superficie se incremento en 0.74°C de 1906 a 2005 mostrando un incremento más acelerado en los últimos años.

Los estudios hechos con anterioridad muestran una tendencia de incremento en las temperaturas del área circundante al volcán Nevado de Toluca con un incremento promedio de temperatura máxima de 1.87 °C (Diakite *et al.*, 2008) lo que incide en el ciclo vegetativo de los cultivos, además las intensas sequias favorecen la propagación de incendios dando cavidad a la desertificación y degradación de los suelos. Así mismo, los aumentos de temperatura vienen acompañados de cambios en el índice de precipitación que tienen un impacto directo en la tasa de erosión. El calentamiento global traerá consigo un ciclo hidrológico más vigoroso, incluyendo mayor precipitación y más frecuentes e intensos eventos de lluvia (MA Nearing *et al*, 2009). El promedio de lluvia y su intensidad aumento durante el siglo XX y de acuerdo con modelos de cambio climático se espera que siga aumentando. Karl y Knight (1998) encontraron que de 1910 a 1996 hubo un aumento hasta de 53% en la precipitación en centro y norte América, lo cual indica que el escurrimiento tuvo que aumentar al ser proporcional a la precipitación. El incremento del escurrimiento tiene un efecto directo en el



incremento de la erosión porque aumenta la facilidad de desprendimiento de las partículas de suelo. De manera que el aumento de la tasa de erosión es proporcional al aumento en temperatura y precipitación (MA Nearing, 2004)

4.2 DESERTIFICACIÓN Y DEGRADACIÓN

La desertificación y degradación de suelos es el resultado de factores diversos específicamente las variaciones climáticas muestra de ello fue la intensa sequia que afecto al país en 1998 cuando el número de incendios fue 57% mayor que el promedio en el periodo 1996-2004 (CONAFOR, 2002 y 2008)

Los incendios forestales son un factor acelerador en el caso de la erosión y degradación de los suelos, y son inducidos principalmente por la sequia que es considerada el principal detonador de la desertificación (CONAFOR, 2007).

El uso de SIG para la aplicación de modelos de predicción de pérdida de suelo han dado buen resultado al disminuir los tiempos para procesar la información por la facilidad para procesar grandes volúmenes de datos, además Burroughs Y McDonnell (1998) indican que es muy útil la aplicación de modelos empíricos debido a que es relativamente fácil su proceso y análisis.

4.3 CUANTIFICACION DE LA EROSIÓN

Para la cuantificación de la erosión existen diferentes métodos, indirectos y directos, uno de los cuales consiste en hacer mediciones en campo para cuantificar las pérdidas, otros método utilizan modelos matemáticos para cuantificar las pérdidas. En este caso se utilizó un modelo hidrológico, además se describen a manera de ejemplo algunos otros que existen.



4.3.1 ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO CON USLE

Se puede calcular mediante el uso de modelos matemáticos, entre ellos se encuentra la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) actualmente es el modelo más utilizado para hacer esta predicción. Esta ecuación ha sido desarrollada en campos experimentales de estados Unidos, para su aplicación en México se ha adecuado la ecuación en el Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas (CREZAS). Así, la manera para evaluar los factores ha sido adaptada a las condiciones de México.

La ecuación básica para la estimación de pérdida de suelo es:

$$A = R K L S C P$$

Donde:

A es el promedio anual de pérdida de suelo (ton/ha)

R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ mmm/ha hr)

K es el factor de erosionabilidad del suelo (ton ha hr/MJ mm ha)

L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S es el factor de grado de la pendiente (adimensional)

C es el factor de manejo de los cultivos (adimensional)

P es el factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional)

Se han desarrollado algoritmos que calculan la erosión, los cuales están basados en modelos matemáticos Uno de estos modelos es SHETRAN desarrollado por John E. (2002) el cual simula los deslizamientos y sitios de depósito de sedimentos en 3D. Otros menos complejos como el CASC2D desarrollado por Fred L. y Pierre Y. (2002) predice la pérdida de suelo en 2D al utilizar la siguiente expresión matemática:

$$q_s = 25500 * q^{2.035} * S_f^{1.664} * \frac{K * C * P}{0.15}.$$

Donde:



$q_s = \text{Flujo de sedimentos en } \text{ton} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$q = \text{escurrimiento mm}$

$S = \text{pendiente a dim}$

$K, C, P = \text{de la ecuación USLE}$

Otro modelo es el RAFLER (Rainfall-Flow-Erosion) propuesto por Meyer (1971) el cual se plantea como sigue:

$$D_r = K D K_s i^2 (1 - Z_w / Z_M) (1 - C_g)$$

Donde:

D_r pérdida de suelo en $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$

i Intensidad de lluvia en mm / h

K_D coeficiente de desprendimiento ($= 0.0138 \text{ N} / \text{mm}^2$) (Forster, 1982)

K_s erosividad del suelo (de la ecuación USLE) en $\text{kg} \cdot \text{h} / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$

Z_w La mínima de agua y suelo en m.

Z_M penetración de las gotas de lluvia $= 3(2 / 23i^{0.187})$ en mm (Li, 1979)

C_g Cobertura

4.4 EL PROCESO DE EROSIÓN

El proceso de erosión en general es el desprendimiento, transporte y depósito de las partículas o agregados de la superficie del suelo debido a la acción del agua o del viento. Las partículas de suelo pueden ser desprendidas por la energía cinética del azote de las gotas de lluvia o por los remolinos que se forman en el escurrimiento luego por acción de la gravedad estas partículas son arrastradas hacia aguas abajo. En este sentido, la erosión es un proceso físico que requiere de energía, esta energía es producida en el suelo por los momentos (masa x velocidad) de los impactos de las gotas de lluvia o por los momentos de los remolinos en los flujos turbulentos o por el viento. Estas dos fuerzas son las que



causan el desprendimiento y transporte de las partículas en el proceso de erosión. (Kenneth et al., 1997).

El manual de conservación del suelo y del agua, especifica las siguientes formas de erosión inducida: hídrica, por gotas de lluvia o por salpicamiento, laminar o en canales, por cárcavas, en pedestales, en pináculos, tubular y erosión por caída o remontante. Además proporciona información para la cuantificación de la pérdida del suelo y los métodos de reconocimiento.

4.4.1 EROSIÓN HIDRICA

Este tipo de erosión se da principalmente debido al efecto de la lluvia. Las características de la lluvia, intensidad, duración y frecuencia determinaran que tan severo sea el efecto de la lluvia en el desprendimiento y transporte de las partículas del suelo.

4.4.1.1 Erosión por salpicamiento

El salpicamiento es un proceso más efectivo a medida que se incrementa la pendiente, beneficiado a su vez por la presencia de viento durante el proceso de lluvia. La velocidad del viento le da un aumento de la fuerza horizontal a las gotas de lluvia de modo que al golpear el suelo el efecto de desprendimiento es mas severo, evidentemente este fenómeno afecta mayormente a los suelos arenosos, sin embargo, existe una relación probabilística que muestra el efecto nulo del salpicamiento en el proceso de erosión, la importancia de este proceso radica en que de esa manera se ponen a disposición las partículas del suelo al flujo superficial que da paso al transporte de las partículas. Además el salpicamiento



favorece la formación de una costra en el suelo que a su vez provoca que se vea disminuida la infiltración favoreciendo así el escurrimiento superficial.

4.4.1.2 Flujo superficial

El flujo superficial ocurre en las laderas cuando en una tormenta se sobrepasa la capacidad de almacenamiento superficial, la capacidad de almacenamiento del perfil o la velocidad de infiltración, Aun que no se tiene un flujo uniforme, se presentan una serie de pequeños canales que actúan como una red de drenaje.



5 MATERIALES Y METODOS

5.1 MATERIALES

5.1.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

La región de estudio se encuentra ubicada en el alto Río Lerma y El alto balsas en el radio de influencia de 60 Km. alrededor del volcán Nevado de Toluca, el cual se ubica en las coordenadas geográficas Lat. 19°10' Long 99°45'.

El nevado de Toluca está ubicado a 22 km al suroeste de la ciudad de Toluca. Se le conoce también por el Cinantécatl. "Señor Desnudo", y su formación es de traquita roja y andesita (Servicios Geológicos, 1996). Al oriente, el volcán se liga a la Sierra de Tenango, a los cerros de Jalatlaco y a la Sierra del Ajusco.

5.1.1.1 Características fisiográficas de la región de estudio

El Xinantécatl es un volcán alto y majestuoso, y sus pendientes al sur y al suroeste descienden rápidamente hacia la Depresión del Balsas. En los bordes del cráter se acumulan enormes piedras que forman anillos alrededor de las dos lagunas (Servicios Geológicos, 1996). En el fondo crece el zacatón y algunas especies de líquenes. En los flancos, el volcán tiene vegetación arborescente, principalmente de coníferas: ocote, oyamel y cedro, las cuales se van haciendo raquíticas hacia la cima y desaparecen a los 4 100 m en la corona dentellada del cráter, cuya cima más elevada es el Pico del Fraile (4 558 m). Al oriente, las cimas son muy escabrosas y desnudas. Su más reciente formación es la del cono central que cerró el orificio del cráter. El volcán está formado por la superposición de lavas y materiales detríticos. Fue de erupciones traquitoporfídicas, acompañadas de emanaciones de gases y vapores con grandes cantidades de cenizas y piedra pómez, las que pueden observarse aún en el camino hacia Tenango y Tenancingo. Por su altura, ocupa el cuarto lugar en el país; la erosión de la nieve y los fuertes cambios de temperatura han acabado activamente con su cono, el cual descansa sobre rocas calcáreas del cretácico que existen al sur y suroeste del



volcán, en la serranía de San Gaspar y en la región de Ixtapan de la Sal (Lesser y Asociados, 1986).

La región de estudio comprende valles con elevaciones del orden de 2,600 msnm y ocupa una superficie de alrededor de 12000 km² aproximadamente, estando constituido por materiales aluviales y lacustres interdigitados con derrames volcánicos. Dichos valles están rodeados por elevaciones topográficas formadas por rocas de origen ígneo, como la sierra andesítica y basáltica de Las Cruces, con elevaciones entre 3,600 y 3,800 msnm, y el Nevado de Toluca a más de 4,000, con una superficie aproximada de 2,000 km².

5.1.1.2 Características Climáticas de la región de estudio

El clima de la región del Nevado de Toluca, según Köppen y E. García se clasifica como templado, subhúmedo con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 mm. Hacia las estribaciones del Nevado de Toluca el clima se torna a semifrío, subhúmedo y con lluvias de verano, con un promedio de precipitación invernal entre 5 mm y 10.2 mm.

5.1.1.2.a Temperatura

La temperatura media anual varía entre 12° y 13° C; en los meses de diciembre y enero es del orden de 9.5° C, a partir del cual se va incrementando hasta mayo, mes en que se registran temperaturas medias cercanas a 14° C, para volver a descender gradualmente hasta diciembre. La temperatura media resulta de 12.2° C en el año y los valores extremos de 13.3 y 10.5° C, también como valores promedio.

5.1.1.2.b Precipitación

La media anual de la precipitación pluvial está entre los 800 y 1,000 mm para el valle de Toluca; Hacia las faldas del Nevado la precipitación se incrementa a 1,200



y 1,400 mm anuales. La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, siendo más intensa los meses de junio a septiembre, con valores cercanos a unos 140 mm mensuales. El estiaje tiene lugar entre noviembre y abril, con precipitaciones del orden de 12 mm/año.

5.1.1.2.c Evaporación

La evaporación potencial resulta de 1,700 mm anuales en la porción noroeste, disminuyendo hacia el sureste con valores del orden de 1,500 mm/año; hacia el Nevado se presentan valores menores, de 800 mm/año, estacionalmente manifiesta las siguientes características: los valores menores, de unos 90 mm mensuales, se presentan durante octubre a enero, para después incrementarse progresivamente hasta alcanzar máximos de unos 150 mm/mes entre marzo y abril, para nuevamente ir disminuyendo hasta septiembre.

5.1.1.3 Geología

La zona de estudio se ubica en el Eje Neovolcanico dentro de la cuenca Alto Lerma, lo implica una importante actividad volcánica reciente donde las rocas aflorantes presentan edades que van del Terciario Medio (26 millones de años) al reciente que se manifiesta por la presencia de complejos volcánicos en las partes altas constituidas por basaltos y andesitas, materiales piroclásticos que se encuentran bordeando las sierras, incluyen tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas, conos cineríticos, derrames lávicos, lahares y materiales productos de la desintegración de las rocas y erosión de los mismos constituidos principalmente por arenas, gravas, arcillas limos y depósitos lacustres (Servicios Geológicos, 1996).

Los valles están constituidos por materiales lacustres, producto de los diferentes lagos que se asentaban en la cuenca, así como por depósitos aluviales interdigitados con materiales piroclásticos. El Terciario contribuyó con una gran cantidad de rocas volcánicas de composición ácida a intermedia, como las



Andesitas Xochitepec y la Formación Las Cruces, en forma de serranías bordeando el valle los cuales constituían antiguamente cuencas endorreicas, en donde se depositaron importantes volúmenes de materiales granulares y piroclásticos de la Formación Tarango, como relleno de una topografía preexistente. La dinámica propia del ambiente tectónico regional, dio lugar a la formación de extensas fallas y una densa red de fracturamiento que afecta a toda la secuencia estratigráfica (Servicios Geológicos, 1996).

5.1.1.4 Hidrografía y Geomorfología

5.1.1.4.a Geomorfología

La forma del relieve característico de la región son las Sierras constituidas por materiales volcánicos que delimitan la zona, las partes planas están formadas por materiales de relleno como clásticos, piroclásticos de tipo lacustre y materiales de aluvión. Las Sierras orientales que limitan al Valle de Toluca están formadas por rocas andesíticas del Terciario Superior, afectadas por intemperismo y erosión que han formado suelos residuales al pie de sus taludes, como la sierra Montealto-Las Cruces, Apisco y Catedral, con orientación NW-SE y con alturas máximas del orden de 3,800 msnm. El drenaje superficial observado es del tipo paralelo y forman el parteaguas entre las cuencas de los valles de México y Toluca. Hacia el sur se aprecian los cerros de Loma Alta y Tenango, junto con el Nevado de Toluca con altura de 4,565 msnm, constituido por rocas andesíticas del Terciario Superior, flujos de piroclásticos y derrames de lava del Cuaternario. Al sur y oeste del Nevado, la sierra del Ajusco y las serranías que se desarrollan hacia Valle de Bravo y El Oro, representan el parteaguas topográfico entre la cuenca del Balsas-Mezcala y del Alto Lerma. En las sierras del occidente, sobre todo los materiales de la Formación Tarango, tienen de media a alta permeabilidad, por lo que funcionan como zonas de recarga a los acuíferos de la planicie. Presentan un drenaje paralelo dendrítico condicionado a las características geológicas estructurales que manifiestan. Los agentes que han afectado el relieve topográfico han sido endógenos como el vulcanismo reciente, y exógenos como la erosión



pluvial. En las partes bajas aunque el relieve es generalmente plano, se aprecian lomas, conos, derrames de lava y el valle se encuentra en una etapa de rejuvenecimiento dentro del ciclo geomorfológico. Los conos cineríticos compuestos por materiales permeables tienen un drenaje radial con pendientes pronunciadas, funcionando como zonas de recarga a los acuíferos de la planicie (Servicios Geológicos, 1996).

5.1.1.4.b *Región hidrológica y cuenca*

La zona estudiada queda comprendida dentro de las Regiones Hidrológicas Lerma Santiago y Balsas. El escurrimiento superficial más importante es el colector principal del río Lerma. Hace todavía algunos años se originaba con los manantiales que formaban las lagunas de Almoloya del Río, Lerma y San Bartolo, constituyendo las tres una zona lacustre en proceso avanzado de senectud. Con el paso de los años y la explotación excesiva de los acuíferos, han desaparecido los manantiales y las lagunas, pero en cambio, ahora el cauce del Río Lerma recibe aportaciones importantes de las aguas residuales de Toluca y poblaciones vecinas, así como del corredor industrial Toluca-Lerma, representando actualmente una de las cuencas más contaminadas del país en su tramo Lerma-Atlacomulco.

5.1.1.4.c *Hidrografía*

A partir del poblado de Lerma el cauce del río sigue una dirección más o menos franca hacia el norte, atravesando el valle de Ixtlahuaca hasta arribar a la ciudad de Atlacomulco, del Nevado de Toluca desciende el Río Ojo de Agua con dirección oriente hacia San Antonio la Isla, desembocando en la laguna Almoloya del Río, nacimiento antiguo del Río Lerma, donde también se concentran escurrimientos provenientes de la vertiente de la Sierra de Las Cruces, también del Nevado descienden en forma radial los siguientes escurrimientos: Río Verdiguél que atraviesa Toluca y descarga finalmente en el Lerma junto con las aguas residuales de la ciudad, otro principal afluente es el Río Tejalpa, además de



los ríos y arroyos provenientes de la vertiente occidental de las Serranías, así mismo por la parte oriental provenientes de la sierra de Monte alto y las Cruces con prolongación hacia el norte, descienden los ríos Ocoyoacac, Mayorazgo, Otzolotepec y el arroyo Temoaya entre otros, aportan al Lerma por su margen izquierda y descargan aguas arriba del embalse de la presa José Antonio Alzate (Lesser, 1986).

5.1.2 MATERIALES CARTOGRAFICOS

5.1.2.1 Cartas topográficas y mapas

Para desarrollar el trabajo se adquirieron 25 cartas topográficas 1:50 000 en formato vectorial y 4 cartas edafológicas 1:250 000 y los perfiles de suelo (INEGI 2006) así como los resultados de análisis de las muestras de suelo correspondientes.

5.1.1.2 Imágenes de Satélite

Se utilizaron imágenes satelitales de los años 1989 y 2007, para el año 1989 se utilizaron 2 imágenes Landsat 5 ETM cuyas características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Bandas espectrales y resoluciones de los sensores LANDSAT

Banda Número	Rango espectral (μ)	Zona del Espectro	Resolución sobre el Terreno (m)
1	0.45-0.51 μ	Visible-azul	28.5
2	0.525-0.605 μ	Visible-verde	28.5
3	0.63-0.69 μ	Visible-rojo	28.5
4	0.75-0.90 μ	Infrarrojo Próximo (visible)	28.5
5	1.55-1.75 μ	Infrarrojo lejano	28.5
6	10.40-12.5 μ	Térmico Lejano	28.5
7	2.09-2.35 μ	Térmico Próximo	28.5
Pancromático	0.52-0.90 μ	Prácticamente todo el visible	15



Sensor Banda 1 Banda 2 Banda 3 Banda 4 Banda 5 Banda 6 Banda 7 Banda 8

Para el año 2007 se utilizaron 6 imágenes de satélite en formato pancromático y multiespectral de alta resolución del SPOT 5, las características espectrales de estos sensores se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Bandas espectrales y resoluciones de los sensores Spot

Sensores	Espectro electromagnético	Tamaño de los píxeles	Bandas espectrales
Spot 5	Pancromático	2,5 m	0.48 - 0.71 μm
	B1: verde	10 m	0.50 - 0.59 μm
	B2: rojo	10 m	0.61 - 0.68 μm
	B3: infrarrojo cercano	10 m	0.78 - 0.89 μm
	B4: infrarrojo medio (MIR)	10 m	1.58 - 1.75 μm

5.1.2.3 Software y Hardware utilizado para procesamiento de información digital

Para la ejecución del presente trabajo se utilizó software especializado de ESRI(*Environmental Systems Research Institute*), ArcInfo 9.3, ERDAS Imagine y ENVI/DL 4.5 además de otros software especializados para análisis hidrológicos (Archidro, River Tools 3.0).

Se utilizó una estación de trabajo Dell Intel Core 2 a 2.12 GHz y 4Gb de memoria RAM para hacer procesos menores. Para procesos de alta demanda de memoria se utilizó una estación Dell Intel con dos procesadores Xeon Quad Core, 20Gb de memoria RAM y dos discos duros que suman 1.5Tb.

5.2 METODOS

La metodología de investigación se sintetiza en el diagrama de flujo mostrado en la figura 1, donde en principio se comenzó por coleccionar la información base, como



cartas topográficas entre otros, a partir de la cual se fue generando la información para llevar a cabo los procesos subsecuentes.

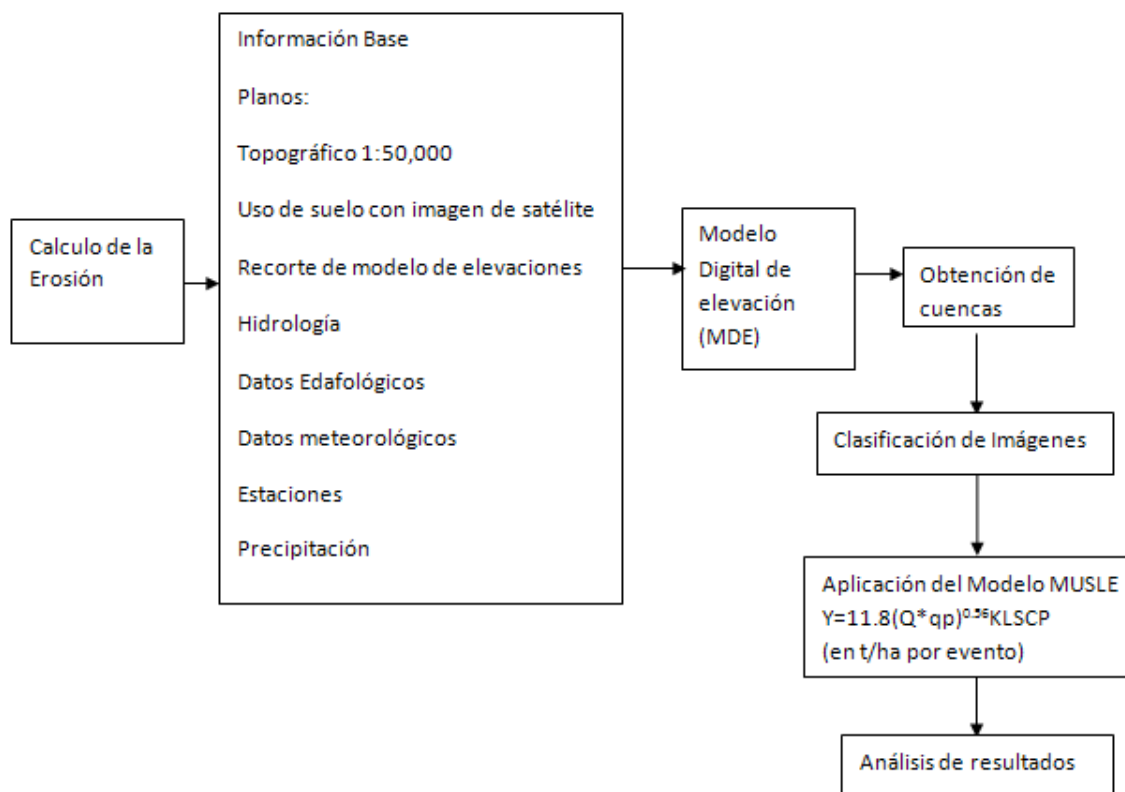


Figura 1. Diagrama general para estimación de pérdida de suelo por erosión

5.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

Para modelar una parte de la superficie terrestre, se necesita adquirir datos, por lo tanto, la adquisición de datos es la primera etapa de un modelo digital del terreno. De manera que hay dos etapas, que fueron, muestreo y medición. El muestreo se refiere a las mediciones locales que determinan las coordenadas. Hay tres problemas en la adquisición de una superficie de un MDE, densidad, precisión, y distribución. La precisión es definida por las mediciones. La densidad y distribución óptima están definidas por las características de la superficie del terreno.



5.2.1.1 Modelos Digitales de Elevación (DEM)

Los modelos digitales de elevación forman parte integral de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y a menudo son más usados para; 1) modelación hidrológica incluyendo simulación de inundaciones, delineación y análisis de cuencas y redes de drenaje, 2) erosión de suelo y modelos de transporte de sedimentos, otros. El agua subterránea y modelos climáticos también usan información topográfica como componentes esenciales. Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) proveen la oportunidad de caracterizar cuantitativamente la superficie del suelo en términos de gradiente de inclinación y curvatura, así como ceder la información digital no distorsionada por rasgos que frecuentemente es un problema en interpretación de fotografía aérea y análisis remoto de imágenes.

El análisis digital sistemático del terreno es afectado por; 1) la carencia de literatura de estudios ya realizados y 2) la desuniforme descripción del uso de métodos digitales relevantes en diferentes campos de ciencias de la tierra.

El análisis digital del terreno requiere el uso de un sistema integral de muchas herramientas analíticas y software (ENVI 4.5, ERDAS IMAGINE, ArcInfo 9.3, otros). En este trabajo se utilizaron 25 mapas topográficos vectoriales con curvas de nivel a 10 metros de equidistancia del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) escala 1:50, 000, y con el software envi 4.5 se generó el Modelo Digital de Elevación (figura 2).

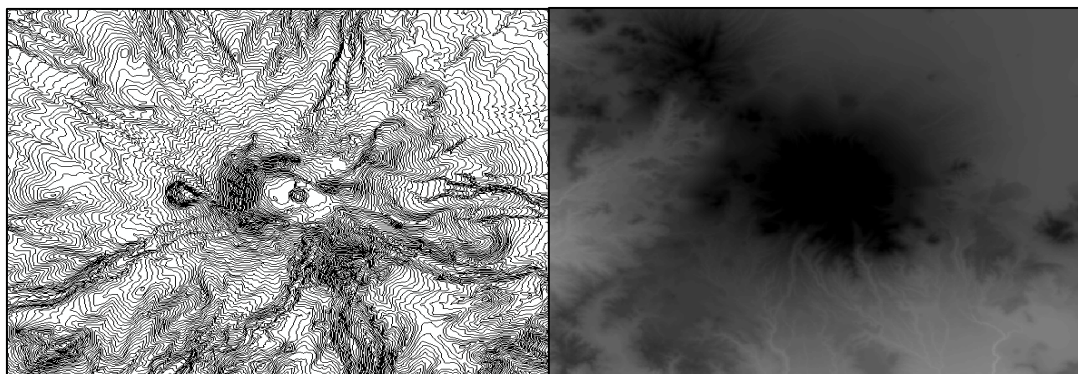


Figura 2. Construcción del MDE (derecha) a partir de curvas de nivel (izquierda)



5.2.1.2 Partiendo del MDE a la red hidrológica

Existen algoritmos para delinear la red hidrológica a partir del MDE, que pueden ser divididos principalmente en dos grupos dependiendo de las perspectivas geomorfológicas o hidrológicas que sean adoptadas. Un panorama general de ambos enfoques se puede encontrar en (Moore, *et al.* 1991).

A partir de la perspectiva geomorfológica, los puntos que pertenecen a una red de drenaje son definidos a partir de la morfología local (Jonson, 1975). Por ejemplo, Peacker y Douglas (1975) consideran como pixeles de drenaje todos los puntos del terreno que tienen un coeficiente de concavidad y curvatura mayor que el dado en el umbral. Sin embargo, no existe ningún nivel del umbral para discriminar los pixeles de drenaje a partir de otros pixeles. Como consecuencia, la red de drenaje resultante usualmente esta desconectada. Por lo tanto es necesario un proceso no trivial para conectar los pixeles extraídos y remover los irrelevantes. Esto aplica el uso de algoritmos incluidos en software, en este caso se utilizo la extensión ArcHydro para generar la red hidrológica, utilizando como insumo el MDE y la red de ríos escala 1:50000 de INEGI.

5.2.1.3 Dirección del Flujo

La dirección del flujo de un punto dado es frecuentemente definida como la dirección de 8 vecinos con la pendiente más empinada. Este algoritmo tan sencillo es referido como el flujo direccional D8 por O'Callaghan and Mark (1984). Se han propuesto adaptaciones para generar una dirección del flujo múltiple (Tarboton 1997) para reflejar la dispersión del flujo que ocurre en las laderas aunque la dispersión del flujo no es deseada para redes de drenaje en valles (Tarboton 1997).

A partir de la red hidrológica generada en ArcHydro, se generó la dirección de flujo (figura 3) utilizando un modulo de esta misma extensión.

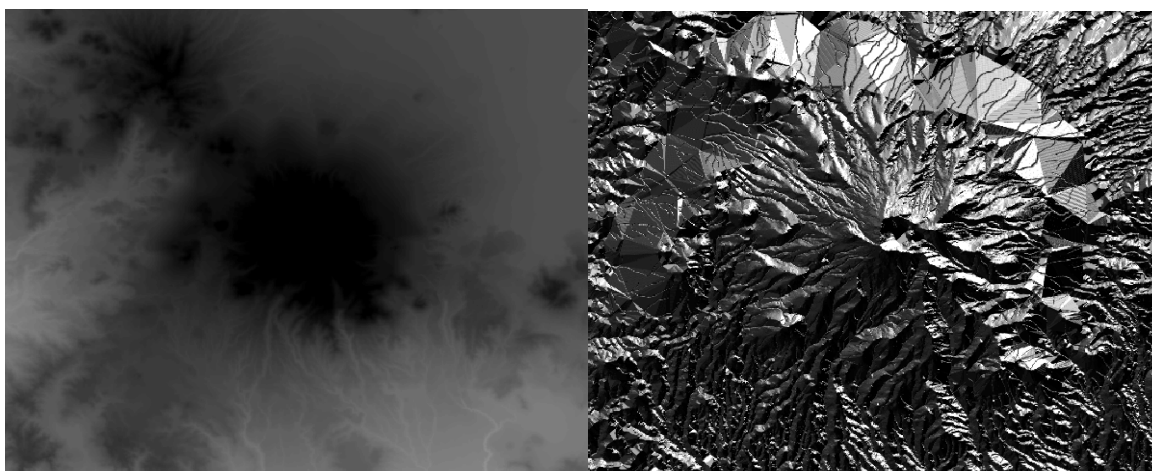


Figura 3. Dirección del flujo (derecha) a partir del MDE (izquierda)

5.2.1.4 Área tributaria de drenaje

El área tributaria de drenaje (ATD) de un píxel es igual a su área, en este caso 3 m² que es la resolución del MDE. La imagen de ATDs es por lo tanto inicializada a partir de los píxeles de mayor elevación y dejándolos drenar a lo largo de la dirección del flujo. Cuando un píxel drena a través de otro, el ATD del último es incrementado por el anterior. El proceso es repetido para el segundo píxel de mayor elevación y así sucesivamente hasta que el de menor elevación es alcanzado. Los detalles de la implementación de este algoritmo son detallados en Soille y Gratiis (1994).

Para generar el área tributaria de drenaje se utilizó un módulo de la extensión ArcHydro.

5.2.2 CUENCAS

La cuenca es una partición de la imagen en regiones principales, cada objeto en la imagen corresponde a la cuenca de captación. Una eficiente implementación de la



definición formal de cuenca en términos de operadores morfológicos puede ser encontrada en Vincent y Soille (1991).

El enfoque de microcuenca esta dado por su área y por sus características físicas y sociales ya que en ellas se puede hacer una planificación y manejo comunal, con el fin de conservar y rehabilitar los recursos naturales.

El procedimiento seguido para obtener las microcuencas es como se muestra en el diagrama de la figura 4.

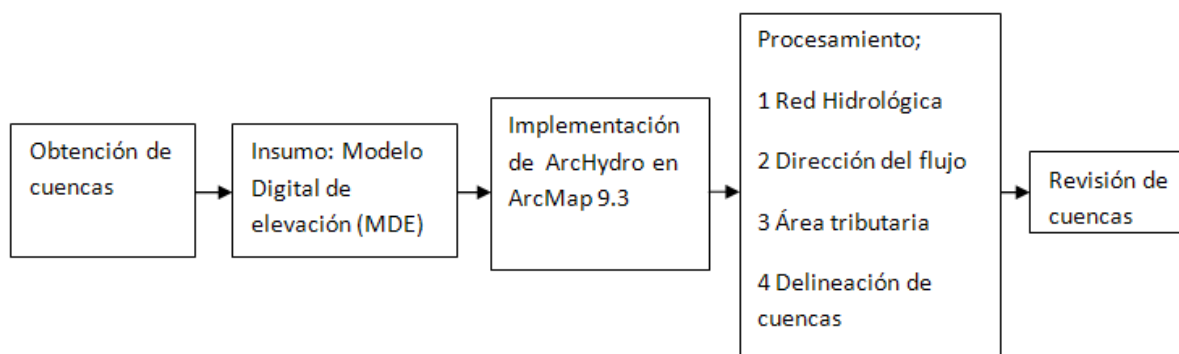


Figura 4. Diagrama para generar las cuencas hidrológicas

5.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS

La cuenca se puede definir como una área limitada de la superficie terrestre donde, si la superficie fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ésta tienden a ser drenadas por la red de corrientes hacia un punto de salida en común (Oropeza, 1980).

5.2.2.1.a Área de la cuenca

Para el caso de una cuenca, es la proyección horizontal limitada por el parteaguas y generalmente expresada en kilómetros cuadrados.

Con el comando “Field Calculator” de la tabla de atributos de las cuencas se genero el área de cada una en m².



5.2.2.1.b Pendiente de la cuenca

Existen varios criterios para este concepto, pero en general es el promedio de todas las pendientes existentes en la cuenca.

En este caso se genero el mapa de pendiente a partir del Modelo Digital de Elevación, para ello se utilizo el comando Topography de ENVI 4.5.

5.2.2.1.c Pendiente del cauce principal

Para representar el perfil del cauce es necesario representar los valores de sus distancias horizontales, medidas sobre el cauce, contra sus cambios de elevaciones respectivas, en otras palabras, es el desnivel de los extremos de cada tramo dividido por la distancia horizontal del tramo.

Con las herramientas básicas de medición en ArcInfo 9.3 se genero este valor para el cauce principal de cada cuenca. Las características geométricas de cada cuenca se muestran en el anexo 1.

5.2.3 APLICACIÓN DEL MODELO MUSLE

5.2.3.1 Erosión

Existen tres principales tipos de erosión en las cuencas: erosión superficial, erosión en cárcavas, y movimientos de masas de suelos. La erosión superficial comprende la remoción de partículas de suelo y pequeños agregados de la superficie del suelo debido a la acción del viento o el agua. Este tipo de erosión es causada debido al azote de las gotas de lluvia, y por los pequeños escurrimientos concentrados que fluyen sobre la superficie. Mientras este tipo de erosión tiene menor impacto en los bosques, en las tierras de cultivo y llanuras tiene un gran impacto al producir grandes cantidades de sedimentos.

La erosión en cárcavas es el desprendimiento y movimiento de material, ya sea de partículas individuales de suelo o de agregados de tamaño considerable, en



canales bien definidos. Este tipo de erosión es la de mayor impacto que se puede acelerar en gran medida donde existe un pobre manejo del suelo.

El movimiento de masas de suelo es la erosión en la que masas cohesivas de suelo son desplazadas, este movimiento puede ser rápido, como deslizamientos, o puede ser bastante despacio como el flujo en depresiones. Todos estos procesos pueden ocurrir individualmente o en conjunto. Las actividades humanas, como la construcción en zonas urbanas, construcción de carreteras, deforestación, pastoreo intensivo y la agricultura pueden acelerar esos procesos. En ocasiones es difícil determinar si la erosión es por procesos geológicos naturales o debido a que las practicas de conservación son muy deficientes.

5.2.3.2 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada EUPSM

La ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM) fue desarrollada para estimar empíricamente la pérdida de suelo para pequeñas cuencas al cambiar los factores de erodabilidad y la eficiencia de transporte de sedimentos producidos por la energía cinética de la lluvia de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Wischmeier y Smith, 1978) por una función del producto de volumen de escurrimiento de una tormenta por el escurrimiento pico (Williams, 1975). Esta ecuación se aplica para pérdida de suelo anual promedio o para estimar la perdida diaria.

Williams (1975) desarrollo la ecuación MUSLE al reemplazar el factor debido a la energía cinética de la lluvia en la ecuación USLE por un factor de la energía que se produce por el escurrimiento. La ecuación fue desarrollada usando datos de tormentas aisladas en 18 cuencas en el estado de Texas y Nebraska, posteriormente fue validada en 102 cuencas distribuidas en los Estados Unidos utilizando datos de escurrimiento generados por el componente hidrológico del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams, 1982).



La ecuación EUPSM es como sigue:

$$y = 11.8(Q * q_p)^{0.56} KCSLP$$

Donde:

y = pérdida de suelo (ton.ha)

Q = Esguerrimiento (m³)

q_p = Esguerrimiento pico (m³/s)

y K, C, SL y P son los factores estándar de erodabilidad del suelo, manejo de cultivos(cobertura), pendiente y longitud de pendiente y prácticas de conservación de la ecuación USLE.

La principal ventaja de la ecuación MUSLE es su simplicidad, la directa conceptualidad y relevancia física de sus factores, la gran relación empírica y la capacidad para tomar en cuenta consideraciones de manejo dentro de los factores. Smith et al., (1964) encontró buena correlación entre mediciones reales de pérdida de suelo y los valores estimados con la ecuación EUPSM en praderas de los estados de Texas y Oklahoma.

El procedimiento a seguir para la aplicación del modelo MUSLE es como se indica en el diagrama de la figura 5.

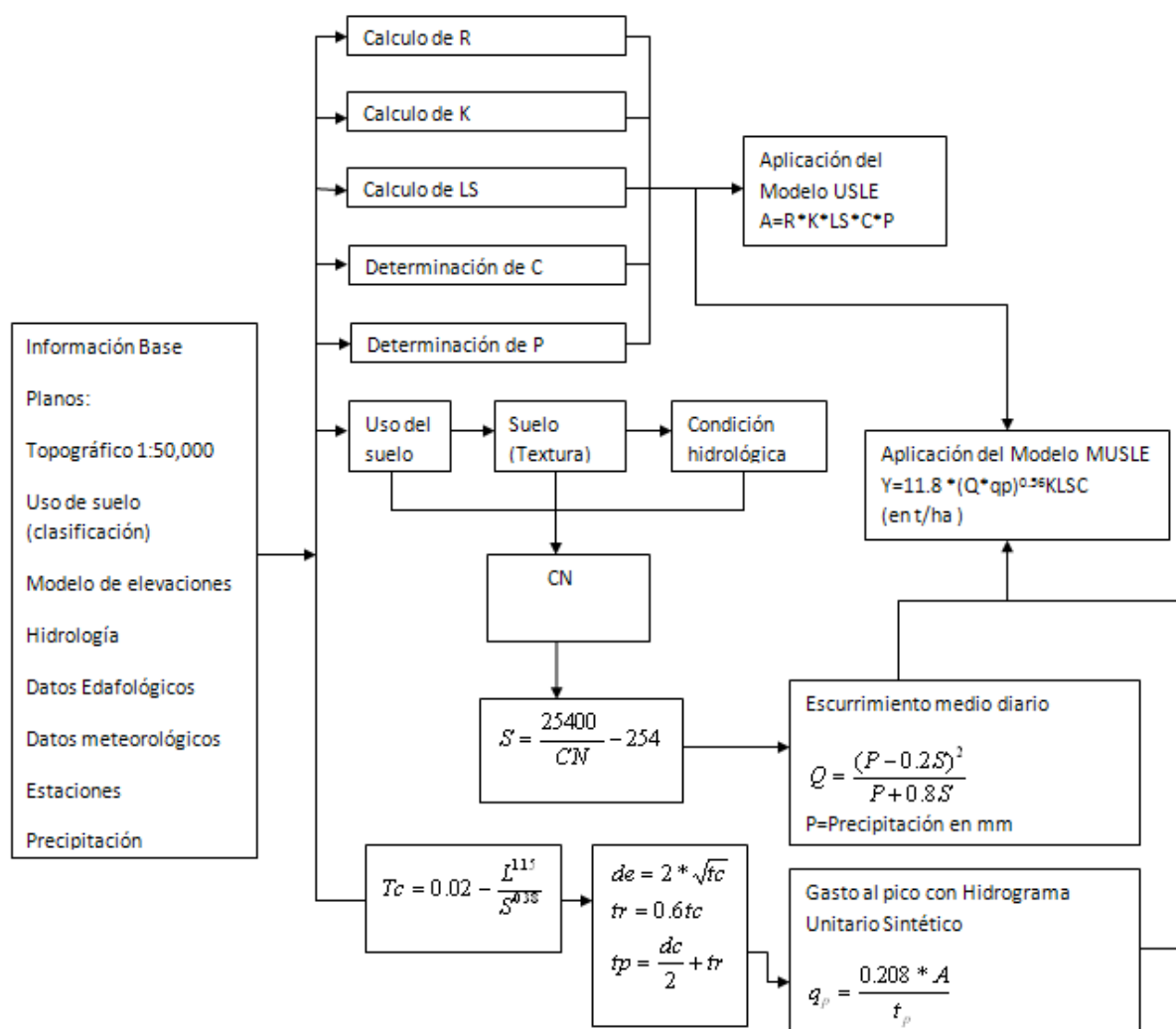


Figura 5. Metodología para la estimación de pérdida de suelo con la ecuación MUSLE

5.2.3.2.a Cálculo de la erosionabilidad de los suelo, K

Este término fue sugerido por Cook (1936), se usa para indicar la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado. La erosionabilidad puede ser calculada en campo mediante mediciones, pero este método es caro, por lo cual se utilizó la información de las cartas edafológicas y de los perfiles de INEGI para poder asignar un valor de erosionabilidad.



Las propiedades físicas de los suelos se refieren a la distribución del tamaño de las partículas primarias, materia orgánica, estructura del suelo, óxidos de hierro y aluminio, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de humedad y procesos de humedecimiento y secado (régimen de humedad del suelo).

El procedimiento para obtener el factor K con el método de la FAO consistió en determinar la unidad de suelo y la clase de textura que le corresponde de acuerdo a la clasificación DETENAL, con los datos de tipo de suelo y textura, se utilizó el Anexo 2 de doble entrada para obtener K. En el caso de suelos con más de dos unidades de suelo, se obtuvo K para cada unidad y se sacó el promedio.

5.2.3.2.b Cálculo del factor por longitud e inclinación de la pendiente LS

El efecto de la topografía en la erosión se representa por el factor LS. La erosión aumenta conforme la longitud del terreno en el sentido de la pendiente aumenta y la inclinación de la superficie se hace mayor.

La longitud de la pendiente se define como distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta donde el cambio de la pendiente sea tal que las partículas acarreadas se puedan sedimentar, o cuando las partículas alcancen algún canal de intercepción o zanja de desviación.

El factor L se define como:

$$L = (\lambda / 22.1)^m$$

Donde:

λ : es la longitud de la pendiente en metros. Se refiere a la proyección horizontal y no a la distancia paralela a la superficie del terreno, este valor se calculó en varias secciones de cada cuenca usando AutoCAD 2006.



m: exponente influenciado por la interacción de la longitud de la pendiente con la inclinación, así como las propiedades del suelo, tipo de vegetación y las practicas de conservación. Este valor se obtiene de la tabla 3.

Tabla 3. Valores del Exponente (m) Dependiendo del Grado de Inclinación.

Valor del exponente	Porcentaje de pendiente
0.5	$S_t > 5$
0.4	$3 > S_t > 5$
0.3	$2 > S_t > 3$
0.2	$1 > S_t > 2$
0.1	$S_t < 1$

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.

Para obtener el factor S se calcula primero la pendiente del terreno en porcentaje con la siguiente expresión:

$$S_t = \frac{D_n}{\lambda} \times 100$$

Donde:

S_t pendiente del terreno en %

D_n desnivel en metros

λ longitud de la pendiente en metros

El factor S es una función de S_t y se calcula usando la siguiente ecuación:

$$S = \frac{0.43 + 0.30S_t + 0.04S_t^2}{6.613}$$

Donde:

S_t pendiente en %

De manera que la formula final para el cálculo del factor S queda como sigue:

$$S = 0.065 + 0.045S_t + 0.0065S_t^2$$



5.2.3.2.c Factor de manejo y cobertura C

Debido a la correlación que existe entre el factor manejo y el factor cobertura, no es posible evaluar cada uno por separado por lo cual es necesario integrarlos en un factor.

Para un lugar en particular los valores de C están influenciados por muchas variables, teniendo mayor importancia la cobertura vegetal, cobertura de rastrojos, incorporación de residuos, labranza y los efectos residuales.

Generalmente el factor C se da en términos del valor promedio anual para una combinación de sistemas de cultivo, manejo y lluvias. En este caso las pérdidas relativas de suelo debidas al factor C se obtuvieron del Anexo 3a

En los bosques no disturbados la capacidad de infiltración y contenido de materia orgánica son altos y mucha de la superficie está cubierta por un mantillo de ojarasca en descomposición de varios centímetros de espesor. Estas capas de mantillo protegen al suelo de las fuerzas erosivas del escurrimiento y de las gotas de lluvia (Figuerola, 1991). El factor C para bosques no disturbados se obtuvo del Anexo 3b. Los valores del factor C para una combinación de coberturas entre pastizales, agostaderos y terrenos en descanso se obtuvo del Anexo 3c.

5.2.3.3 Escurrimiento

El escurrimiento es un fenómeno físico que se define como el agua que se genera de la precipitación y fluye por encima o por debajo de la superficie terrestre, llegando de esta manera a una corriente o cauce para alcanzar aguas abajo la salida de la cuenca.

Una vez que una parte de la precipitación haya sido evaporada e interceptada, el resto del agua pluvial alcanza la superficie terrestre siguiendo diferentes caminos para alcanzar la salida de la cuenca. De manera que estos caminos se pueden



dividir en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

Cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores de este se saturan, luego se llenan las depresiones del terreno, al mismo tiempo el agua comienza a fluir sobre la superficie, a este se le llama flujo en la superficie y se le da este nombre mientras el flujo no alcance cauces bien definidos (los cauces bien definidos son aquellos que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas). En la trayectoria por alcanzar el cauce, el agua se continua infiltrando e incluso evaporando en pequeñas cantidades, hasta que alcanza el cauce principal donde se convierte en escurrimiento en corrientes.

El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes forma el escurrimiento superficial. Una parte del agua que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo más o menos paralelamente a la superficie. A esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento subsuperficial; la otra parte que se infiltra hasta niveles inferiores al manto freático, se denomina escurrimiento subterráneo.

5.2.3.3.a Estimación del escurrimiento superficial por el método del Número de Curva

El escurrimiento superficial es la porción de la precipitación que no se infiltra ni se acumula en la superficie del suelo, pero que fluye aguas abajo como flujo laminar o concentrado (Chow et al., 1988).

El método del Número de Curva para la estimación del escurrimiento fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica (USSCS), el cual integra parámetros como infiltración, intercepción y almacenamiento en pequeñas depresiones en una ecuación, de tal modo que este método es una relación entre la lluvia y el escurrimiento lo que está en función del tipo y uso del suelo así como de sus condiciones hidrológicas.

En este método a cada tipo de suelo se le asigna un grupo hidrológico, en base a su capacidad de infiltración, lo que se puede relacionar con la conductividad



hidráulica del suelo saturado. Los grupos hidrológicos que se usaron en este estudio se muestran en la tabla 4, (Diakite, 2007):

Tabla 4. Grupos de suelos (HSGs)

HSGs	Descripción
A	Menor escorrentía Alta permeabilidad aún saturados Profundo de consistencia suelta; Arena o grava Textura: Arenoso, Areno-Limoso, Franco, Franco-Limoso, Franco-Arenoso con $\geq 35\%$ de fragmentos gruesos Familia esquelética, textura media.
B	Moderadamente permeable en estado saturado Arenosos menos profundo Textura: Franco-arenosos a Areno-Migajoso, profundidad media, Franco profundo
C	Poca permeabilidad en estado saturado Presenta un estrato impermeable Textura: Franco-Arcillosa o Arcillosa, Franco, Migajón Limoso, Franco Arcillo-Arenoso, Franco arcillo-limoso También Arcilla-Esquelética ($\geq 35\%$ de fragmentos gruesos)
D	Mayor escorrentía Muy impermeable Muy arcilloso y profundo (arcilla expandible) Capa superficial arcillosa muy impermeable o suelo con subsuelos muy impermeable
Mixto	Suelos hidromórficos con manto freático dentro de los primeros 60 cm Cuando son drenados esos suelos, pertenecerán a un grupo hidrológico mixto; (A/D, B/D y C/D) en base a su conductividad hidráulica en estado saturado y la profundidad del manto freático. La primera letra corresponde a la condición de bien drenado, la segunda corresponde a la condición de no drenado, es decir la condición actual.



5.2.3.3.b Mapa de Grupo Hidrológico

A partir de los mapas edafológicos 1:250, 000 y la información de perfiles de suelos de INEGI se generó el mapa de grupo hidrológico en base al tipo de suelo, textura y otras propiedades físicas.

5.2.3.3.c Mapa de Uso de Suelo

Percepción remota

Se define como la ciencia para obtener información sobre los objetos terrestres a partir de imágenes satelitales o aéreas usando la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie en una o más regiones del espectro electromagnético.

Clasificación de las Imágenes

La clasificación, se divide en dos tipos; la supervisada y la no supervisada, en la primera cada pixel es asignado a una clase nominal y las muestras son seleccionadas en áreas homogéneas de la imagen de acuerdo a la experiencia y conocimiento que se tenga del lugar, auxiliándose también de fotografías aéreas y de trabajo de reconocimiento en campo. En la clasificación no supervisada se carece de información de campo, así que los algoritmos agrupan los pixeles en clases de acuerdo a criterios estadísticos de vecindad. En este trabajo se utilizó la clasificación supervisada en base a recorridos de campo para así poder generar las muestras en las imágenes.

Los pixeles de entrenamiento deben de ser sitios dentro de la imagen que sean representativos de la clase de interés, es decir, el ambiente circundante debe de ser lo más homogéneo posible. Los pixeles deben ser seleccionados antes de la clasificación (Jensen, 1996).

Una vez que los pixeles de entrenamiento fueron colectados, fue necesario hacer un "feature selection" para poder determinar que bandas podían discriminar



mejor unas clases de otras, el objetivo fue eliminar las bandas que eran redundantes, es decir el numero de bandas a ser procesadas se puede reducir, sin afectar con esto la precisión de la clasificación. El “feature selection” envuelve un análisis estadístico y/o grafico para determinar la separabilidad, en este trabajo se utilizo el método grafico es decir un “Feature space plot” donde se graficaron las elipses de las clases para determinar su separabilidad. En la figura 6 se muestra la grafica de dispersión con las elipses graficadas de cada clase.

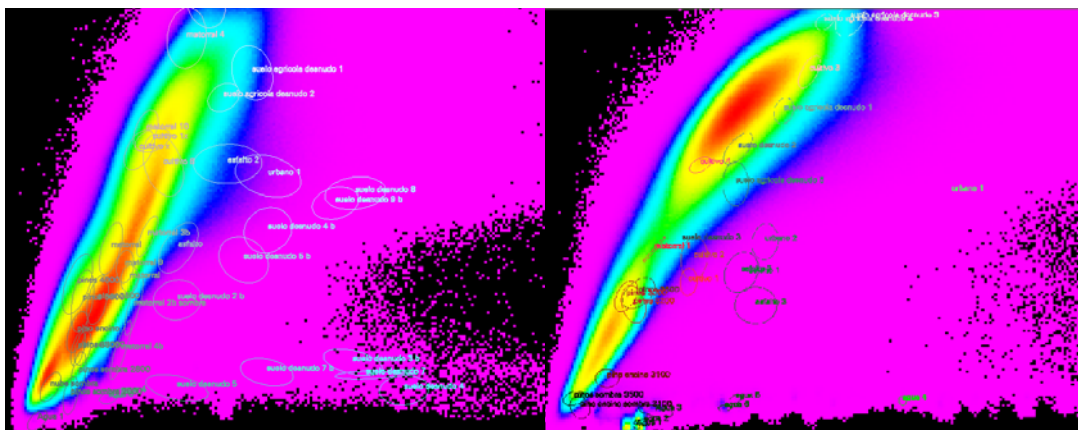


Figura 6. Diagrama de dispersión Feature Space

Según (Jensen y Toll, 1982) la grafica de elipses en dos dimensiones provee muy buena información visual de la separabilidad entre clases. Para la construcción de estas graficas se utilizo la media y la desviación estándar de cada clase.

Existen varios algoritmos de clasificación para asignar pixeles a alguna clase, estos algoritmos difieren en el criterio usado para definir los límites de decisión (ITT, 2008). La decisión para asignar un determinado pixel a una clase depende de las reglas del algoritmo. Los algoritmos paramétricos asumen que la clasificación de los pixeles está basada en una naturaleza Gaussiana, es decir asume una distribución normal, en cambio los algoritmos no paramétricos no hacen esa asunción.



El algoritmo de Mínima Distancia es muy sencillo computacionalmente por sus reglas de decisión. Usándose apropiadamente puede arrojar resultados tan buenos como el algoritmo del paralelepípedo o el del vecino más parecido. El algoritmo solo requiere que el usuario introduzca el vector medio de cada clase μ_{ck} en cada banda como muestras de entrenamiento, para hacer la clasificación el programa calcula la distancia entre cada vector medio con cada pixel desconocido (BV_{ijk}) (Jahne, 1991). Esta distancia euclidiana se calcula con el teorema de Pitágoras.

$$Dist = \sqrt{(BV_{ijk} - \mu_{ck})^2 + (BV_{ijl} - \mu_{cl})^2}$$

Donde

μ_{cl}, μ_{ck} representan los vectores medios de la clase c medidos en las bandas k y l .

En este trabajo se utilizo el algoritmo Máxima verosimilitud como regla de decisión para la clasificación de las imágenes en los dos periodos.

Este algoritmo se basa en que las muestras de cada clase y cada banda son normalmente distribuidas, así que la regla de decisión para un pixel X desconocido es:

Asignar X a la clase c solo si;

$p_c \geq p_i$, Donde $i = 1, 2, 3, \dots, m$ posibles clases

$$\text{y } p_c = \{-0.5 \log_e [\det(V_c)]\} - [0.5(X - M_c)^T V_c^{-1} (X - M_c)]$$

Donde :

M_c = vector medio de clase

V_c = matriz de covarianza

$\det(V_c)$ = es el determinante de la matriz de covarianza V_c

Así, para asignar el vector X de un pixel desconocido dentro de una clase, la regla de decisión calcula el valor de p_c para cada clase, luego el pixel es asignado a la clase que tiene valor más grande de probabilidad (ITT, 2008).



5.2.3.3.d Mapa de Esgurrimiento

EL esgurrimiento estimado por el método de Número de Curva se obtuvo con la ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{(P + 0.8 * S)}$$

donde :

$S = (25400 / CN) - 254$, a dim ensional

$P =$ Pr ecipitacion , mm

$CN =$ Numero de Curva, a dim ensional

$Q =$ Esgurrimiento, mm

Para usar esta expresión se genero un mapa de precipitación con información del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II), y con los mapas de Grupo Hidrológico y Mapa de Uso de suelo derivado de la clasificación se genero el mapa de CN a partir de los valores del Anexo 4, siguiendo el procedimiento de la figura 7, de este ultimo el mapa de S. El valor de esgurrimiento Q se transformo a metros cúbicos (m³) para así obtener el mapa de esgurrimiento.

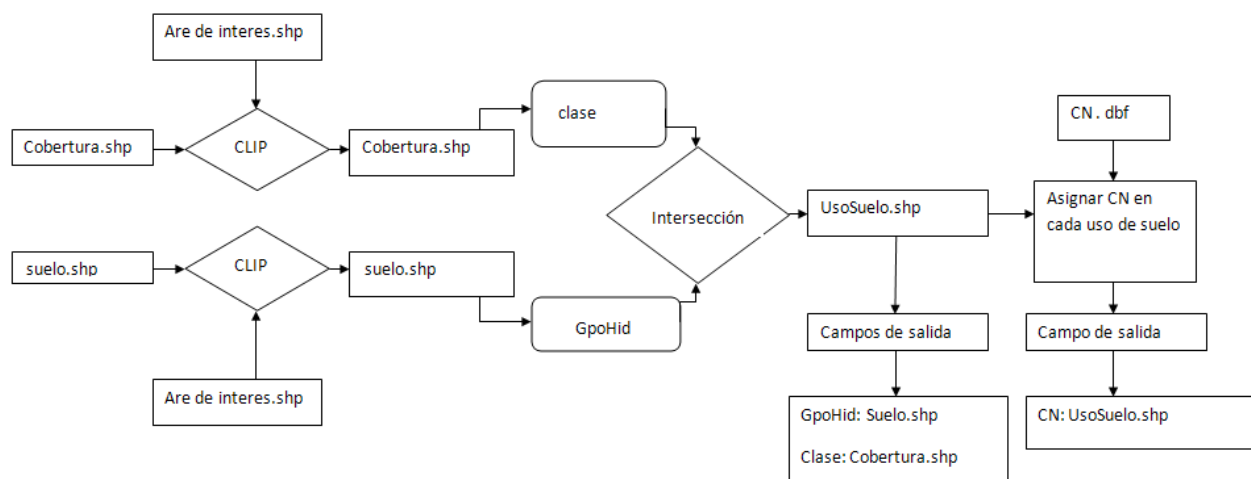


Figura 7. Diagrama para generar el mapa de CN



5.2.3.3.e Gasto al pico con el hidrográma unitario sintético

Debido a la carencia de datos diarios se pueden utilizar métodos sintéticos de predicción para generar los parámetros de escurrimiento (Williams, 1982).

Para usar el método del hidrográma unitario siempre es necesario contar con al menos un hidrográma medido a la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación. Sin embargo, la mayor parte de las cuencas, no solo en nuestro país, sino en todo el mundo, no cuentan con una estación hidrométrica o bien con los registros pluviográficos necesarios.

Por ello es conveniente contar con métodos con los que puedan obtenerse hidrográmas unitarios usando únicamente datos de características generales de la cuenca. Los hidrográmas unitarios así obtenidos se denominan sintéticos.

Para este trabajo la obtención del q_p , con un hidrográma unitario sintético para una lluvia de intensidad $i = 1 \text{ mm/d}_e$, se realizó de la siguiente manera;

Se calculó el tiempo de concentración utilizando la siguiente expresión:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde

S es la pendiente del cauce principal en %

L longitud del cauce principal en metros

t_c tiempo de concentracione en horas

Como no se conocía la duración en exceso, se utilizó la siguiente expresión:

$$d_e = 2\sqrt{t_c}$$

Donde

d_e es la duración en exceso, en horas

t_c es el tiempo de concentración en horas

El tiempo de retraso se calculó con:



$$t_r = 0.6 t_c$$

Donde

t_r es el tiempo de retraso en horas

t_c es el tiempo de concentración en horas

De manera que, el tiempo al pico se estimo con:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

Donde

t_r es el tiempo de retraso en horas

t_p es el tiempo de pico en horas

d_e es la duración efectiva en horas

Con el tiempo al pico se utilizo la siguiente expresión para calcular el tiempo base:

$$t_b = 2.67 t_p$$

Donde

t_b es el tiempo base en horas

t_p es el tiempo de pico en horas

Finalmente para calcular el gasto al pico se utilizo la siguiente expresión:

$$q_p = \frac{0.208 A}{t_p}$$

Donde

q_p es el gasto al pico, en $m^3 / s / mm$

t_p es el tiempo al pico en horas

A en km^2

Así al calcular estos valores para cada cuenca y aplicar la expresión de q_p en cada cuenca, se genero el mapa de gasto al pico q_p .



5.2.3.4 Calculo de la Erosión

Con los mapas de las variables involucradas se implementó el modelo hidrológico en el “Raster Calculator” de ArcInfo 9.3 para así obtener la erosión en los periodos 1989 y 2007.

El modelo es:

$$y = 11.8(Q * q_p)^{0.56} KCSLP$$

La forma en que se implementó en el *Raster Calculator* es:

$$Yp = 11.8 * Pow([Q_m3_ras] * [qp_m3_ras], 0.56) * [K_ras] * [LS_ras] * [C_ras]$$

Los mapas de erosión se obtuvieron en ton/ha, luego en la tabla de atributos de las cuencas se calculó la erosión en ton/cuenca.



6 RESULTADOS

6.1 EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El Modelo Digital de Elevación (MDE) resultante tiene una precisión de 3 metros. Figura 8, fue generado en ENVI 4.5. La precisión del MDE es muy importante porque de este se generan las líneas de parteaguas para obtener las cuencas hidrológicas. Las elevaciones más grandes de hasta 4680 msnm, se encuentran en el centro del MDE y en los límites al Noroeste, correspondiente a la sierra de las cruces. Mientras que las elevaciones más bajas están hacia el sureste (Guerrero) y suroeste (Morelos).

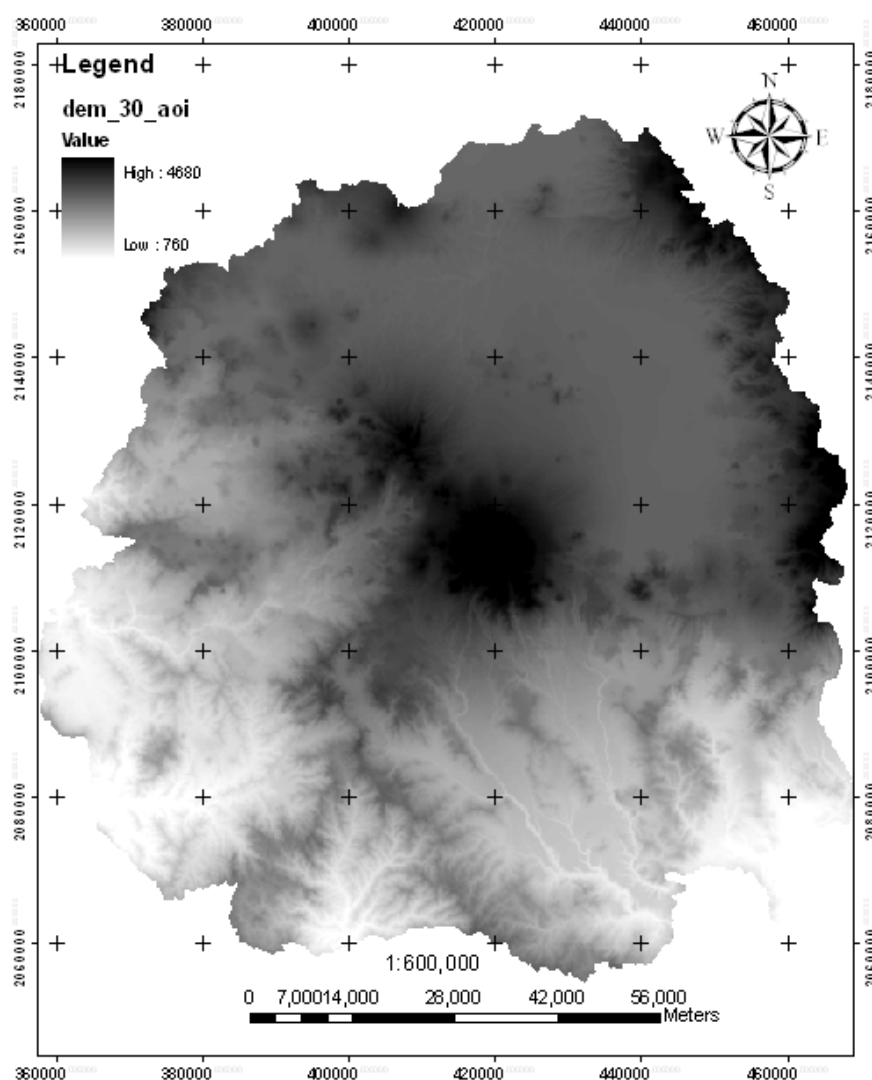


Figura 8. Modelo Digital de Elevación (3m)



6.2 MICROCUENCAS HIDROLÓGICAS

Usando como materia prima el MDE se generaron las microcuencas dentro de un radio de 60 km del área de influencia del Nevado de Toluca, de este proceso resultaron 52 microcuencas que se muestran en la figura 9, cuyas características geométricas están descritas en la tabla de atributos, la cual se muestra en el anexo 1, esta tabla fue ampliada con las variables del modelo hidrológico utilizado. La delimitación de las microcuencas está influenciada por la hidrología y el relieve de la región, estas características se muestran en la tabla 5.

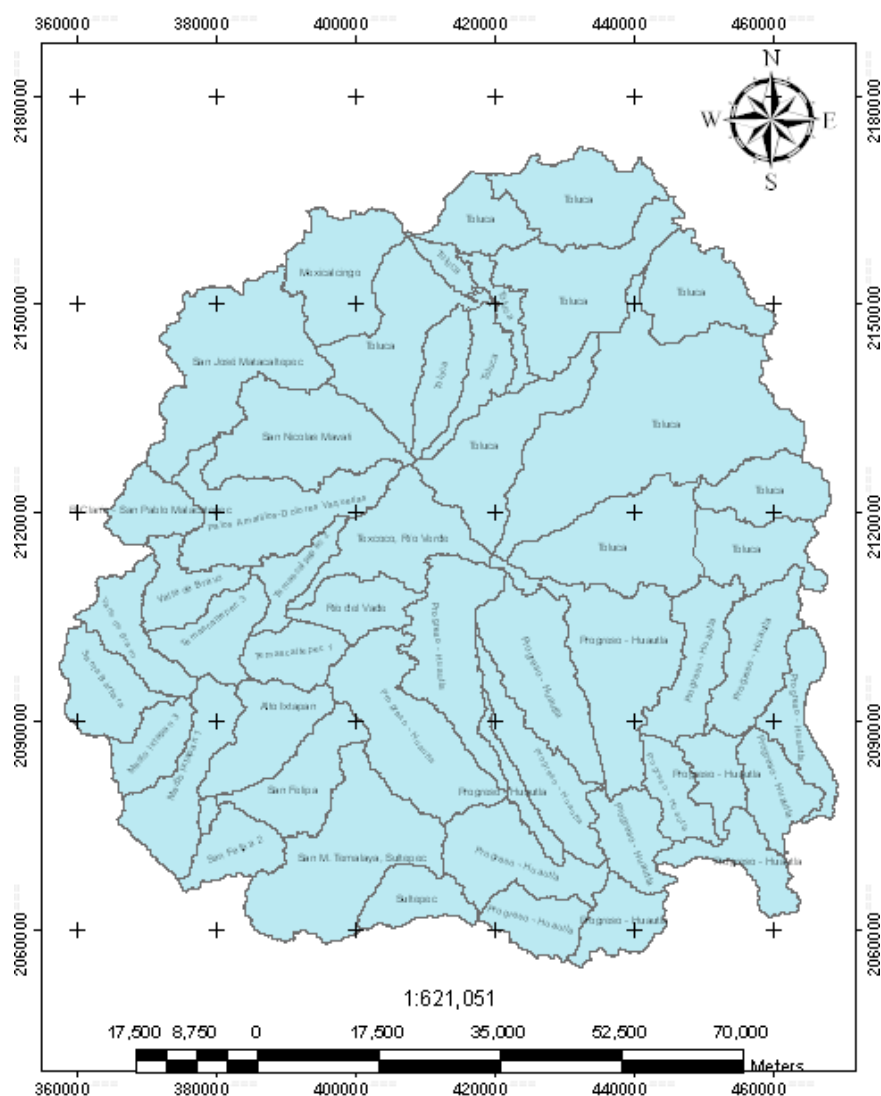


Figura 9. Microcuencas en un radio de 60 km del Nevado de Toluca



Tabla 5. Características hidrológicas y de relieve de las microcuencas

ID	AREA (km)	PEND (%)	Long. Cauce	Orden de Ríos	Forma de la cuenca	Relieve
1	0	15.0	14277	2	Redondeada	Serrezuelas, cordilleras recientes, macizos antiguos y escudos
2	108	24.7	11677	3	Redondeada	cordilleras recientes con macizos antiguos y escudos
3	106	3.9	20234	2	Redondeada	cordilleras recientes con macizos antiguos y escudos, terreno muy accidentado
4	103	5.4	19833	2	Alargada	Serrezuelas, cordilleras recientes, macizos antiguos y escudos
5	110	12.0	16179	2	Redondeada	serrezuelas con cordilleras recientes y depresiones poco profundas, terreno accidentado
6	108	13.4	28792	2	Alargada	cordilleras con macizos antiguos y escudos, terreno muy accidentado
7	212	16.0	3780	2	Alargada	cordilleras recientes con escudos y depresiones poco profundas, terreno accidentado
8	12	23.4	35405	2	Alargada	cordilleras de formación reciente, cañadas, terreno accidentado
9	398	16.7	24409	3	Redondeada	cañones pequeños, cordilleras de formación reciente con escudos y pequeñas depresiones
10	122	19.8	15077	2	Redondeada	Serrezuelos, cordilleras poco accidentadas con cañadas y escudos
11	119	10.2	19064	2	Redondeada	cordilleras recientes con escudos y cañadas, terreno muy accidentado
12	91	19.7	24247	2	Alargada	cañadas con escudos y macizos antiguos, terreno muy accidentado
13	170	15.8	9183	3	Redondeada	cordilleras con escudos y macizos antiguos, pequeñas depresiones
14	104	12.4	14103	2	Alargada	Montañas con disección, cordilleras recientes con escudos
15	53	7.7	23552	1	Alargada	cerros y lomeríos con disección, escudos con macizos antiguos
16	176	11.2	22804	2	Alargada	cerros lomeríos con disección, escudos y macizos antiguos
17	201	21.8	28818	2	Alargada	cordilleras de formación reciente, con escudos y macizos antiguos



Tabla 5. Características hidrológicas y de relieve de las microcuencas

ID	AREA (km)	PEND (%)	Long. Cauce	Orden de Ríos	Forma de la cuenca	Relieve
18	129	16.0	23728	2	Alargada	relieve muy accidentado, montañas diseccionadas con escudos y cañadas
19	326	14.6	41306	3	Alargada	montañas diseccionadas, con escudos y cañadas
20	179	15.6	24165	3	Redondeada	cerros y lomeríos diseccionados, pequeñas mesetas con depresiones menores
21	149	7.8	14068	2	Redondeada	lomeríos diseccionados con pequeños valles en las partes bajas
22	108	13.6	19551	2	Alargada	cerros y lomeríos diseccionados, pequeñas cañadas, valles estrechos
23	169	10.3	19757	2	Redondeada	cordilleras de formación reciente, pequeñas cañadas y valles
24	138	14.3	28810	2	Alargada	cordilleras de formación reciente, lomeríos diseccionados con pequeñas cañadas
25	269	10.3	14287	3	Redondeada	montañas diseccionadas con pequeñas cañadas, terreno accidentado
26	114	13.4	21382	3	Alargada	montañas diseccionadas, valles y llanuras onduladas
27	192	6.1	40803	2	Alargada	montañas diseccionadas con cañadas pequeñas y escudos
28	356	22.0	17430	3	Alargada	colinas diseccionadas, poco accidentado
29	134	11.4	30633	1	Alargada	cordilleras con montañas diseccionadas y cañadas con escudos
30	259	18.5	17670	3	Redondeada	cerros y lomeríos diseccionados con pequeñas cañadas
31	112	13.6	23319	1	Alargada	colinas y cerros con disección y pequeñas llanuras onduladas
32	85	18.1	18233	1	Redondeada	montañas y cerros diseccionados, llanuras y amplios valles
33	158	7.1	32249	2	Redondeada	valles y llanuras onduladas, pequeñas colinas
34	300	13.3	26483	1	Redondeada	Montañas diseccionadas con cañadas, terreno accidentado



Tabla 5. Características hidrológicas y de relieve de las microcuencas

ID	AREA (km)	PEND (%)	Long. Cauce	Orden de Ríos	Forma de la cuenca	Relieve
35	227	14.1	12511	3	Redondeada	Montañas diseccionadas con escudos y macizos antiguos
36	102	5.8	24338	2	Redondeada	Colinas diseccionadas, valles y llanuras onduladas
37	140	5.6	29416	1	Alargada	colinas diseccionadas, valles ondulados, serrezuelos
38	297	4.9	20145	1	Redondeada	pequeñas colinas y lomeríos, valles y llanuras onduladas
39	299	3.7	27444	2	Alargada	amplios valles y llanuras, lomeríos diseccionados
40	271	12.2	17672	2	Alargada	amplios valles y llanuras, colinas y lomeríos diseccionados
41	112	5.3	27378	1	Alargada	amplios y alargados valles y llanuras, colinas diseccionadas
42	98	10.6	46101	1	Redondeada	amplios valles y llanuras, montañas diseccionadas
43	778	13.3	31850	2	Redondeada	colinas y lomeríos diseccionados, valles y llanuras onduladas
44	397	11.0	18016	2	Alargada	valles y llanuras
45	60	6.9	21810	1	Redondeada	valles y llanuras, colinas y lomeríos diseccionados
46	276	13.7	12413	2	Alargada	valles y llanuras
47	37	5.5	17954	1	Redondeada	montañas diseccionadas, valles ondulados
48	193	7.0	22891	2	Redondeada	valles ondulados, pequeñas colinas diseccionadas
49	226	8.0	27237	1	Redondeada	montañas diseccionadas, llanuras onduladas
50	307	7.5	21248	1	Redondeada	llanuras y valles, pequeños lomeríos diseccionados
51	115	8.7	30707	1	Redondeada	montañas diseccionadas, amplios valles
52	228	6.9	24409	1	Redondeada	cordilleras con montañas diseccionadas, pequeñas cañadas con escudos



6.3 FACTORES DE LA ECUACIÓN MUSLE

Los mapas resultantes de los factores K, LS, C se muestran en las Figuras 10, 11 y 12 respectivamente, estos mapas en formato raster tiene una resolución espacial de 10 metros debido a que este es el tamaño de pixel de la imagen de satélite y las operaciones entre mapas requieren la misma resolución espacial en todos ellos.

El mapa del factor K muestra valores más altos (0.079) en las microcuencas ubicadas al suroeste del Nevado de Toluca, mientras que las microcuencas que descienden del Nevado de Toluca y valle de Toluca se tienen valores pequeños de erosionabilidad (0.0001). La tabla 6 muestra la distribución porcentual de este factor en el área de estudio.

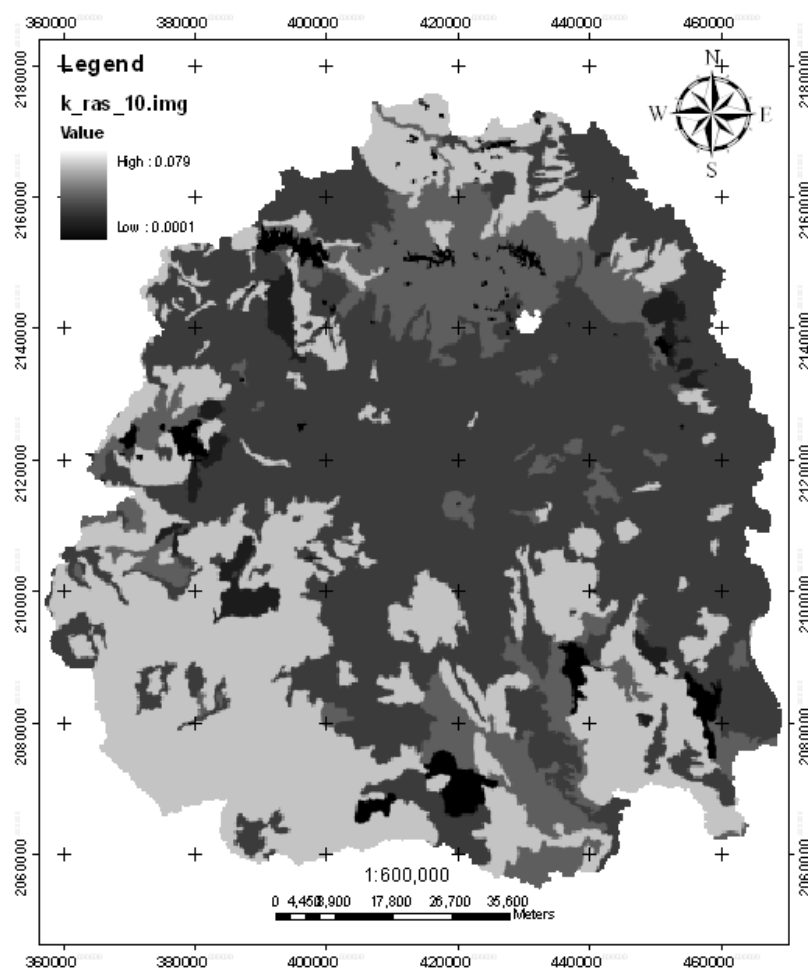


Figura 10. Mapa del factor de erosionabilidad K



Tabla 6. Porcentaje de los valores del factor K

Factor K	Área (m2)	(%)
0.0001	77773322	0.81
0.007	133804232	1.39
0.013	204847288	2.13
0.02	4775579608	49.57
0.026	1305899567	13.56
0.04	3127070077	32.46
0.079	8736292.5	0.09

El factor LS por inclinación y longitud de pendiente es mayor en las zonas donde hay pendientes fuerte, como es el caso de las faldas del Nevado de Toluca, mientras que en las planicies se tienen valores pequeños. La figura 11 muestra la variación de este factor en las microcuencas. Las microcuencas con valores más altos de LS (0.995) corresponden a aquellas que descienden del nevado de Toluca y hacia la parte sur del área de estudio, en las que el relieve es muy accidentado. Los valores más bajos (0.34) corresponden a las microcuencas hacia el norte que tienen relieve poco accidentado.

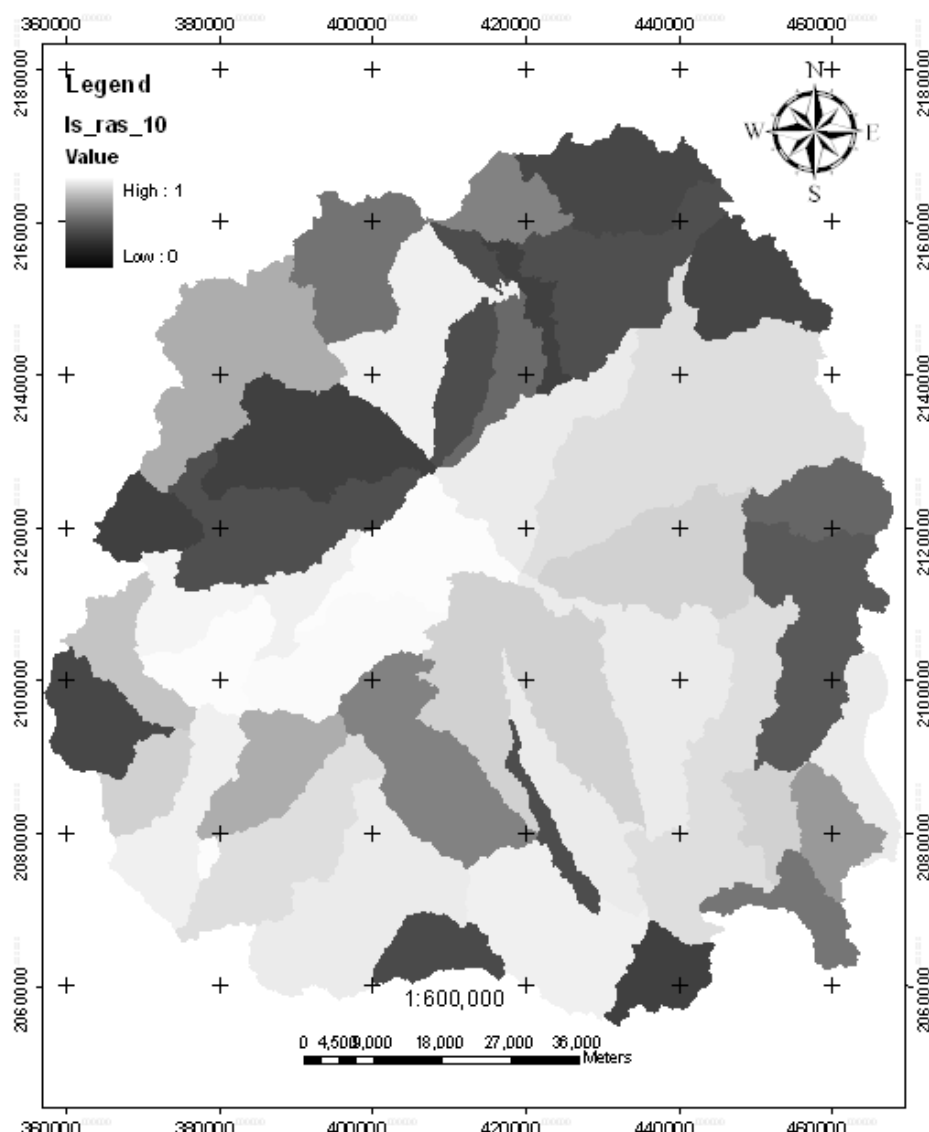


Figura 11. Factor LS por inclinación y longitud de pendiente

El factor C debido a la cobertura vegetal y manejo del suelo está muy relacionado con el mapa de uso de suelo. El mapa del factor C (fig. 12), tiene valores que van entre 0 y 1 teniendo valores más bajos en los lugares donde existen bosque con buena cobertura correspondientes a las microcuencas; río del valle, Toluca, río verde y progreso, que descienden del nevado de Toluca y de la sierra de las cruces (noreste del área de estudio), mientras que en el valle de Toluca y hacia temascalcingo los valores de C son cercanos o iguales a 1 debido a la escasa cobertura vegetal, donde se hayan las microcuencas de progreso-huautla, temascaltepec, valle de bravo, san Felipe y medio ixtapan.

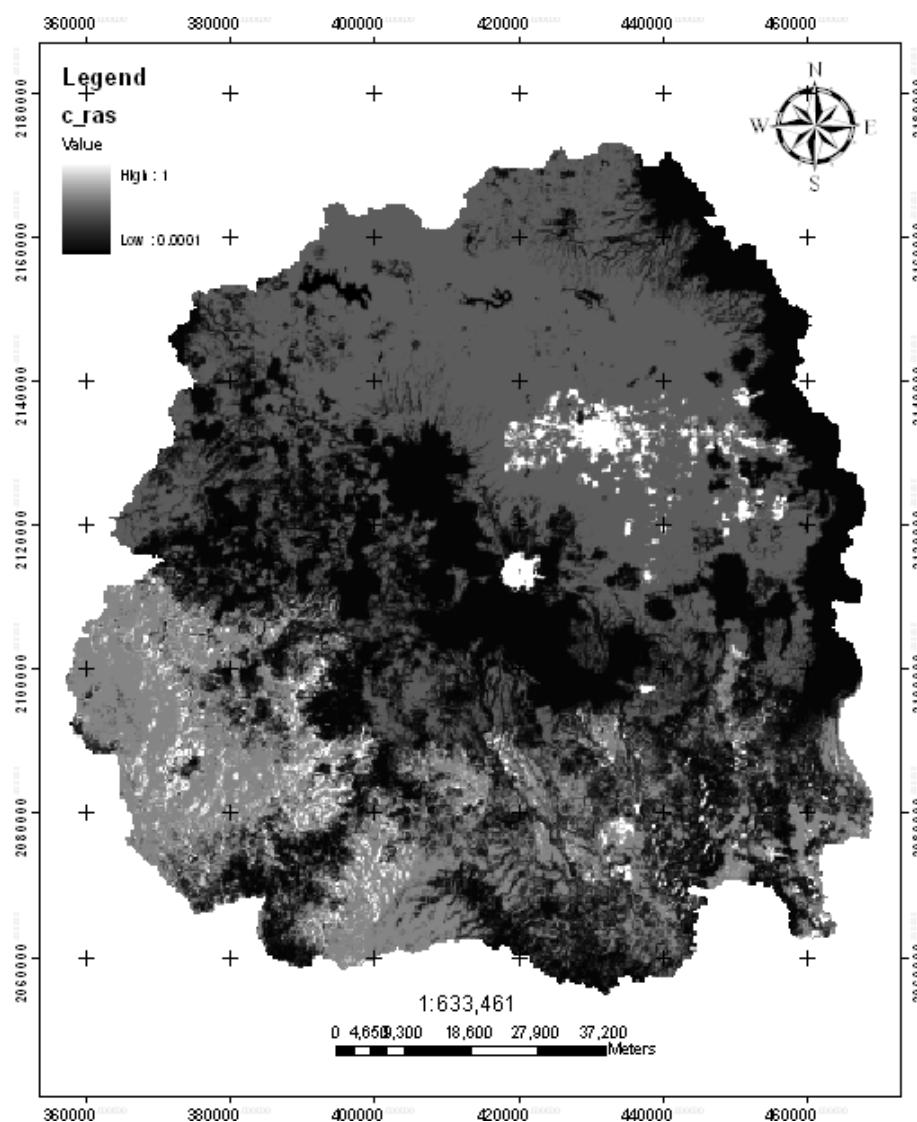


Figura 12. Mapa del factor C

6.4 USO DE SUELO Y GRUPO HIDROLÓGICO

La figura 13 muestra la distribución de los grupos hidrológicos de suelo en el área de estudio, donde hay 4 grupos que varían de acuerdo a las características físicas de los suelos. Como se puede observar el grupo dominante es el grupo B que corresponde a suelos de textura media y con moderada permeabilidad en estado mojado, le sigue el grupo D que corresponde a suelos muy impermeables que favorecen el escurrimiento y por lo tanto la erosión. La resolución espacial del



mapa es de 10m, para ser compatible con los demás en las operaciones de mapas. En la tabla 7 se muestran los porcentajes que ocupa cada grupo de suelo en la región de estudio.

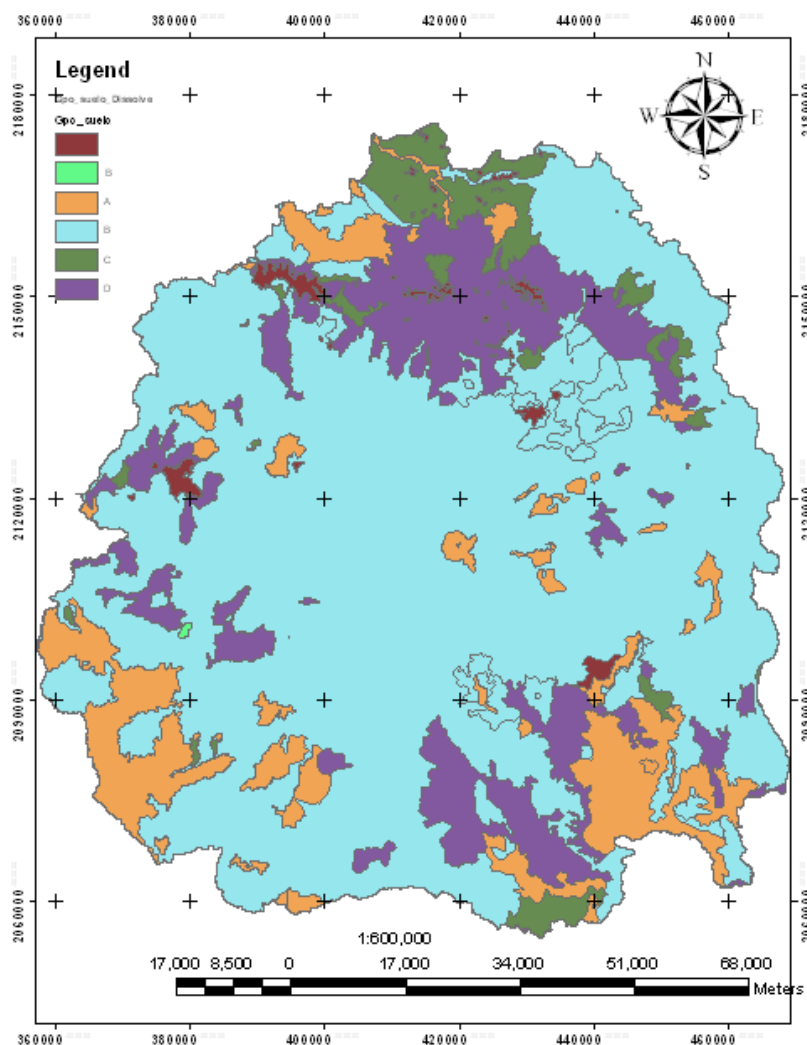


Figura 13. Mapa de grupos hidrológicos de suelo

Tabla 7. Porcentaje que ocupa cada grupo hidrológico de suelo

Gpo. Hid.	(%)
A	11.3
B	66.9
C	4.3
D	14.7
A/D	0.1
B/D	2.7



El resultado de la clasificación digital de imágenes satelitales arrojó 6 clases de uso de suelo, Figuras 14a y 14b, que corresponden a: 1) cuerpos de agua, 2) bosque, 3) matorral, 4) suelo desnudo, 5) agricultura y 6) Zonas urbanas. Las clases fueron definidas de acuerdo a la clasificación de uso de suelo de INEGI.

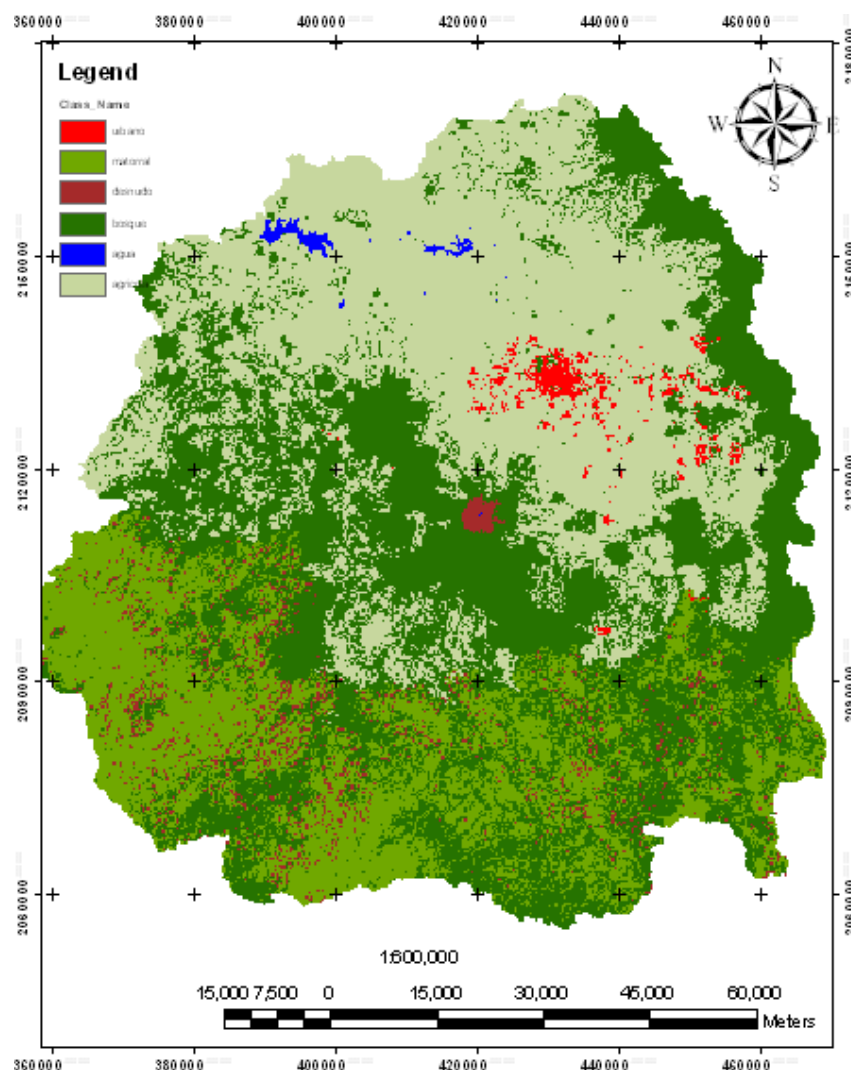


Figura 14a. Uso de suelo en la década de los 80's

La figura 14b, muestra como en la parte sur y sureste del área de estudio hubo un cambio en el uso del suelo, este cambio se debe al uso agrícola de la tierra y al sistema agrícola de Rosa Tuma y Quema (R-T-Q) asociado a incendios causados por las altas temperaturas. La tabla 8 muestra los valores de uso de suelo en porcentaje para la década de los 80's y 2000 así como el cambio en porcentaje con respecto al valor en la década de los 80's.

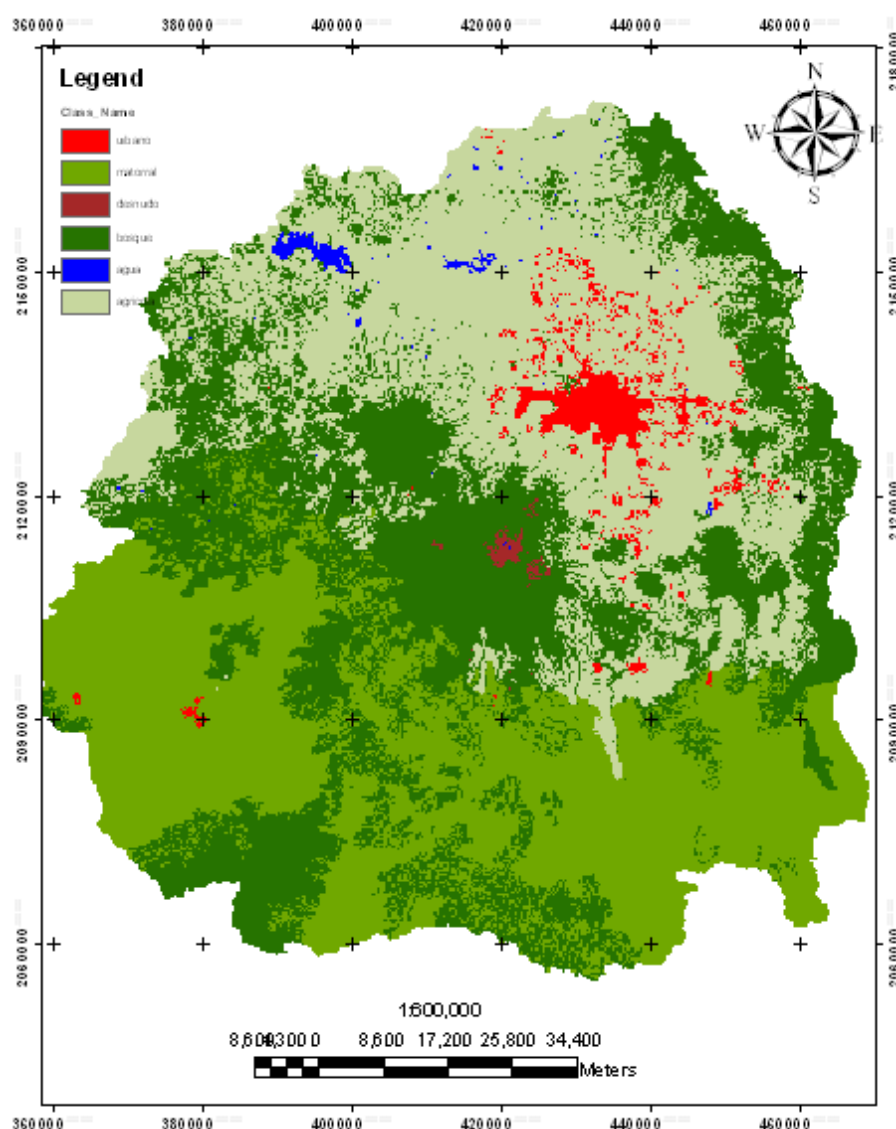


Figura 14b. Uso de suelo en la década 2000

Tabla 8. Porcentajes de uso de suelo en la década de los 80's y 2000.

Uso de Suelo 80's	(%) 80's	(%) 2000	(%)cambio respecto al valor inicial
Cuerpos de agua	0.30	0.40	36.09
Uso Forestal	40.13	33.92	-15.66
matorral herbáceo	20.85	31.61	51.25
suelo desnudo	2.42	0.24	-90.29
agricultura	35.33	31.47	-11.15
desarrollo urbano	0.97	2.37	142.75



En la figura 15 se muestra el mapa de cambio de uso de suelo que se generó con el comando “change detection” de Envi 4.5. En este mapa se observa que la parte sur del área de estudio correspondiente a las microcuencas de Progreso- Huautla y valle de Toluca tuvieron mayor cambio de uso de suelo.

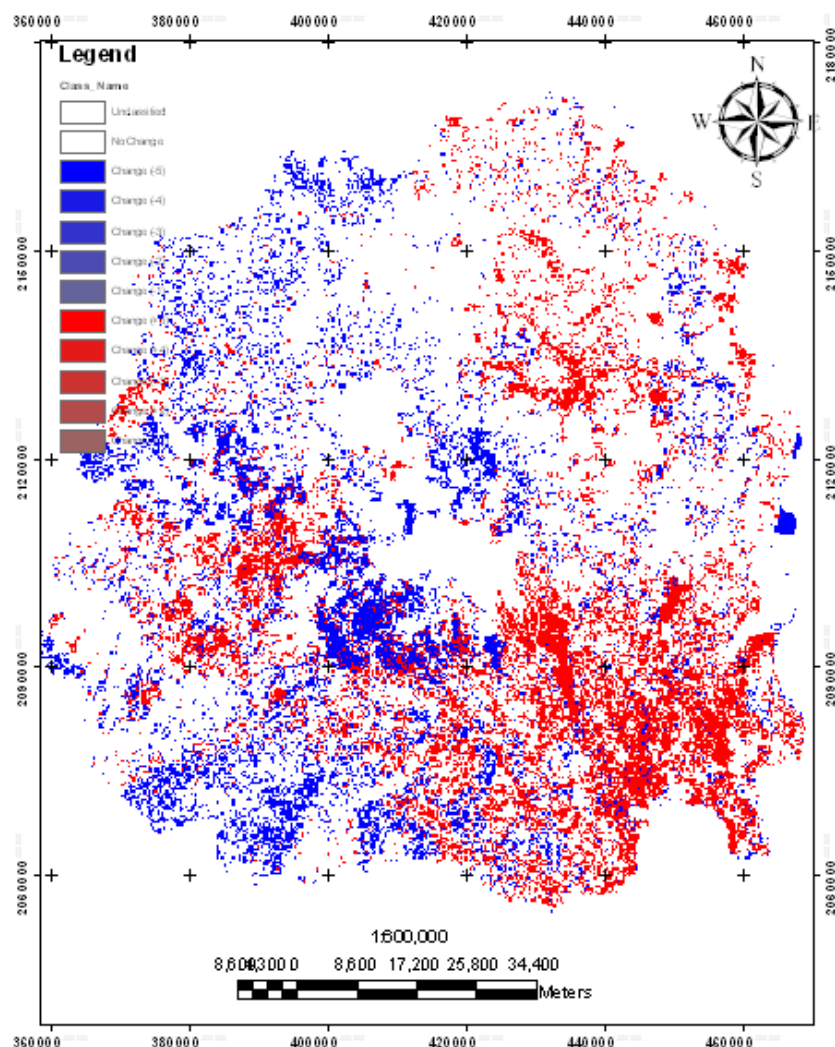


Figura 15. Mapa de cambio de uso de suelo

6.5 ESCURRIMIENTO

La estimación del escurrimiento por el método del Soil conservation Service (SCS) implicó la obtención de un mapa de número de curva (CN) (figura 16a y 16b); se calculó el Numero de Curva para cada unidad cartográfica. Estas unidades fueron



generadas por intersección de los mapas de grupo hidrológico y uso de suelo. Dos mapas de CN fueron elaborados, uno para la década de los 80's y otro para la década 2000. En general, los valores grandes de CN favorecen el escurrimiento y son aquellos donde hay mala condición hidrológica y una cobertura muy pobre del suelo. La variación en el valor de CN de un periodo a otro depende básicamente del cambio en el uso de suelo.

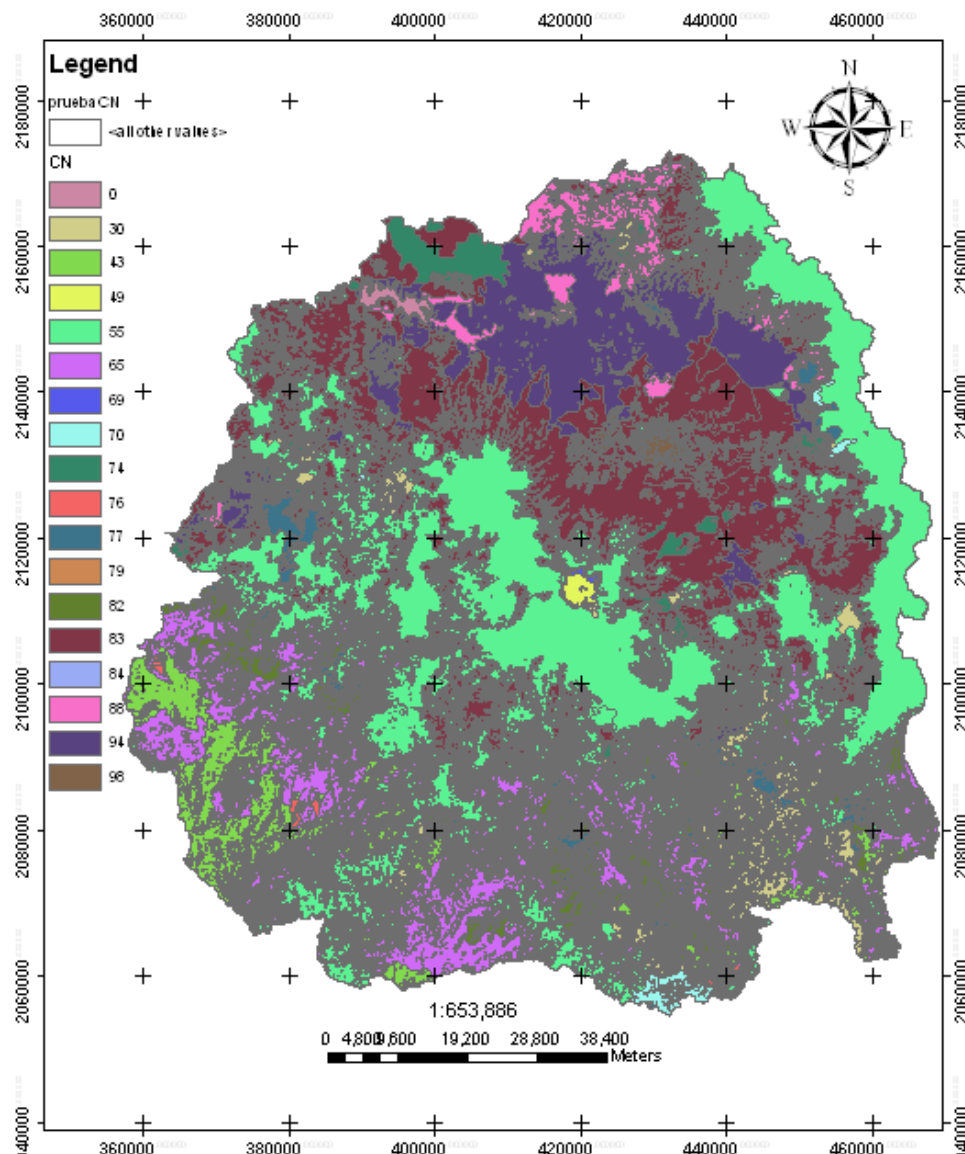


Figura 16a. Número de Curva, CN en la década de los 80's

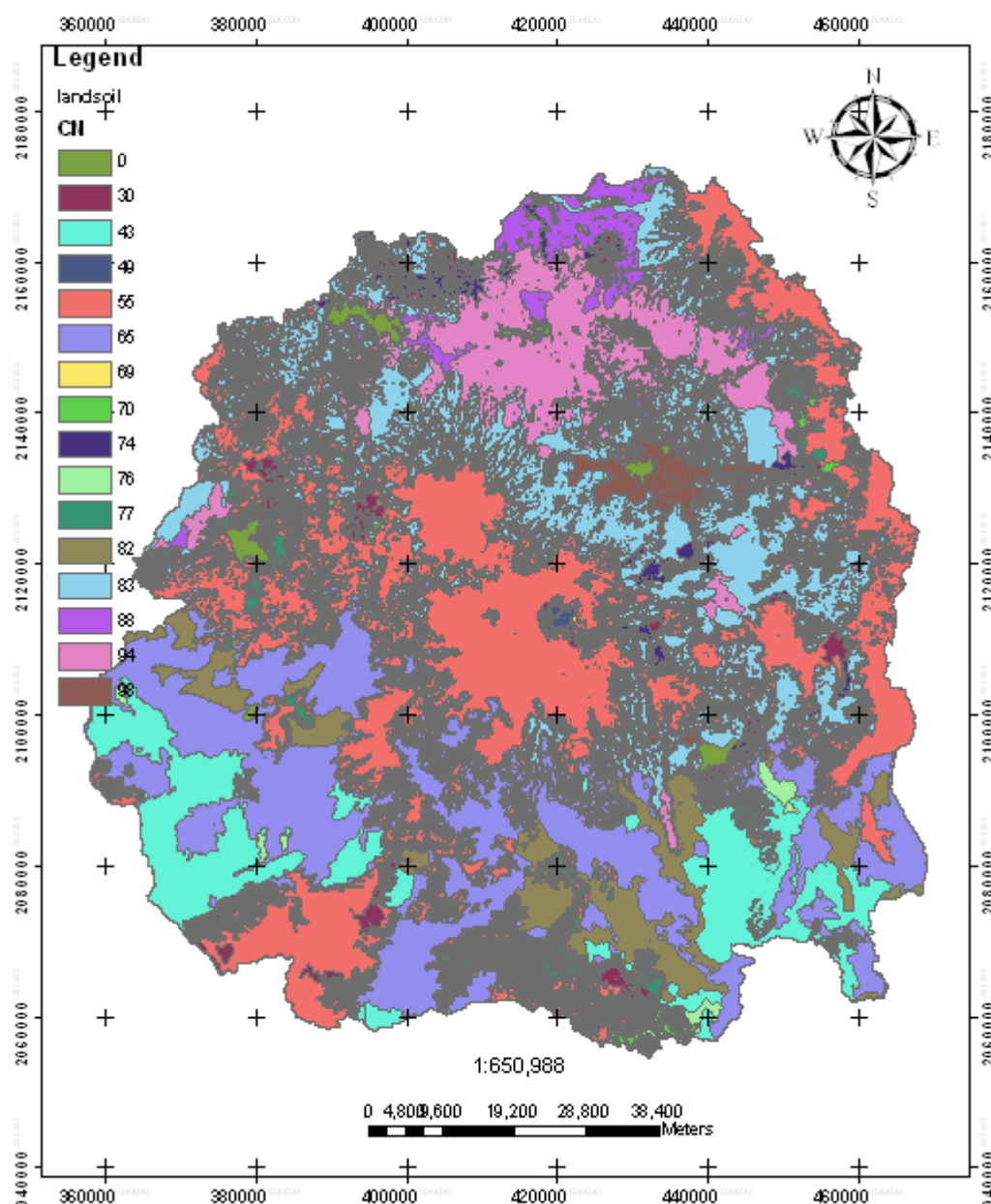


Figura 16b. Número de Curva, CN en la década 2000

El mapa de escurrimiento generado con el método del número de curva para cada periodo se muestra en la Figura 17a y 17b, también tiene una resolución espacial de 10m. La variación espacial del escurrimiento es debido a los factores de grupo hidrológico y uso de suelo que intervienen en su cálculo, esta variabilidad va de 52m^3 hasta 108 m^3 en 1989 y de 41m^3 hasta 131.3 m^3 en 2007. La variación de escurrimiento se refleja en la erosión. Las áreas de menor escurrimiento están



localizadas en las microcuencas que descienden del nevado de Toluca y de la sierra de las cruces, y las áreas de mayor escurrimiento se localizan en las microcuencas de Progreso-Huahutla al sur del área de estudio.

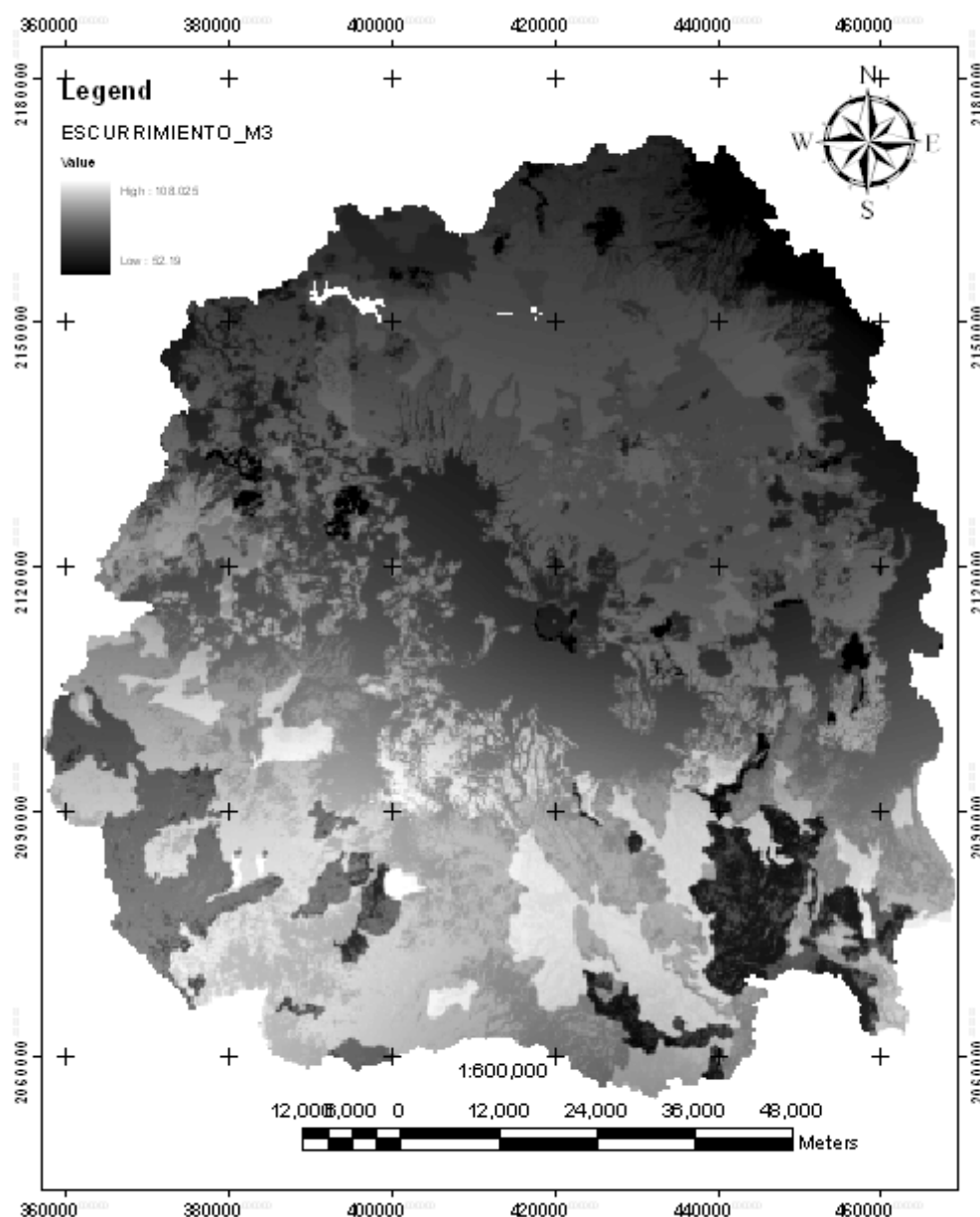


Figura 17a. Escurrimiento (m^3) en la década de los 80's

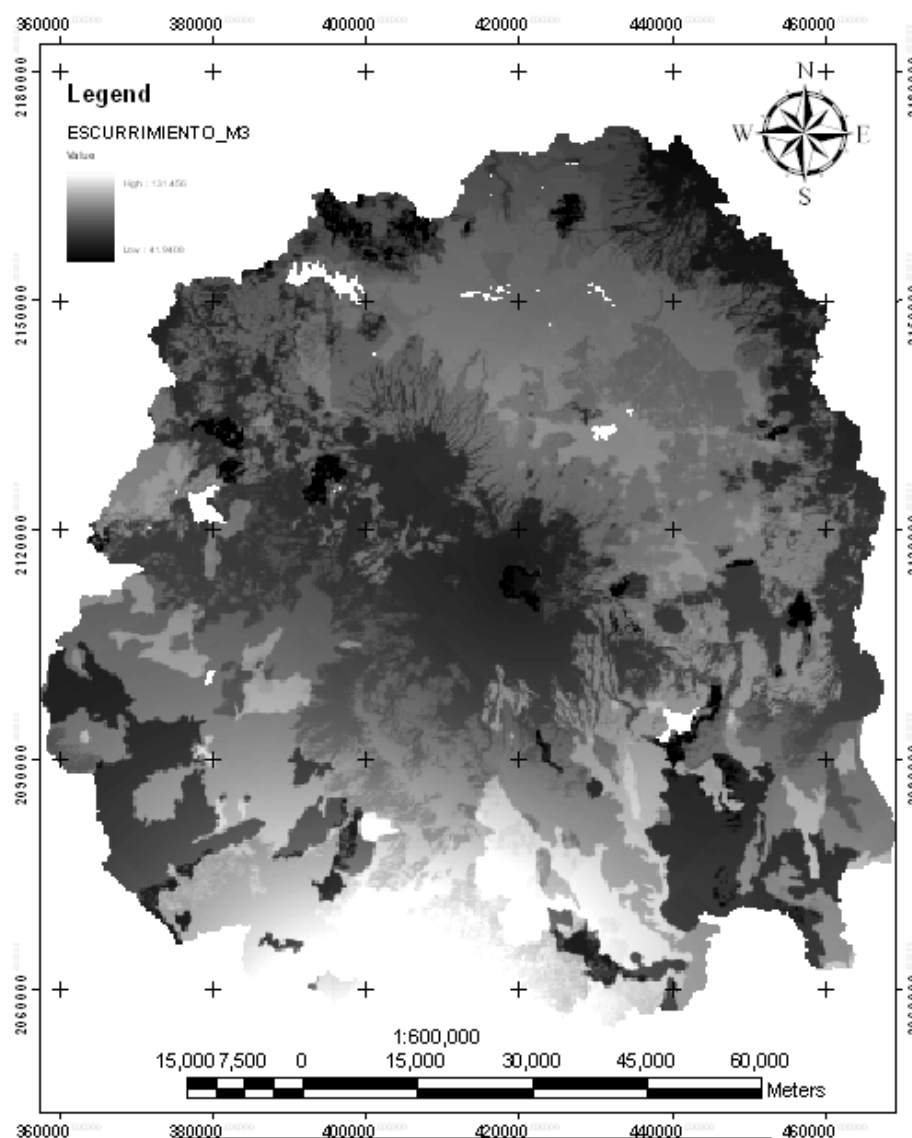


Figura 17b. Esgurrimiento (m^3) en la década 2000

6.6 MAPA DE EROSIÓN

Los mapas raster de eros n de cada periodo se muestran en la figura 18a y 18b, para las dos periodos analizados, 80's y 2000 respectivamente, en el mapa del 2000 se tienen valores más altos de eros n en ton/ha (tabla 9) de un total de 52 microcuencas en el área estudiada 36 mostraron un incremento positivo en la



erosión. El mapa de cambio de erosión se muestra en la figura 19, este mapa coincide con las áreas de cambio de uso de suelo.

Las microcuencas con valores negativos se deben a un cambio favorable en sus condiciones de uso de suelo, ya que los otros factores no mostraron cambios para el intervalo de tiempo considerado en el presente estudio.

Con base a los niveles de erosión (FAO, 1980) y a la clasificación geodinámica, las microcuencas estudiadas son agrupadas en dos unidades:

- 1) Medio estable: agrupa a microcuencas con erosión leve (0-10 ton/ha/año); la formación del suelo domina sobre la erosión o morfogénesis.
- 2) Medio penestable: se caracteriza por una erosión moderada (10-50 ton/ha/año); pero la formación de suelo compensa esta pérdida de suelo.



Tabla 9. Erosión por cuenca en toneladas por año para los 80's y 2000

ID	Nombre de la Cuenca	Erosión por cuenca en ton (2000)	Erosión por cuenca en ton (80's)	Cambio (ton/cuenca)	Cambio (%)	Cambio (%)
1	Progreso - Huautla 1	29676.8	22652.1	7024.7	31.0	31.0
2	Progreso - Huautla 2	19474.3	11512.8	7961.4	69.2	69.2
3	Sultepec	24121.7	27004.8	-2883.1	-10.7	
4	Progreso - Huautla 3	31756.6	20324.2	11432.4	56.3	56.3
5	San Felipe 1	11409.9	45974.1	-34564.2	-75.2	
6	Progreso - Huautla 4	100218.6	77394.5	22824.2	29.5	29.5
7	Río Cutzamala	2584.6	4277.3	-1692.7	-39.6	
8	San M. Temalaya, Sultepec	317190.7	431146.9	-113956.2	-26.4	
9	Progreso - Huautla 5	193863.2	64136.9	129726.3	202.3	202.3
10	Progreso - Huautla 6	32863.2	21098.3	11765.0	55.8	55.8
11	Progreso - Huautla 7	44924.5	19715.7	25208.9	127.9	127.9
12	San Felipe 2	96098.4	119255.8	-23157.5	-19.4	
13	Medio Ixtapan 3	80489.8	93115.8	-12626.1	-13.6	
14	Progreso - Huautla 8	9168.1	7748.3	1419.8	18.3	18.3
15	Alto Ixtapan	118547.5	117843.4	704.1	0.6	0.6
16	Medio Ixtapan 1	169135.3	189971.4	-20836.1	-11.0	
17	Progreso - Huautla 9	32598.6	23154.0	9444.6	40.8	40.8
18	Progreso - Huautla 10	105404.8	90551.7	14853.1	16.4	16.4
19	Progreso - Huautla 11	86794.6	65468.1	21326.5	32.6	32.6
20	Santa Bárbara	35332.4	39844.2	-4511.8	-11.3	
21	Temascaltepec 1	40973.4	37738.4	3235.0	8.6	8.6
22	Progreso - Huautla 12	63842.0	47354.2	16487.9	34.8	34.8
23	Temascaltepec 3	85341.3	78245.6	7095.7	9.1	9.1
24	Progreso - Huautla 13	78336.2	47540.1	30796.1	64.8	64.8
25	Río del Valle	40699.3	24257.8	16441.5	67.8	67.8
26	Progreso - Huautla 14	28257.0	19370.2	8886.8	45.9	45.9
27	Progreso - Huautla 15	180750.3	122662.2	58088.1	47.4	47.4
28	Valle de Bravo 1	86731.7	93219.8	-6488.1	-7.0	
29	Progreso - Huautla 16	67684.6	62809.3	4875.4	7.8	7.8
30	Valle de Bravo 2	54065.2	47989.3	6075.9	12.7	12.7
31	Temascaltepec 2	24511.9	13384.8	11127.0	83.1	83.1
32	Toluca 1	17025.8	15032.1	1993.7	13.3	13.3
33	Toluca 2	112996.5	103552.6	9443.9	9.1	9.1
34	Texcoco, Río Verde	32990.4	31036.4	1954.0	6.3	6.3



Tabla 9. Continuación. Erosión por cuenca en toneladas por año para los 80's y 2000

ID	Nombre de la Cuenca	Erosión por cuenca en ton (2000)	Erosión por cuenca en ton (80's)	Cambio (ton/cuenca)	Cambio (%)	Cambio (%)
35	El Clarín	9436.6	12213.2	-2776.7	-22.7	
36	Toluca 3	16393.3	15932.8	460.4	2.9	2.9
37	Palos Amarillos	20883.6	21774.8	-891.2	-4.1	
38	San Nicolás Mavati	26792.8	31900.4	-5107.6	-16.0	
39	Toluca 4	106712.3	104762.7	1949.6	1.9	1.9
40	Toluca 5	14288.4	14389.5	-101.2	-0.7	
41	Toluca 6	15536.0	14876.4	659.6	4.4	4.4
42	Toluca 7	552477.3	453292.8	99184.5	21.9	21.9
43	San José Matalcaltepec	116945.7	128986.0	-12040.3	-9.3	
44	Toluca 8	5018.2	4546.6	471.6	10.4	10.4
45	Toluca 9	105505.9	107794.7	-2288.8	-2.1	
46	Toluca 10	4094.6	3923.3	171.2	4.4	4.4
47	Toluca 11	23186.3	19898.8	3287.5	16.5	16.5
48	Mexicalcingo	51730.7	59295.0	-7564.3	-12.8	
49	Toluca 12	50733.9	41612.8	9121.0	21.9	21.9
50	Toluca 13	18059.8	16123.2	1936.6	12.0	12.0
51	Toluca 14	27203.0	24601.3	2601.6	10.6	10.6
52	Progreso - Huautla 17	197999.1	41089.9	156909.2	381.9	381.9
PROMEDIO		73439.5	64488.4	8951.1	25.0	43.9

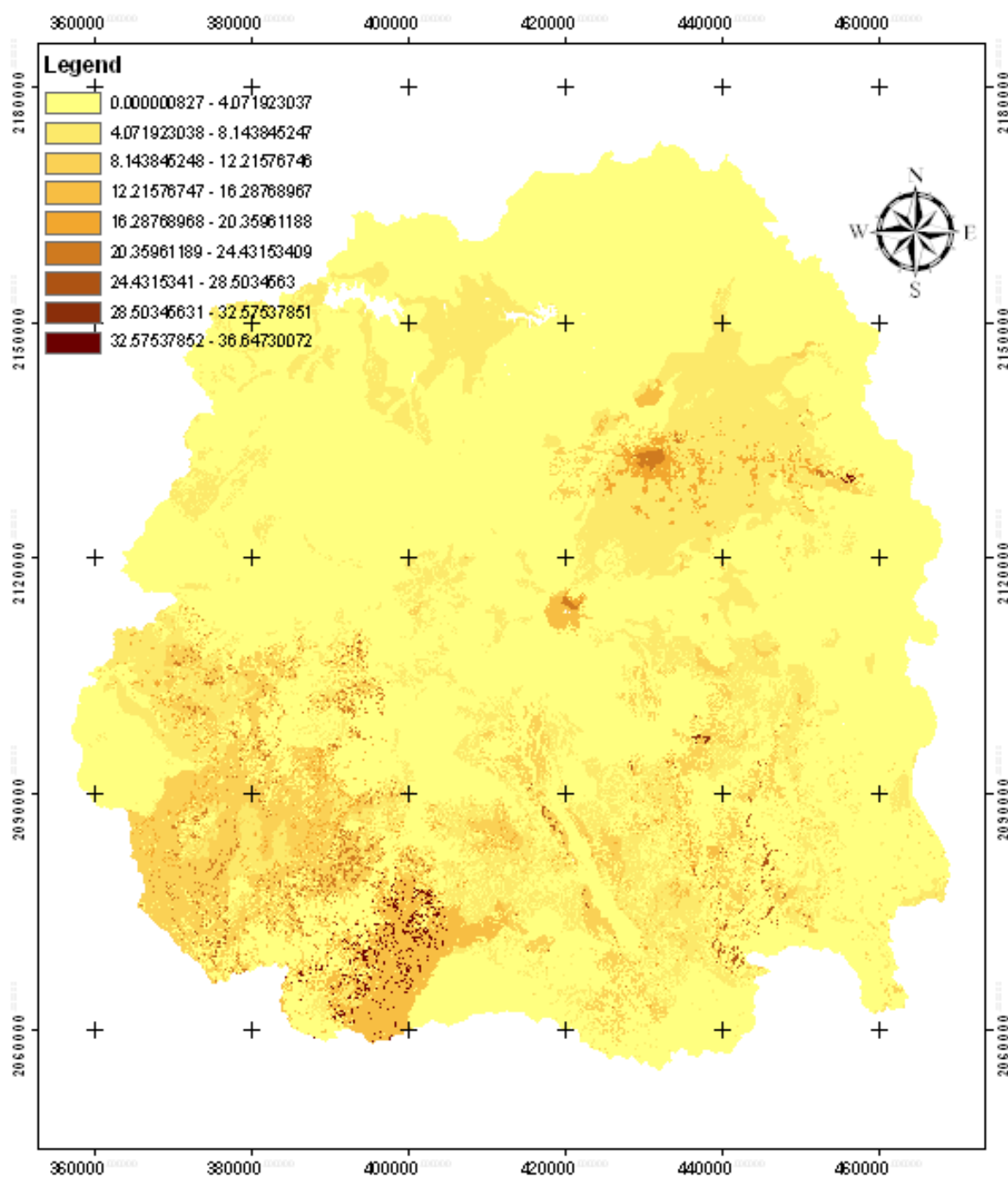


Figura 18a. Erosión (ton/ha/año) en la década de los 80's

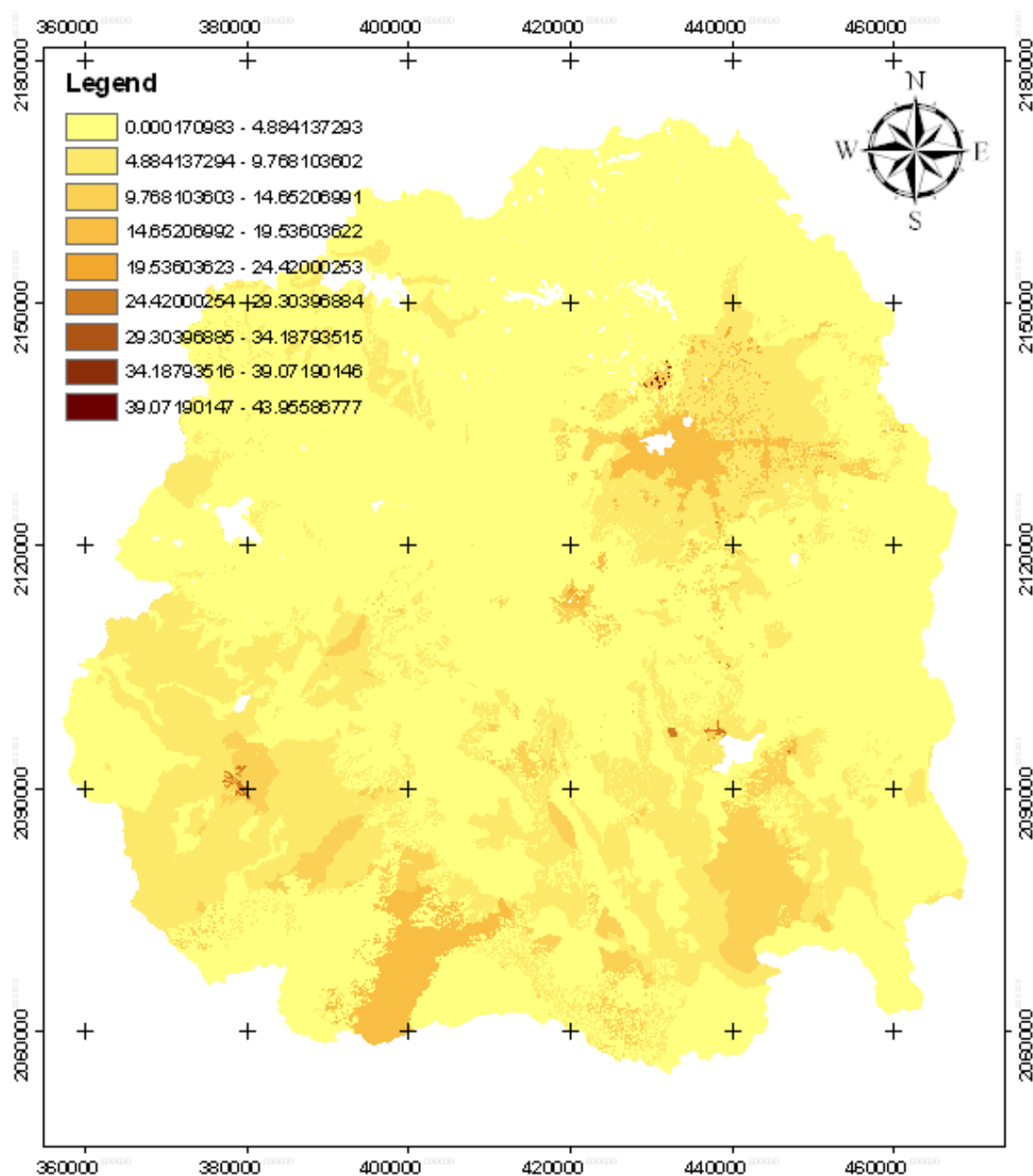


Figura 18b. Erosión (ton/ha/año) en la década 2000

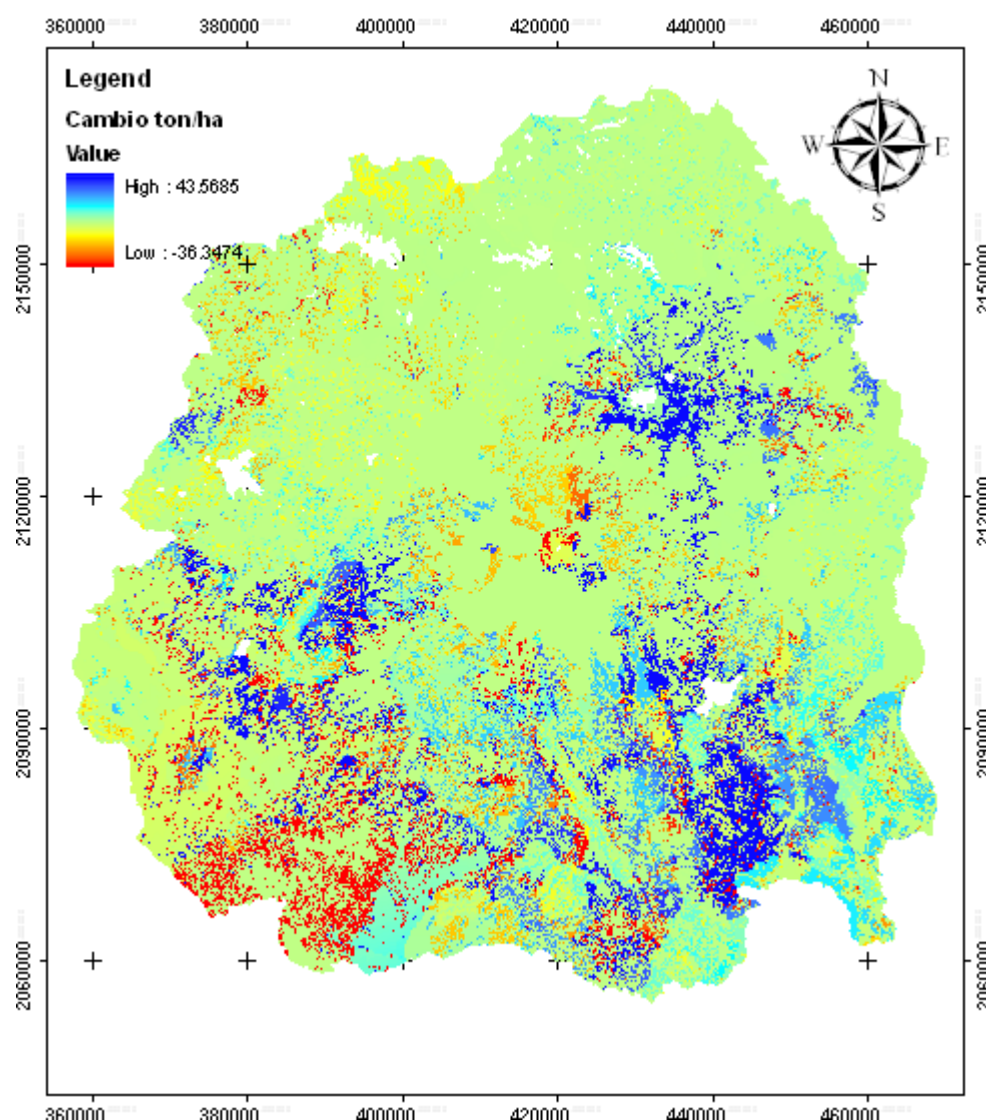


Figura 19. Mapa de cambio en la erosión

En la figura 20, se puede ver que las cuencas con incremento de erosión son aquellas ubicadas dentro del valle de Toluca y las cuencas con mayores elevaciones y pendiente tienen mayor erosión mientras que las que muestran valores negativos se ubican hacia la parte oeste y suroeste del Nevado de Toluca que es la parte con menor elevación en la zona de estudio.





7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Existe una congruencia entre el mapa de tasa de calentamiento y los mapas de cambio de uso de suelo y de tasa de erosión. Es decir que, las áreas de mayor tasa de calentamiento coinciden con las áreas de mayor cambio. Estas áreas de cambio se ubican principalmente en el sur del área de estudio.

Existe también una alta correlación entre la densidad y distribución de la población con las áreas de mayor cambio. Las áreas de mayor cambio se ubican en el valle de Toluca y en el sur del área de estudio.

Los cambios en el sur del área de estudio consisten principalmente en la deforestación como consecuencia del desplazamiento de la frontera agrícola hacia las grandes altitudes en busca de humedad que garantice el desarrollo completo de los cultivos y una mayor producción. En el valle de Toluca la extensión de la ciudad de Toluca se incremento en más del 100% extendiéndose sobre las áreas agrícolas sin un plan de desarrollo con políticas de rigor ambiental.

La superficie forestal en el área de estudio disminuyo en 15.66%, a pesar de ser un área protegida. Se incremento el área de matorral como consecuencia de deforestación y/o del abandono de áreas de cultivos a la regeneración natural, en un 51.25%. En el valle de Toluca la superficie de desarrollo urbano se incremento de 1.4% con respecto al área total de la zona de estudio, pero en 142.75% con respecto a su superficie en la década de los 80's.

La tasa de erosión se incremento en 43.9%, debido a los cambios en el uso de suelo que favorecen la pérdida de suelo, estos cambios son debidos al efecto del cambio climático.



7.2 RECOMENDACIONES

Se requiere de una política ambiental rigurosa para el uso y gestión de las áreas protegidas, así como de un ordenamiento territorial urbano.

Realizar proyectos productivos y conservacionistas que mitiguen la pérdida de suelo por erosión en terrenos agrícolas y forestales.

Proponer acciones que vayan encaminadas a la construcción de obras de retención de suelo



ANEXOS

Anexo 1. Características geométricas de las cuencas

ID	Cuenca	Nombre de la Cuenca	AREA (km)	Pendiente (%)	Long. del cauce principal (m)
1	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 1	108.073	24.727	10976
2	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 2	106.011	3.882	10280
3	Río Balsas-Zirándalo	Sultepec	102.602	5.353	16790
4	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 3	110.458	12.003	14394
5	Río Cutzamala	San Felipe 1	107.946	13.436	12152
6	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 4	211.924	16.015	23908
7	Río Cutzamala	Río Cutzamala	11.674	23.379	2517
8	Río Balsas-Zirándalo	San M. Temalaya, Sultepec	398.031	16.688	27116
9	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 5	219.999	19.785	19062
10	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 6	119.199	10.196	13627
11	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 7	90.647	19.693	15477
12	Río Cutzamala	San Felipe 2	170.025	15.763	20947
13	Río Cutzamala	Medio Ixtapan 3	104.261	12.411	7618
14	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 8	52.781	7.710	12911
15	Río Cutzamala	Alto Ixtapan	176.017	11.191	18422
16	Río Cutzamala	Medio Ixtapan 1	200.540	21.795	16317
17	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 9	128.848	16.045	21170
18	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 10	325.725	14.581	18522
19	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 11	179.365	15.595	36198
20	Río Cutzamala	Santa Bárbara	149.397	7.769	18238
21	Río Cutzamala	Temascaltepec 1	108.195	13.631	11179
22	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 12	168.760	10.318	16781
23	Río Cutzamala	Temascaltepec 3	137.781	14.321	14911
24	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 13	269.197	10.276	23945
25	Río Cutzamala	Río del Valle	113.940	13.399	12869
26	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 14	192.356	6.082	17082
27	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 15	356.369	21.977	28875
28	Río Cutzamala	Valle de Bravo 1	134.052	11.411	14442
29	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 16	259.328	18.527	26452
30	Río Cutzamala	Valle de Bravo 2	112.308	13.642	15456



Anexo 1 (Continuación). Características geométricas de las cuencas

ID	Cuenca	Nombre de la Cuenca	AREA (km)	Pendiente (%)	Long. del cauce principal (m)
31	Río Cutzamala	Temascalpepec 2	85.199	18.054	21216
32	Río Lerma-Toluca	Toluca 1	158.233	7.090	10777
33	Río Lerma-Toluca	Toluca 2	299.805	13.323	25636
34	Río Cutzamala	Texcoco, Río Verde	227.206	14.106	24699
35	Río Cutzamala	El Clarín	102.460	5.811	10211
36	Río Lerma-Toluca	Toluca 3	139.517	5.583	16804
37	Río Cutzamala	Palos Amarillos	297.064	4.887	23575
38	Río Cutzamala	San Nicolás Mavati	298.693	3.748	17780
39	Río Lerma-Toluca	Toluca 4	270.775	12.219	24291
40	Río Lerma-Toluca	Toluca 5	112.418	5.255	15486
41	Río Lerma-Toluca	Toluca 6	98.454	10.560	22847
42	Río Lerma-Toluca	Toluca 7	777.918	13.277	33075
43	Río Cutzamala	San José Matalcaltepec	397.369	11.046	25518
44	Río Lerma-Toluca	Toluca 8	60.460	6.863	15155
45	Río Lerma-Toluca	Toluca 9	275.760	13.650	16747
46	Río Lerma-Toluca	Toluca 10	37.223	5.532	11980
47	Río Lerma-Toluca	Toluca 11	193.380	6.963	15576
48	Río Cutzamala	Mexicalcingo	225.800	7.983	18990
49	Río Lerma-Toluca	Toluca 12	307.106	7.547	19103
50	Río Lerma-Toluca	Toluca 13	114.593	8.682	10825
51	Río Lerma-Toluca	Toluca 14	228.213	6.886	253253
52	Río Grande de Amacuzac	Progreso - Huautla 17	219.999	19.785	19062



Anexo 2. Valores del Factor de Erosionalidad K, (FAO, 1980).

Orden	Textura			Orden	Textura			Unidades de suelo de la clasificación FAO	
	G*	M*	F*		G*	M*	F*	Nombre	Símbolo
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013	Acrisoles	A
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026	Cambisoles	B
Ag	0.026	0.04	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026	Chernozem	C
Ah	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.026	0.040	0.013	Podzoluvisoles	D
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,h)	0.013	0.020	0.007	Rendzinas	E
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x)	0.013	0.020	0.007	Ferrosoles	F
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026	Gleysoles	G
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026	Feozem	H
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026	Litosoles	I
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013	Fluvisoles	J
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013	Kastañozem	K
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026	Luvisoles	L
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026	Gleysem	M
BK	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007	Nitsoles	N
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013	Histosoles	O
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013	Podzole	P
C(g,h,k,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007	Arenosoles	Q
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013	Regosoles	R
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026	Solonetz	S
F(a,h,o,p,r,x)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026	Andosoles	T
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026	Rankers	U
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013	Vertisoles	V
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026	Planosoles	W
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013	Xerosoles	X
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007	Yermosoles	Y
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007	Solonchak	Z
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013		
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013		
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007		
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026		
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026		



J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
K(h,K,l)	0.026	0.040	0.013	X(h,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007
Lg	0.026	0.040	0.013	Zo	0.026	0.040	0.013
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

- G = Gruesa, M = Mediana, F = Fina

Anexo 3 a. Valores del Factor C para diferentes Manejos del Suelo y Cultivos en México a partir de varios autores (Santos, 1995).

Rotación o Cultivo Chapingo, México	Manejo del Suelo y Cultivo	Factor
Maíz	SE (Sin escardas), SR (Sin residuos)	0.47
Maíz	SE, SR	0.47
Maíz	CE (Con escarda), CR (3.0 ton/ha, rastrojo)	0.34
Maíz	CE, CR (6.0 ton/ha de rastrojo)	0.25
Maíz	CE, AO (10.0 ton/ha de estiércol)	0.31
Maíz – Maíz - Maíz	CE, SR	0.298
Maíz	CE, SE de media prod. (44 ton/ha FV)	
Frijol	CE, SR	0.273
Asoc. Maíz - Frijol	CE, SR	0.42
Asoc. Maíz - Frijol	SE, SR	0.30
Asoc. Maíz - Frijol	CE, CR (3.0 ton/ha de rastrojo)	0.31
Asoc. Maíz - Frijol	CE, CR (6.0 ton/ha de rastrojo)	
Asoc. Maíz - Frijol	CE, CR, AO (10.0 ton/ha de estiércol)	0.38
3 ciclos Asoc. Maíz - Frijol	CE, SR	0.240
3 ciclos Asoc. Maíz - Haba	CE, SR	0.187
Cebada	SR	0.17
Cebada	CR (3.0 ton/ha de rastrojo)	0.11
Cebada	CR (6.0 ton/ha de rastrojo)	0.16
Cebada	AO (10.0 ton/ha de estiércol)	0.09
3 ciclos de Cebada	CR	0.067
Cebada	SR alta productividad (34.0 ton/ha FV)	0.075
Cebada	SR media productividad (28.0 ton/ha FV)	
Cebada	SR baja productividad (28.0 ton/ha FV)	0.126
3 ciclos de Trigo	SR	0.135
3 ciclos de Avena	SR	0.124



Anexo 3b. Factor C para Terrenos Forestales no Disturbados (Wischmeier et al., 1978)

Porcentaje del área cubierta por el follaje de los árboles y arbustos	Porcentaje del área cubierta por mantillo de más de 5cm de espesor	Factor C
100 – 75	100 – 90	0.0001 – 0.001
70 – 45	85 – 75	0.002 – 0.004
40 – 20	70 – 40	0.003 – 0.009

Anexo 3c. Factor de Cobertura Vegetal C para Pastizales, Agostaderos y Terrenos en Descanso (Wischmeier et al., 1978)

Cobertura Aérea Tipo y Altura	Porcentaje de Cobertura	Cobertura en contacto con la superficie del suelo Porcentaje de Cobertura						
		Tipo*	0	20	40	60	80	95
Cobertura no apreciable		P	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		M	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Malezas altas o arbustos con altura promedio de caída de gotas de 50 cm.	25	P	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		M	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	P	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		M	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	P	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		M	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Arbustos numerosos con alturas promedio de caída de gotas de 2 m	25	P	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		M	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	P	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		M	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	P	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		M	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Árboles sin arbustos. Promedio de caída de gotas de 4 m	25	P	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		M	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	P	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		M	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	P	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		M	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

* P = Pastos, M = Malezas



Anexo 4. Valores de Numero de Curva

Cobertura/tratamiento	Condición hidrológica	Grupos hidrológicos de suelos			
		A	B	C	D
	Buena	30	55	70	77
Bosques	Regular	36	60	73	79
	Pobre	45	66	77	83
	Buena	30	48	65	73
Arbustos- mezcla arbustos-hierbas-pastos con arbustos como el elemento principal	Regular	35	56	70	77
	Pobre	48	67	77	83
Pastizales- Forraje continuo para pastar	Buena	68	79	86	89
	Mediana	49	69	79	84
Combinación de árboles (plantación)	Buena	32	58	72	79
Combinación de árboles (plantación)	Regular	43	65	76	82
Combinación de árboles (plantación)	Pobre	57	73	82	86
Combinación de árboles (huerta)	Regular	43	65	76	82
Cultivos (en terraza y a contorno)	Regular	62	71	78	81
Cultivos (en contorno)	Pobre	72	81	88	91
Cultivos (en surcos rectilíneos)	Regular	64	72.5	79.5	81.5
Cultivos (en surcos rectilíneos)	Pobre	67	78	85	89
Espacios abiertos (terrenos baldíos > 50 % de pastos)	Regular	49	69	79	84
Espacios abiertos (terrenos baldíos < 50% de pastos)	Pobre	68	79	86	89
Áreas impermeables (techos de casas, calles, estacionamientos, etc.)		98	98	98	98
Suelos desnudo (principalmente cárcavas)		77	86	91	94

Fuente (Manuel M., 2007)



8 REFERENCIAS

Aronoff S (1989) Geographic information systems: a management perspective. WDL Publications, Ottawa

Brady, N. C., R. R. Weil. 2000. Elements of the Nature and Properties of Soils. Upper Saddle River, N. J.: Prentice-Hall.

Burrough, P.A., R. A. McDonnell. 1998. Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press.

Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays (1988), Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill.

CONAFOR (2007) Programa nacional contra la degradación de las tierras (desertificación) y mitigación de los efectos de las sequías 2007-2030. http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/desertificacion/PACDS_2030.

Diakite D.L. (2008) Detección y Análisis del Cambio Climático en México Mediante la Percepción Remota Multitemporal de los Glaciares Tropicales y la Evaluación de su Impacto Potencial sobre los Ecosistemas Circundantes. Caso del Pico de Orizaba y Nevado de Toluca. CEPRAE-UACH.

El-Sheimy N, Valeo C, Habib A (2005) Digital terrain modelling. Acquisition, manipulation, and applications. Artech House Inc., Boston

FAO, 1980. Metodología para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.

Figuerola y Asociados (1991), Manual de Predicción de Pérdida de Suelo por Erosión, Colegio de Posgraduados, centro regional para el estudio de zonas áridas y semiáridas.



IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC II. CD ROM. México.

Inventario Nacional de Suelos (2002). La degradación de los suelos en México. http://app1.sermarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/03_Dimension_ambiental/03_03suelo/III.3.3.2.pdf

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ITT., 2008, Exploring ENVI, Region of Interest and Classification Techniques, pp. 131-132.

Janhe, B., 1991, Digital Image Processing. New York: Springer-Verlag, pp. 219-230

Jensen, J. R., 1996 Introductory Digital Image Processing a remote Sensing Perspective, Prentice Hall Series in Geographic Information Science, pp 197-252.

Jensen, J.R., Toll, D. J., 1982 Detecting Residential Land Use Development at the Urban Fringe, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48: 1039-1046.



Jenson, S. y Domingue, J. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593–1600

Johnston, E. and Rosenfeld, A. (1975). Digital detection of pits, peaks, ridges, and ravines. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 5:472–480

Karl, T.R., Knight, R.W., 1998. Secular trend of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 231– 242.

Kenneth N. Brooks. Peter F. Ffolliott. Hans M. Gregersen. Leonard F. DeBano, *Hydrology and the Managment of watersheds*, second edition 1997, Iowa State University Press/Ames).

Lesser y Asociados, S.A. de C. V.(1986) *Geohidrología del valle de Lerma* DGCOH, -México.

MA Nearing, F.F. Pruski, y M.R. O’Neal, (2004) Expected climatic change impacts on soil erosion rate: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, January 2004 vol. 59 no. 1 43-50.

Manuel M. (2007) *Estimación del escurrimiento superficial en cuencas pobremente aforadas*. México.

Marina F.R. (2007), *Método de abstracción o del Numero de Curva del SCS*, universidad de Piura.



Maass M., j. M. y F. García-Oliva. 199. La investigación sobre la erosión de suelos en México. Un análisis de la literatura existente. Ciencia 41.

Moore ID, Grayson RB, Ladson AR (1991) Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological application. Hydrological Processes 5:3-30

NCDC (National Climatic Data Center) 2002. Climate of 2001—Annual Review. National Oceanic and Atmospheric Administration, Asheville, North Carolina, USA. Available online at <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2001/ann/ann.html>.

O'Callaghan, J. and Mark, D. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28:323–344.

Peucker TK, Douglas DH (1975) Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Computer Graphics and image processing 4:375-387

Ranwez, V. y Soille, P. (2002). Order independent homotopic thinning for binary and grey tone anchored skeletons. Pattern Recognition Letters, 23(6):687–702. doi:10.1016/S0167-8655(01)00146-5

Servicios Geológicos, (1996) S.A. Estimación preliminar de los recursos de agua subterránea en la cuenca alta del Río Lerma hasta el estrechamiento de Atlacomulco., Julio 1996.



Smith, S.J., J.R. Williams, R.G. Menzel, and G.A. Coleman, (1984) Predictions of Sediment Yield from Southern Plains 421 Grasslands with the Modified Universal Soil Loss Equation, *J, Range Mgt.* 37(4), 295-297.

Soille, P. y Gratin, C. (1994). An efficient algorithm for drainage networks extraction on DEMs. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 5(2):181–189. doi:10.1006/jvci.1994.1017

Tarboton, D. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2):309– 319. doi:10.1029/96WR03137

TRAGSA, 1994, Restauracion Hidrologico Forestal de Cuencas y Control de la Erosion

Tribe, A. (1992). Automated recognition of valley lines and drainage networks from digital grid elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139:263–293. doi:10.1016/0022-1694(92)90206-B

Vincent, L. y Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6):583–598. doi:10.1109/34.87344

Williams, J.R. (1975) Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. U.S. Dept. Agric. ARS-S-40. pp 244-252. (1982) Testing the Modified Universal Soil Loss Equation. In: *Proceedings of the Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands*. U.S. Dept. Agric. ARM-W-26, 157-161.



Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. (1978) Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning, U.S. Dept. of Agric. AH-537.

WMO (World Meteorological Organization). 2001. WMO statement on the status of the global climate in 2001. WMO: Geneva, Switzerland. Available online at <http://www.wmo.ch/web/Press/Press670.html>