



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE LA CUENCA
DE SAN CRISTOBAL DE LAS CASAS.**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

MARÍA DE LOURDES FIGUEROA JAUREGUI



23 de julio de 2010

Chapingo, Estado de México.

**EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE LA CUENCA
DE SAN CRISTOBAL DE LAS CASAS.**

Tesis realizada por María de Lourdes Figueroa Jáuregui bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA AGRICOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:

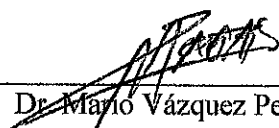

Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

ASESOR:


Dr. Ramón Arteaga Ramírez



ASESOR:


Dr. Mario Vázquez Peña

CONTENIDO

Índice de cuadros	x
Índice de figuras	xx
Índice de Anexos	xxx
Resumen	i
Abstract	i
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPOTESIS	2
2.1 Objetivos	2
2.1.1 Objetivo general	2
2.1.2 Objetivos particulares	2
2.2 Hipótesis	2
III. REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1 La cuenca como unidad de manejo	3
3.2 El manejo integral de cuencas	5
3.3 El primer paso en el manejo de cuencas	8
3.4 El cambio de uso de suelo	9
3.5 Efectos del cambio de uso de suelo	11
3.5.1 Efectos reportados sobre el escurrimiento	11
3.5.2 Efectos reportados sobre la erosión del suelo	12
3.6 La erosión del suelo	13
3.7 El entorno de la cuenca de estudio	16
3.8 La problemática del agua en la cuenca	17
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	21
4.1 Descripción del área de estudio	21
4.1.1 Ubicación	21
4.1.2 Orografía	22

4.1.3 Hidrología.....	23
4.1.4 Suelos	24
4.1.5 Clima	24
4.1.6 Población	25
4.1.7 Características fisiográficas de la cuenca	25
4.2 Materiales	26
4.2.1 Cartografía y datos base utilizados.....	26
4.2.2 Imágenes de satélite.....	27
4.2.3 Software.....	28
4.3 Métodos	28
4.3.1 Pre-tratamiento de imágenes	28
4.3.2 Clasificación de imágenes de satélite	29
4.3.3 Análisis de los cambios	30
4.3.4 Cálculo de erosión hídrica	32
4.3.5 Estimación del escurrimiento superficial	38
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
5.1 Clasificación de uso de suelo.....	41
5.2 Dinámica del cambio de uso de suelo	46
5.2.1 Periodo 1975-1993	46
5.2.2 Periodo 1993-2000	48
5.2.3 Periodo 2000-2009	49
5.2.4 Consideraciones generales.....	50
5.3 Pérdidas de suelo por erosión	51
5.4 Escurrimiento medio anual	66
5.5 Repercusiones de los cambios de uso de suelo	71
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
VII. LITERATURA CITADA.....	74
ANEXOS	78

Índice de cuadros

Cuadro 1. Estaciones climatológicas y datos de precipitación utilizados	26
Cuadro 2. Características de las imágenes de satélite utilizadas	27
Cuadro 3. Valores del factor de erodabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial	34
Cuadro 4. Valores de factor C para bosques	36
Cuadro 5. Valores de factor C para cultivos.....	37
Cuadro 6. Valores de K en función del tipo y uso de suelo	39
Cuadro 7. Matriz de cambio de uso de suelo periodo 1975-1993	47
Cuadro 8. Matriz de cambio de uso de suelo periodo 1993-2000	48
Cuadro 9. Matriz de cambio de uso de suelo periodo 2000-2009	49
Cuadro 10. Clases y superficie de erosión en los años de estudio.....	66
Cuadro 11. Valores de K utilizados para cada año de análisis según el uso de suelo	67
Cuadro 12. Coeficientes de escurrimiento y escurrimiento medio anual	70

Índice de figuras

Figura 1. Etapas del manejo integral de cuencas.....	6
Figura 2. Ubicación regional de la cuenca de San Cristóbal de las Casas	21
Figura 3. Túnel que drena el agua de la cuenca de San Cristóbal de las Casas hacia el río Grijalva	22
Figura 4. El río Amarillo, dentro de la ciudad de San Cristóbal de las Casas.....	23
Figura 5. Porcentaje de área por uso de suelo para cada año de análisis.....	41
Figura 6. Mapa de uso de suelo 1975	42
Figura 7. Mapa de uso de suelo 1993	43
Figura 8. Mapa de uso de suelo 2000	44
Figura 9. Mapa de uso de suelo 2009	45
Figura 10. Zona norte de la ciudad de San Cristóbal de las Casas	51
Figura 11. Mapa raster de factor R.....	52
Figura 12. Mapa raster de factor K.....	53
Figura 13. Mapa raster de factor L	54
Figura 14. Mapa raster de factor S	55
Figura 15. Mapa raster de factor C 1975	57
Figura 16. Mapa raster de factor C 1993	58
Figura 17. Mapa raster de factor C 2000	59
Figura 18. Mapa raster de factor C 2009	60
Figura 19. Mapa de erosión hídrica 1975	61
Figura 20. Mapa de erosión hídrica 1993	62
Figura 21. Mapa de erosión hídrica 2000	63
Figura 22. Mapa de erosión hídrica 2009	64
Figura 23. Porcentaje de área por grado de erosión para cada año de análisis.....	65
Figura 24. Tendencia del escurrimiento superficial a lo largo de los años de estudio	6

Índice de Anexos

Anexo 1. Modelo digital de elevaciones	79
Anexo 2. Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo 1975	80
Anexo 3. Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo 1993	81
Anexo 4. Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo 2000	82
Anexo 5. Ecuaciones que estiman el factor R (EI_{30})	83
Anexo 6. Valores del exponente (m) dependiendo del grado de inclinación	83
Anexo 7. Mapa de polígonos de Thiessen.....	84

RESUMEN

En México, al igual que en muchos países tropicales, se presentan importantes procesos de cambio de la cobertura vegetal del suelo, dentro de los cuales destacan la deforestación para el establecimiento de zonas agrícolas y la urbanización; la superficie forestal en algunas regiones de Chiapas se ha reducido por lo menos a la mitad de lo que era hace 40 años. Este trabajo tiene como objetivo principal analizar los cambios de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas en Chiapas, así como sus efectos sobre la erosión hídrica y el escurrimiento medio anual. Para la identificación de los usos de suelo se hizo una clasificación supervisada de imágenes de satélite Landsat MMS de 1975, Landsat TM de 1993 y 2000, y Spot de 2009 con el procedimiento de máxima verosimilitud. Se estimó la tasa anual de erosión hídrica utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo para cada año de estudio, el volumen de escurrimiento medio anual se calculó de acuerdo al método indirecto de precipitación-escurrimiento que establece la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000. Se identificaron 5 usos en la cuenca: Agricultura de temporal (AT), Bosque de encino (BQ), Bosque de pino (BP), Bosque mesófilo de montaña (BMM) y Zonas urbanas (ZU); el uso predominante en todas las fechas fue la agricultura de temporal (AT), siguiendo el bosque de encino (BQ) y en tercer lugar el bosque de pino (BP); sin embargo, no se observó una tendencia marcada en AT, no así en las unidades BQ y BMM que presentaron una disminución de 1975 a 1993 y 2000, las zonas urbanas muestran un tendencia de crecimiento a lo largo de las 4 fechas de estudio. Los niveles de erosión hídrica se vieron afectados principalmente en el periodo 1975-1993 y 1993-2000 debido a la pérdida de cubierta forestal y aumento de zonas agrícolas y urbanas en este periodo, notándose áreas que pasan de erosión ligera (0-10 ton/ha) a moderada (10-50 ton/ha) y alta (50-200 ton/ha). Los volúmenes de escurrimiento anual tienden a aumentar teniéndose 76.85 millones de m³ en 1975; 78.12 en 1993; 79.48 en 2000 y 82 millones de m³ para 2009.

Palabras clave: Cuenca San Cristóbal de las Casas, cambio de uso de suelo, erosión hídrica, escurrimiento medio anual.

ABSTRACT

In Mexico, as in many tropical countries, important land-use changes are occurring, highlighted by deforestation for the establishment of farming and the development of urban areas; the forest areas in some regions of Chiapas have been reduced by at least half of what they were 40 years ago. The main objective of this study is to analyze the land-use changes in San Cristobal de las Casas basin in Chiapas, as well as their effects on water erosion and average annual runoff. For the identification of land uses, a supervised classification of satellite images was carried out, including those of Landsat MMS from 1975, Landsat TM from 1993 and 2000, and SPOT from 2009, using the procedure of maximum likelihood. The annual rate of erosion was estimated using the universal soil loss equation for each year of study, and the average annual runoff volume was calculated according to the indirect method of rainfall-runoff established by Mexican Official Norm NOM-011-CNA-2000. Five land uses were identified in the watershed: Rainfed agriculture (AT), Oak forest (BQ), Pine (BP), mountain forest (BMM) and Urban zones (ZU); the predominant use on all dates was rainfed agriculture (AT), followed by oak forest (BQ) and pine forest (BP); however, there was not a marked trend in AT, but in BQ and BMM areas there was a reduction from 1975 to 1993 and 2000; urban areas show a growth trend over the 4 dates of study. Water erosion levels were mainly affected in the period 1975-1993 and 1993-2000 due to loss of forest cover and increased agricultural and urban areas during this period, as can be noted in the areas that go from slight erosion (0-10 t / ha) to moderate (10-50 ton / ha) and high (50-200 tons / ha). The annual runoff volumes tend to increase, with values of 76.85 million m³ in 1975, 78.12 in 1993, 79.48 in 2000 and 82 million m³ in 2009.

Keywords: San Cristóbal de las Casas watershed, land use change, water erosion, average annual runoff.

I. INTRODUCCIÓN

El paisaje es un ente dinámico, un conjunto de componentes espaciales del paisaje condicionado por la combinación de factores biofísicos y socioeconómicos que interactúan en el territorio. Los cambios temporales en el paisaje inducidos por el hombre afectan los procesos que ocurren en él; Al influir el ser humano en el ambiente para producir bienes y servicios, el uso del suelo se convierte en la principal causa de pérdida de diversidad biológica, funciones ecológicas y de la alteración del ciclo hidrológico. Los estudios sobre los procesos de cambio de uso del suelo se encuentran en el centro de la atención de la investigación ambiental actual.

Los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo son analizados como parte de los estudios relacionados con la deforestación, para pronosticar erosión de los suelos, estimar reservas de recursos hidrológicos, forestales, pérdida de hábitat, alteraciones en el ciclo hidrológico y hasta cambio climático.

México es considerado como un país megadiverso y presenta grandes extensiones forestales. Sin embargo, la cubierta vegetal sufre cambios muy rápidos. San Cristóbal de Las Casas, situado en las montañas centrales de Chiapas, es un centro cultural y económico de la región. El futuro de los recursos hidráulicos de San Cristóbal está en peligro debido al rápido crecimiento de la población, el cambio del uso del suelo, la sobre-extracción del agua subterránea, una carencia de servicios de saneamiento y tratamiento de aguas residuales, y la degradación de la calidad del agua superficial y subterránea.

II. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Analizar el cambio de uso de suelo y su impacto en los niveles de erosión hídrica y escurrimiento superficial en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

2.1.2 Objetivos particulares

- Identificar el uso de suelo en la cuenca mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite de los años 1975, 1993, 2000 y 2009.
- Cuantificar las pérdidas de suelo por erosión hídrica bajo los escenarios de uso de suelo 1975, 1993, 2000 y 2009.
- Estimar el escurrimiento medio anual en la cuenca para 1975, 1993, 2000 y 2009.

2.2 Hipótesis

Existe efecto del cambio de uso de suelo sobre los niveles de erosión hídrica y sobre los volúmenes de escurrimiento superficial en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 La cuenca como unidad de manejo

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. La definición anterior se refiere a una cuenca superficial (cuenca hidrográfica); asociada a cada una de éstas existe también una cuenca de agua subterránea. Cuando se considera en su conjunto la cuenca hidrográfica y la cuenca de agua subterránea se le conoce con el nombre de cuenca hidrológica (Aparicio, 2001).

La Cuenca Hidrológica es la unidad del territorio, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida. En dicho espacio coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas (CNA, 2004).

Dourojeanni (1998) considera a la cuenca como la unidad natural que sirve como territorio base para los procesos de gestión que tienden al desarrollo sustentable,

representa una fuente natural de captación y concentración de agua superficial y por lo tanto tiene una connotación esencialmente hidrológica.

La cuenca comprende una serie de topoformas, vegetación, suelos y uso de estos suelos; procesos hidrológicos tales como infiltración, escurrimiento, evaporación, que ocurren dentro de una cuenca están íntimamente ligados con las condiciones y características antes mencionadas (Lal, 2000).

El movimiento del agua en una cuenca se ve afectado por características y procesos físicos, químicos y biológicos. El entendimiento de estos procesos es el primer paso esencial en el análisis de las condiciones de la cuenca y de los impactos de las acciones de manejo sobre esta (Heathcote, 1998).

Si bien es cierto que lo que existe sobre la cuenca son el agua, los bosques, los suelos, la biodiversidad y los ecosistemas, pero lo son también la infraestructura y los servicios que el hombre ha creado para satisfacer sus necesidades de trabajo, habitación, transporte, sustento y recreación. Parte fundamental de las cuencas somos los seres humanos y las múltiples y complejas relaciones sociales, económicas y ambientales que establecemos entre nosotros y con el medio natural (Chávez, 2005).

La cuenca, por lo tanto, constituye el marco apropiado para la planificación e implementación medidas para prevenir y corregir los impactos ambientales producto del uso y manejo de los recursos naturales que en ella interaccionan.

3.2 El manejo integral de cuencas

La cuenca es un sistema complejo que para ser medianamente comprendido en su funcionamiento debe ser dividido en sus partes, componentes y procesos, tanto naturales como contruidos. El manejo o gestión integral de la cuenca es el manejo ordenado y coherente de todo lo que existe en dicho territorio (Chávez, 2005).

En México, el concepto y la aplicación del manejo de cuencas se han ido consolidando con el fortalecimiento profesional mediante maestrías y múltiples proyectos desarrollados en cuencas por organismos no gubernamentales. A medida que se va ahondando en la experiencia del manejo de cuencas, también se van puntualizando sus diferencias en relación con otro tipo de gestión ambiental (Cotler, 2007)

El manejo integral de cuencas es un mecanismo que nos permite ordenar y guiar los patrones de uso de suelo y uso de los recursos naturales de tal manera que la sociedad pueda satisfacer su demanda de recursos sin detrimento de la calidad ambiental. Una de las partes importantes del manejo integral de cuencas es que considera la relación entre los diferentes recursos naturales y sobre todo, hace la liga entre las zonas altas y las zonas bajas considerando los efectos a distancia. La principal característica del Manejo Integral de Cuencas es que su proceso es integrativo, adaptativo y participativo (Cruz, 2003).

Las etapas de Manejo Integral de Cuencas (Figura 1) se denominan “Fases del manejo integrado”. La primera es la fase de caracterización donde se definen cuáles son las

metas y objetivos que queremos alcanzar. Se empieza caracterizando la cuenca, se hace un inventario de recursos y una evaluación de ellos y finalmente se determina cuáles son los problemas y las oportunidades que tenemos para solucionarlos. Se desarrolla así mismo una evaluación de cuáles son las posibles alternativas de manejo de la cuenca, y de aquí se pasa a la fase de soluciones. La fase de soluciones es donde se seleccionan entre todas aquellas diferentes prácticas que están presentes, aquellas que se cree pueden solucionar el problema. Una vez seleccionados se pasa a la construcción del plan de manejo en donde se ponen en práctica las actividades y el proceso de monitoreo.

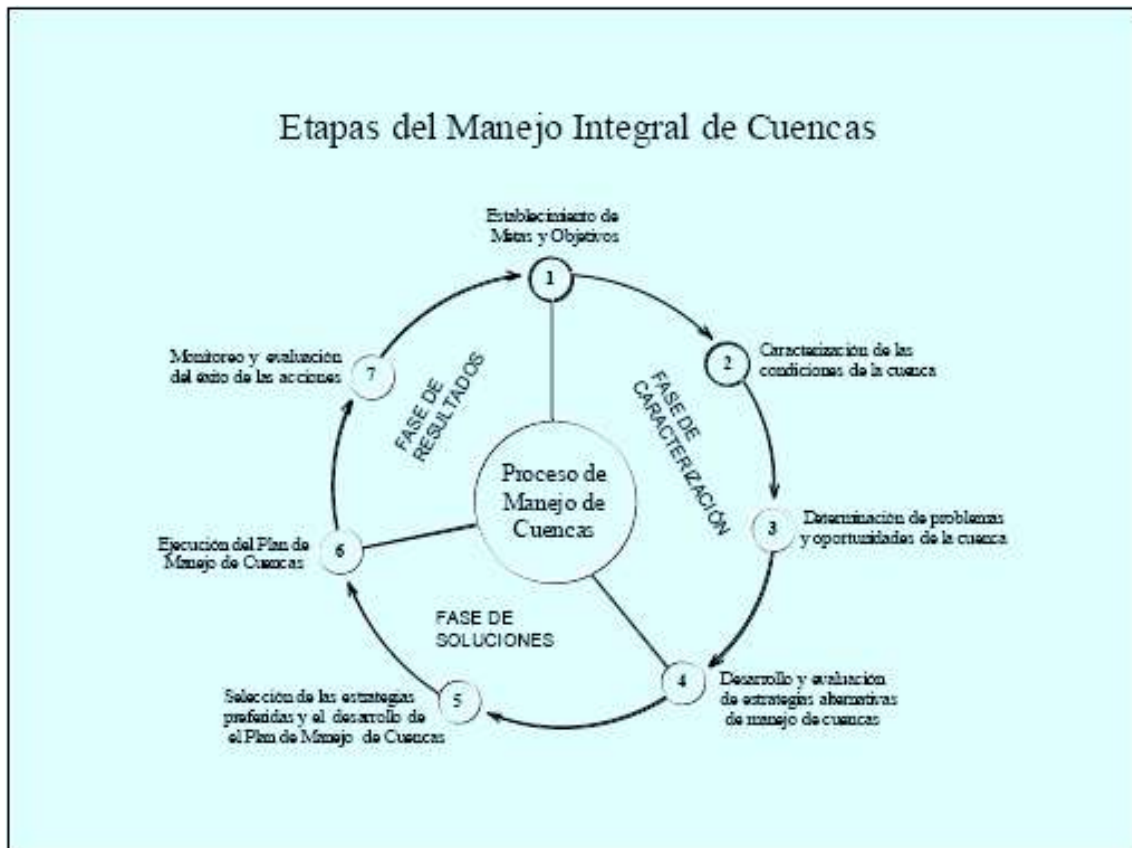


Figura 1. Etapas del manejo integral de cuencas (Fuente: Cruz, 2003).

El manejo adecuado de una cuenca depende del entendimiento humano de sus componentes e interacciones. El proceso de toma de decisiones en el manejo integral de cuencas incluye cinco pasos: 1) Recolección de información, 2) Identificación de problemas, 3) Alternativas de prevención, control, manejo y restauración, 4) Establecimiento de prioridades y, 5) Implementación, definición de roles y responsabilidades (Reimold, 1998).

El manejo de cuencas puede entenderse como un proceso de planeación, implementación y evaluación de acciones y medidas dirigidas al control de las externalidades negativas, lo cual puede obtenerse mediante el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales con fines productivos, la conservación de los ecosistemas y el control y prevención de los procesos de degradación ambiental en el contexto de una cuenca hidrográfica (Cotler, 2007).

Por su parte, Heathcote (1998) establece que una buena planeación y manejo integral de cuenca debe considerar las siguientes etapas:

Desarrollar una comprensión de los componentes y procesos de la cuenca, usos del agua, usuarios del agua y sus necesidades,

Identificar y priorizar los problemas a ser solucionados o beneficios a recuperar,

Establecer metas claras y específicas,

Identificar lo que restringe la planeación e incluir criterios de decisión para elegir algún plan específico,

Desarrollar varias alternativas de manejo y establecer métodos de comparación,

Eliminar alternativas que no son factibles debido a tiempo, costos, espacios u otras restricciones,

Determinar los impactos económicos e implicaciones legales de las varias alternativas,

Una vez que quienes toman las decisiones, eligen una estrategia de manejo, desarrollar de manera clara y amplia los procedimientos de implementación.

3.3 El primer paso en el manejo de cuencas

Tal como lo menciona Heathcote (1998), el primer paso esencial en el manejo de cuencas es el entendimiento de los componentes, procesos e interrelaciones presentes en la cuenca.

Este primer paso permite ordenar y guiar los patrones de uso de los recursos naturales y en particular de uso de suelo, ya que este tiene gran influencia sobre el proceso de infiltración y distribución del agua en el suelo, y sobre los niveles de evaporación afectados por el porcentaje de cobertura vegetal sobre el suelo (De, *et al*; 2003).

Desde el punto de vista de varios investigadores el producto más importante en la cuenca es el agua, y para un manejo eficiente del agua es necesario estudiar y pronosticar como los diferentes usos de la tierra afectan la disponibilidad de este recurso (Jewit *et al.*, 2004).

3.4 El cambio de uso del suelo

Los estudios de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a los siguientes aspectos: (a) Explorar los mecanismos que propician los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto; (b) Proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y; (c) Evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo.

Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros simples, incluyendo la extensión de las actuales áreas urbanas, las principales vías de transporte, la distancia a los mercados de trabajo, bienes e insumos, las condiciones topográficas y la existencia de tierras en situación especial (Henríquez, *et al*; 2006).

Los análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo permiten entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad, y en general, pérdida del capital natural y cultural. A partir de éstas, se deducen escenarios sobre la pérdida del capital natural o biodiversidad, se generan modelos sobre los posibles efectos del cambio global y se fundamentan las estrategias de planificación de uso del suelo (Mas et al, 2009).

La información cartográfica facilita el proceso de análisis del cambio de uso / cobertura del suelo, crucial para entender los procesos dinámicos de la cobertura del suelo; la

pérdida de la productividad y biodiversidad; vulnerabilidad a erosión; deforestación; fragmentación, entre otros (Velázquez, et al; 2002).

El análisis cartográfico de estos cambios se obtiene a través de la comparación de mapas de diferentes fechas. Esta comparación cartográfica es una operación sencilla desde la plataforma de un sistema de información geográfica (SIG): al sobreponer dos mapas de diferentes fechas se obtienen los tipos de cambio, su superficie y localización (Mas et al, 2009).

Los mapas de uso de suelo se pueden obtener mediante clasificación de imágenes de satélite. La clasificación de imágenes se refiere a la interpretación asistida por computadora de imágenes de sensores remotos. Existen dos enfoques generales en la clasificación de imágenes: supervisada y no supervisada. En la primera el usuario es el encargado de escoger manualmente el conjunto de muestras inicial, para ello es necesario un conocimiento previo por parte del usuario del área objeto de estudio; en la segunda la máquina es la encargada de escoger el conjunto de muestras de forma que el usuario solamente tiene que indicar el número de clases que pretende distinguir en la clasificación, y es la computadora la encargada de generar grupos de cluster homogéneos, sin necesidad de un conocimiento previo sobre las diferentes clases que se desea generar. Luego, en un paso posterior, el analista provee interpretaciones de esos tipos de cubierta (Eastman, 2006; Ayala y Meneti, 2002).

3.5 Efectos del cambio de uso del suelo

Los cambios de uso de suelo que afectan en mayor grado las condiciones hidrológicas son la deforestación, la intensificación de la agricultura, la construcción de caminos y/o carreteras y la urbanización.

En México, al igual que en muchos países tropicales, se presentan importantes procesos de cambio de la cobertura vegetal del suelo, dentro de los cuales destacan la deforestación para el establecimiento de zonas agrícolas y la urbanización (Mas et al, 2009).

La media mundial indica que para la presente década, México debería tener alrededor de 0.7 ha de cubierta arbolada per cápita, sin embargo, los datos actuales indican que en México se cuenta solo con 0.5 ha per cápita de cubierta forestal, y la predicción para el año 2025 es de 0.3 ha per cápita (Velázquez et al, 2002). Diferentes trabajos sostienen que la tasa de deforestación en México oscila entre 1 y 10% según la región de estudio.

3.5.1 Efectos reportados sobre el escurrimiento

De acuerdo con Tollan (2002), los cambios en el uso del suelo pueden resultar en un aumento de la frecuencia y severidad de las inundaciones, debido a mecanismos que incluyen reducción de la capacidad de infiltración del suelo, pérdida de la estructura del mismo, lo cual produce menor porosidad y en consecuencia menor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Estos efectos son más pronunciados en pequeña

escala y para magnitudes frecuentes de inundaciones, sin embargo, incluso en las grandes cuencas e inundaciones menos frecuentes, el cambio del uso del suelo se encuentra a menudo en tela de juicio como causa de estas.

Mustafa et al (2005) encontraron que para una zona en la que las áreas forestales disminuyeron en un 11% y las áreas urbanas aumentaron casi tres veces, el caudal máximo de escurrimiento aumento en 11% y el tiempo al pico paso de 37.5 horas a 35 horas. Esto conduce a la conclusión de que el cambio de uso de suelo observado resulta en disminución de la tasa de infiltración en el suelo y, en consecuencia aumento de la cantidad y la velocidad de escurrimiento.

Sin embargo, Miranda et al. (2009) no encontraron diferencias significativas en el gasto máximo al pasar de uso forestal a pastizales, dado que los escurrimientos se calcularon con el método de numero de curva que registran números N similares en estas coberturas.

3.5.2 Efectos reportados sobre erosión del suelo

Las alteraciones hechas por el hombre sobre la cobertura vegetal no solo provocan aumento en los volúmenes escurridos, sino que además afectan la calidad de estos escurrimientos al aumentar la cantidad de sólidos disueltos que son arrastrados en este proceso (Choi, 2007).

Cotler y Ortega (2006) compararon dos unidades de suelo con diferente cobertura (correspondientes a un bosque tropical sin perturbar, y bosque deforestado para establecimiento de cultivo), y evaluaron los efectos de esta sobre las propiedades físicas del suelo, como parámetro para estimación de erosión hídrica en dichas unidades. Encontrando, entre otras cosas, que el cambio de uso provocó la pérdida de agregados, y mayor susceptibilidad de transporte de las partículas.

Návar y Synnott (2000) establecieron 12 lotes experimentales en vertisoles con cuatro usos: 1) agrícolas, 2) pastizales, 3) matorrales y 4) plantaciones forestales; con tres repeticiones. Los volúmenes de escorrentía superficial y cantidades de suelo erosionado se midieron durante 1985. Los suelos agrícolas produjeron 10 y 40 veces más volúmenes de escorrentía superficial y cantidades de erosión, respectivamente, que los suelos con los otros usos descritos.

3.6 La erosión del suelo

La erosión del suelo puede ser definida como el proceso de desprendimiento, transporte de partículas de suelo por acción del viento y del agua. El clima, la topografía, las características propias del suelo, así como el uso del mismo tienen efecto directo sobre la erosión (Brooks et al, 1992).

La erosión hídrica es un proceso natural e inevitable que puede llegar a ser un serio problema ambiental y económico para un país cuando es afectado y acelerado por las actividades humanas. En general, la erosión aumenta con el escurrimiento, pendiente y

clases de uso del suelo con doseles abiertos. López et al (1998) encontraron que la tasa media de erosión del suelo en polígonos de diferentes usos del suelo disminuyó en la siguiente distribución: suelo desnudo, cubierta forestal con dosel abierto, agricultura, pastizales, zona urbana poco densa, bosque cerrado, zona urbana muy densa.

Según Schwab et al (1990), los factores que determinan la erosión hídrica son el clima debido a que los factores climáticos que intervienen en la erosión son la precipitación, la temperatura, el viento, la humedad y la radiación solar. La temperatura y el viento son notables por sus efectos sobre la evaporación y la transpiración; el viento cambia también la velocidad de las gotas de agua y el ángulo de impacto.

El suelo es otro factor debido a que sus propiedades físicas afectan la capacidad de infiltración y la distancia a la que puede dispersarse. Las propiedades que determinan la erosión son: estructura del suelo, la textura, la materia orgánica, el contenido de humedad y la densidad.

El siguiente factor es la cubierta vegetal ya que la remoción o destrucción de la vegetación que cubre el suelo, causada por los aclareos, la tala de árboles, la introducción de cultivos o el sobre pastoreo; provocan desequilibrio y deja el suelo expuesto a la acción de procesos de degradación y desertificación. Las funciones principales que realiza la vegetación para reducir la fuerza erosiva son: La cubierta vegetal absorbe la energía de las gotas de lluvia interceptándolas al caer, reduciendo de esta manera el escurrimiento, disminuye la velocidad del agua sobre la superficie y restringe el movimiento del suelo al mejorar la cohesión y la porosidad.

Las características topográficas que influyen en la erosión son el grado de las pendientes, la longitud de la misma y el tamaño y forma de la cuenca. En pendientes muy fuertes o inclinadas la velocidad alta produce una erosión severa por la abrasión y el desplazamiento de los sedimentos.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) es probablemente la formula empírica más conocida para predecir y estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica (Brath et al, 2002), agrupa numerosas interrelaciones de parámetros físicos y de manejo que influyen en la tasa de erosión para un sitio específico.

La EUPS se describe con la siguiente ecuación:

$$A = RKLSCP$$

Donde:

A = Pérdida anual de suelo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}$)

R = Factor de erosividad de la lluvia ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)

K = Factor de erodabilidad del suelo ($t \text{ ha hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)

L = Factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S = Factor de grado de la pendiente (adimensional)

C = Factor de cobertura vegetal (adimensional)

P = Factor de las prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional)

Esta expresión y la obtención de los factores que la integran se analizarán más detenidamente en la sección de materiales y métodos.

El problema de erosión en el mundo es grave ya que aproximadamente el 80% de la superficie del planeta presenta este fenómeno en algún grado; y en México se estima que hasta un 98% de la superficie territorial está afectada en distintos niveles de erosión (Alvarado et al, 2007).

3.7 El entorno de la cuenca de estudio

Los ecosistemas terrestres de los Altos de Chiapas, corresponden casi completamente a diferentes tipos de bosques. De manera similar a lo que ha ocurrido con los bosques de otras regiones tropicales, la superficie forestal en algunas regiones de Chiapas se ha reducido por lo menos a la mitad de lo que era hace 40 años.

La causa principal de la desaparición de los bosques y de la degradación de los fragmentos forestales remanentes ha sido el cambio de uso del suelo para establecer diversos tipos de unidades de producción agropecuaria y su interacción con fenómenos naturales y económicos de escala regional o global como los incendios, los huracanes de alta intensidad, la migración y el empobrecimiento, además de la reubicación de grupos indígenas expulsados por supuestos motivos religiosos, o por la invasión (“recuperación”) de algunas propiedades privadas en los años inmediatamente siguientes al levantamiento zapatista de 1994.

A su vez, la expansión de las áreas dedicadas a la agricultura refleja un crecimiento de la población, que ha rebasado los límites de la sustentabilidad y del equilibrio ecológico del ecosistema (Gonzalez-Espinosa et al, 2009).

El estado de Chiapas se caracteriza por un uso del agua predominantemente agrícola (1,351 millones de metros cúbicos en el 2006), con un historial de inundaciones principalmente en las partes bajas de las cuencas, problemas de organización, rezago de agua potable y saneamiento en zonas urbanas y aun más en zonas rurales, además de problemas de calidad del agua derivada de las actividades agrícolas y de industrias de alimentos y bebidas, como es el caso de la Coca-Cola en la ciudad de san Cristóbal de las Casas (Kauffer, 2005; CNA, 2007).

La falta de infraestructura y de programas hidráulicos completa el panorama situando al estado de Chiapas como uno de los estados con mayores rezagos en cuanto a suministro y distribución de agua potable (Aquino Barrientos, El Universal, 29 de abril de 2007).

3.8 La problemática del agua en la cuenca

La cuenca, y en particular la ciudad de San Cristóbal de las Casas se suma al panorama estatal de disponibilidad de agua, como consecuencia de las deforestaciones en las partes altas y de la extracción de fuentes naturales de infiltración (gravas y arenas) para comercialización, que disminuyen la capacidad de producción de agua de los manantiales, que es de donde se abastece principalmente la población, aunado a esto los asentamientos humanos en zonas de humedales tal es el caso de los humedales “La

Kisst” y “María Eugenia”, que a pesar de haber sido declarados áreas naturales protegidas sujetas a conservación ecológica (Henríquez, 2008), siguen siendo invadidas por la población para construcción de viviendas y comercios.

Dos aspectos principales a considerar en la problemática del agua en la cuenca son las inundaciones presentes en la ciudad prácticamente desde su fundación hasta 1973, año en el que se concluyó un túnel para drenado de la ciudad. Sin embargo, al encontrarse los terrenos libres de inundaciones se favoreció el crecimiento de la mancha urbana; una consecuencia colateral a la construcción del túnel fue que las aguas se canalizaron justamente por un solo acueducto, pero van contaminadas por el drenaje que descarga la ciudad y son utilizadas por un nuevo usuario a la salida: el productor de hortalizas con aguas residuales. Otro aspecto es la insuficiente infraestructura de agua para suministro de la población, así como la administración local regida por cultos creencias que existe aun en algunos barrios de la ciudad (García, 2005).

Un alta demanda de agua potable y servicios de drenaje debido no solo al incremento del número de habitantes dentro de la ciudad, si no a una población flotante adicional integrada por el turismo hospedado en los hoteles y las personas que vienen de poblaciones de los alrededores a proporcionar servicios turísticos y venta de productos artesanales durante el día.

Un ejemplo del crecimiento acelerado de la población es el barrio de “La Hormiga” que se ubica al norte de la ciudad, en el que se detonó el crecimiento después del conflicto zapatista, ocasionando la deforestación de reservas ecológicas para el asentamiento

humano y demandando mayor cantidad de agua potable y servicios en la ciudad. Se estima que para 2020 habrá en esta localidad unos 350 mil habitantes, es decir, en poco más de 10 años se duplicará la población que actualmente es de alrededor de 170 mil residentes (Martínez, 2008).

Pero además de la población, existe otro demandante de agua potable en la ciudad de San Cristóbal: la empresa Coca-Cola que ha venido aumentando su producción exponencialmente desde su establecimiento, y por tanto ha aumentado las extracciones de agua de los pozos que tiene concesionados.

La Coca Cola se instaló en la ciudad de San Cristóbal desde 1980. Empezó con una producción promedio de 5,000 cajas de refresco diarias, para el año 2004 la producción de la empresa aumentó a 26,666 cajas, un promedio de 120,000 litros de refresco al día, y si consideramos que se utiliza 5.47 litros de agua para producir un litro de refresco, se tienen alrededor de 656,400 litros de agua diarios para la industria refresquera. En 2000, cambio el esquema de envasado por botellas de “pet”, lo cual trajo consigo varios cambios que impactaron en el ambiente.

La empresa solicitó la ampliación en la extracción de agua y permiso para la ampliación de la planta; permisos que fueron otorgados a pesar de la inconformidad de los habitantes de las comunidades que manifestaron que sus manantiales de uso doméstico se estaban viendo afectados desde que la empresa se instaló.

Otro impacto fue el considerable incremento basura generada: toneladas de botellas que no son reutilizadas o recicladas y son depositadas en ríos, arroyos y basureros. Y aunque la empresa tiene una planta de tratamiento de aguas industriales, esta no es utilizada después de tratada y se vierte a la red de drenaje, por lo que las descargas se contaminan nuevamente con el drenaje de la ciudad (García, 2005).

Como complemento a este panorama tan grave, la contaminación de los ríos está causando la mutación y muerte de especies, como es el caso del Popoyote, pez endémico de los humedales de la región, que está en peligro de extinción; así como filtraciones a los mantos freáticos que conlleva a una contaminación directa del agua utilizada para consumo humano (Herrera, 2009b).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

4.1.1 Ubicación

La cuenca de San Cristóbal de las Casas en el Estado de Chiapas se encuentra entre las coordenadas 16°37'12" y 16°49'48" de latitud norte y 92°45'00" y 92°28'48" de longitud oeste; está ubicada dentro de la Región Hidrológica no. 30 Grijalva-Usumacinta (SRH, 1971). Comprende una parte de los municipios de San Cristóbal de las Casas, Chamula, y en menor medida Huixtán, Tenejapa y Zinacantan, y tiene un área de 287.42 km².



Figura 2. Ubicación regional de la cuenca San Cristóbal de las Casas.

Es una cuenca hidrográfica que de manera natural es endorreica, sin embargo, debido al historial de inundaciones en la ciudad, en 1974 se construyó un túnel (figura 3) de aproximadamente 4.3 kilómetros de longitud para drenar el agua de la cuenca hacia el río Grijalva (Garcia, 2005).



Figura 3. Túnel que drena el agua de la cuenca de San Cristóbal de las Casas hacia el río Grijalva.

4.1.2 Orografía

La cuenca pertenece a la provincia fisiografía Sierra de Chiapas y Guatemala, y dentro de esta, a la subprovincia Altos de Chiapas, caracterizada por la presencia de laderas tendidas, lomeríos con mesetas y valles intermontanos. La ciudad de San Cristóbal se sitúa en la porción central del sur de la cuenca. El área urbana ocupa las porciones más bajas de la cuenca, con elevaciones de 2,180 a 2,200 metros. Las paredes del valle se elevan abruptamente alcanzando elevaciones de 2,500 metros al sur y oeste. Las paredes del valle se levantan más gradualmente al noroeste y al este, pero alcanzan

aproximadamente la misma elevación. La máxima elevación ocurre en el norte de la cuenca y es de aproximadamente 2,800 metros.

4.1.3 Hidrología

Las corrientes principales son el río Fogótico y el río Amarillo, y corrientes intermitentes como el arroyo Chamula y San Felipe. El río Amarillo (figura 4) nace en las inmediaciones de la ciudad de San Cristóbal de las Casas, dentro de la cuenca cerrada que forma este valle, baja de la barranca de Cuxtital, corre hacia el este y luego se dirige hacia el sur bordeando la ciudad, recibe las aportaciones por su margen derecha del arroyo Chamula, aguas arriba del puente Saavedra, y finalmente confluye a unos 20 m aguas arriba del puente Morelos con el río Fogotico, corriente principal de la cuenca cerrada, el cual finalmente se pierde en los sumideros de Santa Rosa (SRH, 1971).



Figura 4. El río Amarillo, dentro de la ciudad de San Cristóbal de las Casas.

4.1.4 Suelos

Los suelos predominantes son Acrisol, Luvisol y Rendzina de acuerdo a la clasificación FAO/UNESCO (INEGI, 2000) con texturas predominantemente medias; la presencia de Luvisoles sobre todo en las partes altas, se justifica por las altas precipitaciones que se presentan en la cuenca. La profundidad de los suelos superficiales dentro de la cuenca es altamente variable, dependiendo de su localización y pendiente. La región plana central tiene suelos más profundos, disminuyendo en profundidad al aumentar la pendiente. En las colinas se observa la exposición de formaciones de roca subyacentes. La profundidad del suelo se observa fácilmente en un número de localizaciones a través de la cuenca en donde los caminos han cortado las laderas (Bencala *et al*, 2006).

4.1.5 Clima

El clima de San Cristóbal es característico de los bosques de lluvia subtropicales, con una temperatura máxima anual promedio de 23 °C. A través del año, el máximo mensual promedio fluctúa entre 20 y 25 °C, y el rango de temperaturas mínima mensual está entre 3 y 11 °C.

La región hidrológica de la frontera sur es en gran medida la más húmeda de México (Bencala *et al*, 2006), recibiendo más de 2000 milímetros de precipitación por año. La cuenca de San Cristóbal, situada en las montañas centrales más secas, recibe un promedio anual de 1,400 milímetros.

4.1.6 Población

Dentro de la cuenca se encuentran 2 localidades del municipio de Tenejapa, 2 del municipio de Huixtán, 42 de Chamula y 41 del municipio de San Cristóbal de las Casas, entre los que esta la ciudad de San Cristóbal de las Casas que es la de mayor número de habitantes.

Según datos obtenidos del II Censo Nacional de Población y Vivienda del 2005, en toda la cuenca existe una población total de 180,756 habitantes, concentrándose el 78% en la ciudad de San Cristóbal de las Casas, mientras que el 2% restante reside en localidades rurales, en su mayoría indígenas, principalmente chamulas.

4.1.7 Características fisiográficas de la cuenca

La cuenca tiene un área de 287. 42 km², va de los 2860 msnm en la parte más alta hasta los 2120 msnm en la parte más baja donde se ubica la ciudad de San Cristóbal de las Casas, con una pendiente media de 6.24%. Las corrientes principales son el río Amarillo y el río Fogótico, este último es el de mayor longitud con 26.26 km, se origina alrededor de los 2320 msnm y baja hasta los 2120 msnm en donde se junta con el río Amarillo, la pendiente media del cauce es de 0.76 %.

4.2 Materiales

4.2.1 Cartografía y datos base utilizados

Con el fin de ubicar y delimitar la cuenca de San Cristóbal de las Casas, así como identificar los tipos de suelo presentes se utilizó material cartográfico digital:

Modelo digital de elevaciones 1:50 000 con resolución de 30 m de INEGI (Anexo 1).

Carta edafológica, escala 1:250,000.

Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo de los años 1975, 1993 y 2000 proporcionados por ECOSUR (Anexos 2 a 4).

Así como datos de precipitación de estaciones ubicadas dentro de la cuenca obtenidas del extractor rápido de información climatológica (ERIC III).

Cuadro 1. Estaciones climatológicas y datos de precipitación utilizados (Promedio de 1956 a 2004).

Estación	Clave	Precipitación media anual (mm)
Chamula, Chamula	7030	1260.9
La cabaña, San Cristóbal de las Casas	7087	1079.3
Los arcos, San Cristóbal de las Casas	7109	1147.1
Las ollas, San Juan Chamula	7325	1688.1

Fuente: ERIC III

4.2.2 Imágenes de satélite

Se utilizaron imágenes de satélite de cuatro fechas: 1975, 1993, 2000 y 2009, con las siguientes características:

Cuadro 2. Características de las imágenes de satélite utilizadas.

	1975	1993	2000	2009
Satélite	Landsat 2	Landsat 5	Landsat 7	Spot 5
Sensor	MMS*	TM*	ETM*	
Resolución espacial	60 m	30 m	30 m	10 m
Numero de bandas	4	7	6	4
Fecha de obtención	Diciembre de 1975	Abril de 1993	Abril de 2000	Diciembre de 2009
Path-Row o K/J	23-48	21-48 22-48	21-48 22-48	603-316 603-317

*MMS= Multispectral Scanner. TM= Thematic Mapper. ETM= Enhanced Thematic Mapper

Las imágenes Landsat fueron obtenidas de U. S. Geological Survey <http://glovis.usgs.gov/>¹ y las Spot fueron proporcionadas por el por la Secretaría de Marina a través de un gestor de la Universidad Autónoma Chapingo.

¹ Consultada el 27 de mayo de 2009

4.2.3 Software

El software, así como los módulos y herramientas utilizados son:

Idrisi versión Andes	Land Change Modeler (Modelador de cambios en el terreno)
Arc View versión 3.2	Geoprocessing
	Thiessen Polygons v 2.6
	Spatial Analyst
	SEDEOT (Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio)

4.3 Métodos

4.3.1 Pre-tratamiento de imágenes

Se realizaron algunos tratamientos para obtener imágenes manejables y poder visualizar mejor las clases existentes.

Cuando fueron requeridas dos imágenes para cubrir el área de la cuenca en un mismo año, se realizó un mosaico con estas para formar una sola, posteriormente se extrajo la zona de estudio.

Dado que las imágenes obtenidas no tienen la misma resolución y no es posible realizar operaciones entre estas, fue necesario hacer un realce para alterar la resolución por acumulación o duplicación de píxeles estandarizando las 4 imágenes a un tamaño de píxel de 30 m para poder hacer comparaciones entre ellas.

Otro tratamiento realizado para mejor visualización fue la composición de color utilizando las bandas 2, 3 y 4 de cada imagen para resaltar los atributos de vegetación de interés.

4.3.2 Clasificación de las imágenes de satélite

Para la obtención de los usos de suelo se hizo una clasificación supervisada de las imágenes de satélite mediante el software Idrisi versión Andes.

El primer paso en la clasificación supervisada fue identificar ejemplos de las clases de información de interés (es decir, tipos de cubierta terrestre) en la imagen, estos se llaman campos de entrenamiento, se utilizaron los mapas creados por el Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística (LAIGE) del Colegio de la Frontera Sur para 1975, 1993 y 2000, con sistema de referencia UTM 15n datum WGS84; para identificación de usos y creación de campos de entrenamiento para la clasificación de 2009 se hizo un recorrido de campo en la cuenca.

Fue preciso digitalizar los campos de entrenamiento que definen numéricamente a cada una de las categorías para posteriormente obtener los valores estadísticos de los píxeles incluidos en estos campos y comparar estos valores entre varias categorías.

La fase de asignación de valores a una categoría se realiza mediante múltiples tipos de clasificadores; los más usuales en la clasificación supervisada son: paralelepípedos (PIPED), máxima verosimilitud (MAXLIKE) y mínima distancia (MINDIST) (Eastman, 2006).

Se utilizó el clasificador rígido de máxima verosimilitud; este método considera que los niveles digitales (ND) de cada categoría se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. De este modo, se puede calcular la probabilidad de que un determinado píxel pertenezca a una categoría; el cálculo se realiza para todas las categorías definidas y el píxel se clasifica en la clase a la cual tenga más probabilidad de pertenecer. Este clasificador es el más complejo y, por lo tanto, el que mayor volumen de cálculo requiere, pero es el más robusto y fiable ya que se ajusta fielmente a la distribución original de los datos.

4.3.3 Análisis de los cambios

Una vez obtenidos los mapas de uso de suelo para cada año, el análisis de los cambios se obtuvo a través del módulo Land Change Modeler for Ecological Sustainability (Modelador de Cambios en el Terreno para el Sustento Ecológico), es un software integrado a Idrisi que analiza los cambios en la cubierta de terreno, proyecta su curso en

el futuro y evalúa sus implicaciones en el cambio del hábitat y la biodiversidad; brinda un grupo de herramientas para el análisis rápido de cambios y permite generar evaluaciones de las ganancias y las pérdidas, del cambio neto, la persistencia y las transiciones específicas tanto en forma de mapa como de gráfico, utilizando como insumos dos mapas de uso de suelo de diferentes épocas previamente generados.

Se calcularon además, para los periodos 1975-1993; 1993-2000 y 2000-2009; 1) la tasa de cambio que revela el cambio porcentual para cada categoría; 2) la matriz de cambio que resulta de la tabulación cruzada de las clases de uso de suelo, la diagonal de la matriz indica la superficie que se mantuvo en la misma categoría para ambas fechas mientras que los demás valores representan la superficie que si cambió; 3) la tasa de deforestación para cada periodo así como para el periodo completo 1975-2009; este indicador muestra el porcentaje anual de cambio de una cobertura leñosa a otra diferente: agricultura, pastizal, suelo desnudo, etc.

Se utilizó la fórmula propuesta por Palacio *et al.* (2004):

$$Td = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

Donde:

Td = tasa de deforestación anual en porcentaje.

S₂ = área arbolada en el año final (ha).

S₁ = área arbolada en el año inicial (ha).

n = número de años del periodo de análisis.

4.3.4 Cálculo de erosión hídrica

El modelo utilizado para el cálculo de la erosión hídrica fue la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS) o USLE por sus siglas en inglés (Wischmeier y Smith, 1978). La EUPS, es un modelo matemático diseñado para estimar la pérdida de suelo promedio bajo condiciones específicas. Su expresión general es la siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (2)$$

Donde:

A= pérdida anual de suelo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}$).

R= factor de erosividad de la lluvia ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$).

K= factor de erodabilidad del suelo ($t \text{ ha hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$).

L= factor de longitud de la pendiente (adimensional).

S= factor de grado de la pendiente (adimensional).

C= factor de manejo de cultivos (adimensional).

P= factor de las prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional).

Para obtener el factor R se ubicó la cuenca en el mapa de regiones de erosividad de la lluvia en México elaborado por Cortés (1991), el cual se desarrolló con datos de 53 estaciones meteorológicas identificando 14 regiones diferentes para la República Mexicana donde estimó la erosividad de la lluvia (Anexo 5); además, se generaron las ecuaciones que permiten la estimación del factor R de la EUPS en función de la lluvia anual para cada una de las regiones.

Sin embargo, Figueroa et al. (1991) realizaron modificaciones a las ecuaciones de Cortés (1991) para ajustar los límites de la precipitación de una zona mediante el patrón de distribución y tipos de eventos similares, encontrándose disminución de los valores en este índice cuando aumentaba la precipitación.

La zona de estudio se encuentra en la región 12, por lo que se utilizó la ecuación modificada para dicha región:

$$Y = 0.71508(P)^{1.30751} \quad (3)$$

Donde:

Y= erosividad de la lluvia (MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ año).

P= precipitación anual (mm).

Para calcular el factor K se utilizó la metodología propuesta por FAO (1980). La FAO propone calcular el factor K a partir de la textura superficial (utilizando tres grupos texturales) y la unidad de suelo a que pertenece, según la clasificación FAO/UNESCO posteriormente se utiliza un cuadro de doble entrada (cuadro 3) y se ubica el tipo de suelo y la textura correspondiente a dicha unidad, obteniendo de esta manera el valor de K de cada una de las unidades.

Cuadro 3. Valores del factor de erodabilidad (K) en función de la unidad de suelo y su textura superficial.

Orden	Textura			Orden	Textura		
	G	M	F		G	M	F
Af	0.026	0.040	0.013	lo	0.026	0.040	0.013
Ag	0.013	0.020	0.007	lp	0.053	0.079	0.026
Ah	0.026	0.030	0.013	lv	0.053	0.079	0.026
Ao	0.013	0.020	0.007	M(a, g)	0.026	0.040	0.013
Ap	0.026	0.040	0.013	N(d, e, b)	0.013	0.020	0.007
B	0.053	0.079	0.026	O(d, e, x)	0.013	0.020	0.007
Bc	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Bf	0.013	0.020	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bh	0.013	0.020	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bk	0.026	0.040	0.013	Pp	0.053	0.079	0.026
Bv	0.053	0.079	0.026	Q(a, c, f, l)	0.013	0.020	0.007
Bx	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
C(g, h, b, l)	0.013	0.020	0.007	Re	0.026	0.040	0.013
D(d, e, g)	0.053	0.079	0.026	Rc	0.013	0.020	0.007
E	0.013	0.020	0.007	Rd	0.026	0.040	0.013
F(a, b, o, p, r)	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	S	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.020	0.007	Sg	0.053	0.079	0.026
Gd	0.026	0.040	0.013	Sm	0.026	0.040	0.013
Ge	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Gh	0.013	0.020	0.007	T	0.026	0.040	0.013
Gm	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	Tm	0.013	0.020	0.007
Gx	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013
Gv	0.013	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013
H(c, g, h, l)	0.013	0.020	0.007	U	0.013	0.020	0.007
L	0.013	0.020	0.007	V(c, p)	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	W	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	Wd	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	We	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Gt	0.053	0.079	0.026	Wm	0.026	0.040	0.013
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(b, h, 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
L	0.053	0.079	0.026	Z	0.053	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	Zc	0.26	0.040	0.013
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

Los factores L y S, suelen agruparse bajo la denominación de factor topográfico LS, los cuales integran el efecto del relieve, longitud del declive o ladera y pendiente; adoptando la siguiente expresión:

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^m (0.065 + 0.0454s + 0.0065s^2) \quad (4)$$

Donde:

L=Factor longitud de la pendiente (adimensional)

λ =Longitud de la pendiente (metros)

m=Exponente influenciado por la interacción de la longitud y grado de la pendiente, y puede ser también influenciado por las propiedades del suelo, tipo de vegetación (anexo 6)

Cuando el valor de m es igual a 0.5, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$LS = (\lambda)^{0.5} (0.0138 + 0.00965s + 0.00138s^2) \quad (5)$$

La ecuación anterior, se utiliza para pendientes menores del 20% y longitudes de pendiente menores de 350 metros. Para pendientes mayores del 20% se aplica la siguiente ecuación:

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.6} \left[\frac{s}{9} \right]^{1.4} \quad (6)$$

El valor del factor C depende de las combinaciones de cobertura, secuencia de cultivo, prácticas de manejo, eficiencia en la cobertura vegetal durante el año y la correspondencia de periodos de alta erosividad con épocas de buena o baja cobertura vegetal.

Con fines prácticos se hace uso de tablas para determinar el valor de C para matorrales, arbustos pastizales, bosques y cultivos (cuadros 4 y 5) para algunas especies vegetales y cultivos.

El factor P indica la relación entre la pérdida de suelo cuando se realiza alguna práctica mecánica y la pérdida de suelo sin ninguna práctica.

Para este factor se dio un valor de 1 en toda la cuenca por carecer de prácticas de control de erosión.

Cuadro 4. Valores de factor C para bosques.

% de cubierta	% de cubierta en contacto con el suelo	Tipo de ordenación	
		C	NC
100 - 75	100 - 90	0.001	0.003 - 0.011
75 - 40	90 - 70	0.002 - 0.003	0.01 - 0.03
40 - 20	70 - 40	0.003 - 0.009	0.03 - 0.09

C = montes con control estricto de pastoreo; NC = montes sin control de pastoreo.

Cuadro 5. Valores de factor C para cultivos.

Cultivo y práctica	Factor C
Suelo desnudo	1.00
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de mulch	0.001
Sabana o pradera herbáceas o en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbáceas sobrepastada	0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0.20 - 0.55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0.50 - 0.90
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02 - 0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.12 - 0.20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30 - 0.45
Algodón	0.40 - 0.70
Pradera herbácea	0.01 - 0.03
Soja	0.20 - 0.50
Trigo	0.10 - 0.40
Arroz	0.10 - 0.20
Cacahuete	0.30 - 0.80
Palmera, cafeto, cocotero con cobertura vegetal	0.10 - 0.30
Piña cultivada a nivel con retirada de residuos	0.10 - 0.40
Piña cultivada a nivel con residuos en superficie	0.01
Patata con surcos según la pendiente	0.20 - 0.50
Patata con surcos transversales a la pendiente	0.10 - 0.40
Fresa con cobertura de malas hierbas	0.27
Granado con cobertura de malas hierbas	0.08
Granado limpio de malas hierbas	0.56
Caña de azúcar	0.13 - 0.40
Guisante de Angola	0.60 - 0.70
Pimiento o Cafeto: después de la primera recolección	0.05
Plátano: después de su establecimiento	0.05 - 0.10
Papaya	0.21

Tanto para la obtención de los factores como para la multiplicación de estos, se hizo uso del software ArcView versión 3.2 y de la herramienta SEDEOT (Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio) desarrollada por González (2003).

Los insumos utilizados en esta herramienta fueron:

Mapa de precipitación media anual a partir de información de estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca mediante el procedimiento de polígonos de Thiessen (anexo 7) para la obtención de factor R.

Mapa edafológico para la obtención de los valores de K.

Modelo digital de elevaciones para la obtención de los factores LS.

Mapas de vegetación y uso de suelo obtenidos de la clasificación de imágenes de satélite de los años 1975, 1993, 2000 y 2009 para representar el factor C.

Una vez que se tienen los mapas de todos los factores de la EUPS, se hace la multiplicación de estos con SEDEOT resultando el mapa de erosión hídrica para las condiciones dadas.

4.3.5 Estimación del escurrimiento superficial

Para la determinación de los volúmenes medios anuales de escurrimiento superficial, se utilizó el método indirecto precipitación-escurrimiento establecido en la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000, mediante la siguiente expresión:

$$Vm = P \times Ce \times A \quad (7)$$

Donde:

Vm = volumen medio anual de escurrimiento (m^3)

P = precipitación anual de la cuenca (m)

Ce = coeficiente de escurrimiento (adimensional)

A = área de la cuenca (m^2).

El coeficiente de escurrimiento se determinó en función de la textura y uso de suelo, identificando, en primer lugar, el valor del factor K (cuadro 6); para esto se hizo una sobreposición de mapas de textura y mapas de uso de suelo, obteniendo unidades con características definidas para cada fecha de estudio a las que se asigna un valor de K.

Cuadro 6. Valores de K en función del tipo y uso de suelo.

Tipo de suelo		Características	
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad, loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A, terrenos migajosos.		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable o bien arcillas.		

Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos en hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal cubierto más del 75%	0.14	0.20	0.28
Pastizal cubierto del 50 al 75%	0.20	0.24	0.30
Pastizal cubierto menos del 50%	0.24	0.28	0.30
Bosque cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Bosque cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Bosque cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Bosque cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Fuente: CNA (2000)

La precipitación media anual se determinó a partir del análisis de registros de 4 estaciones ubicadas dentro de la cuenca mediante el método de polígonos de Thiessen, y con el software ArcView 3.2.

Dado que en la cuenca existen diferentes tipos y uso de suelo, el valor de K se calculó como el promedio ponderado de cada una de las áreas homogéneas.

Una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento se calcula con las siguientes formulas:

Si K menor o igual que 0.15 entonces

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} \quad (8)$$

Si K mayor que 0.15 entonces

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad (9)$$

Donde:

Ce=coeficiente de escurrimiento (adimensional)

K=factor de tipo y uso de suelo (adimensional)

P= precipitación media anual de la cuenca (mm).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Clasificación de uso de suelo

De acuerdo con los mapas de uso de suelo de los años 1975, 1993 y 2000 elaborados en el colegio de la frontera sur, así como en recorrido realizado en 2009, se identificaron 5 usos de suelo en la cuenca: 1) Agricultura de temporal (AT); 2) Bosque de encino (BQ); 3) Bosque de pino (BP); 4) Bosque mesófilo de montaña (BMM); y 5) Zonas urbanas (ZU).

Los mapas obtenidos de vegetación y uso de suelo mediante clasificación supervisada de imágenes de satélite de los años 1975, 1993, 2000 y 2009 se presentan en figuras 6 a 9. El uso predominante en cada año analizado fue la agricultura de temporal (AT), siguiendo el bosque de encino (BQ) y en tercer lugar el bosque de pino (BP) (Figura 5).

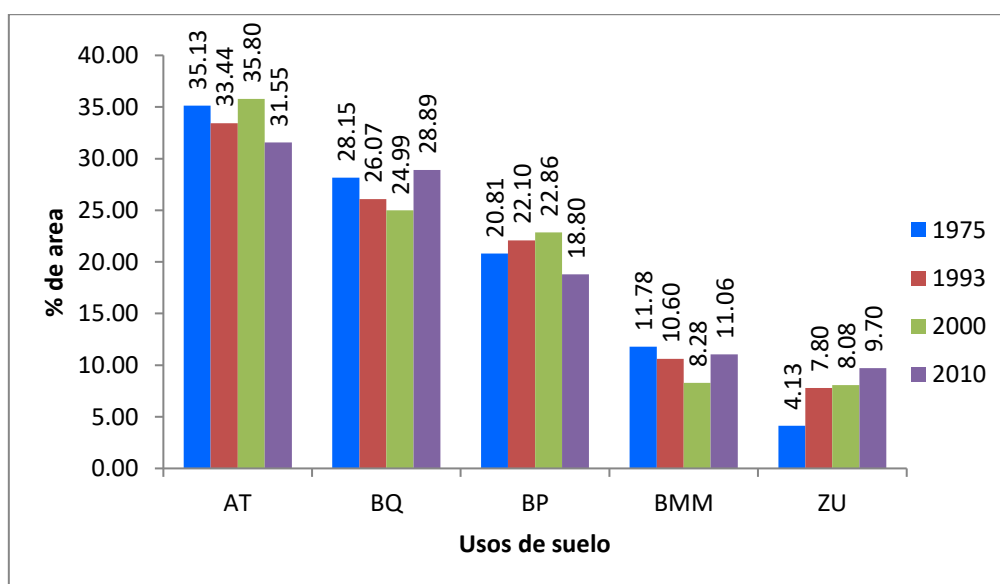


Figura 5. Porcentaje de área por uso de suelo para cada año de análisis.

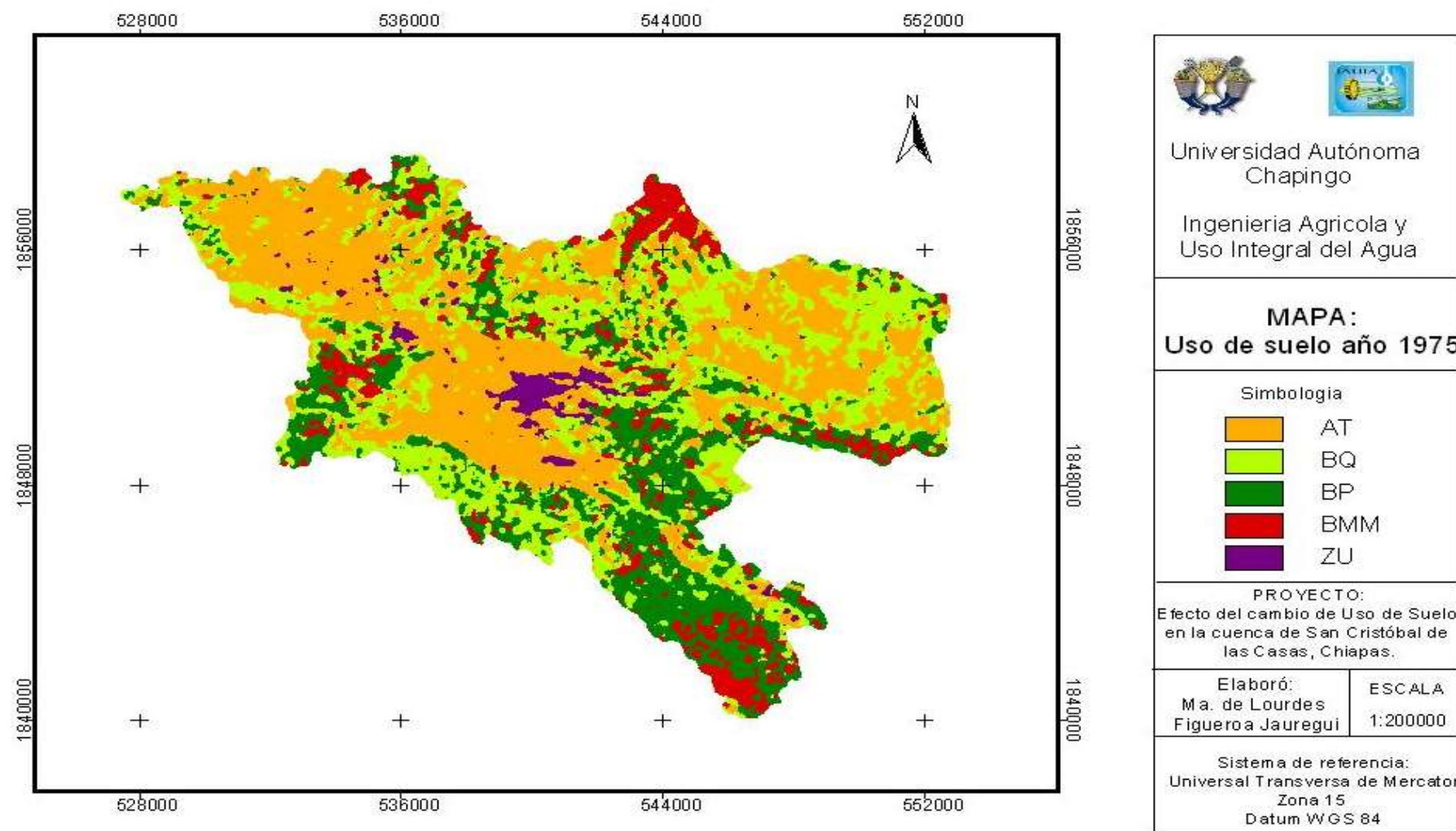


Figura 6. Mapa de uso de suelo 1975.

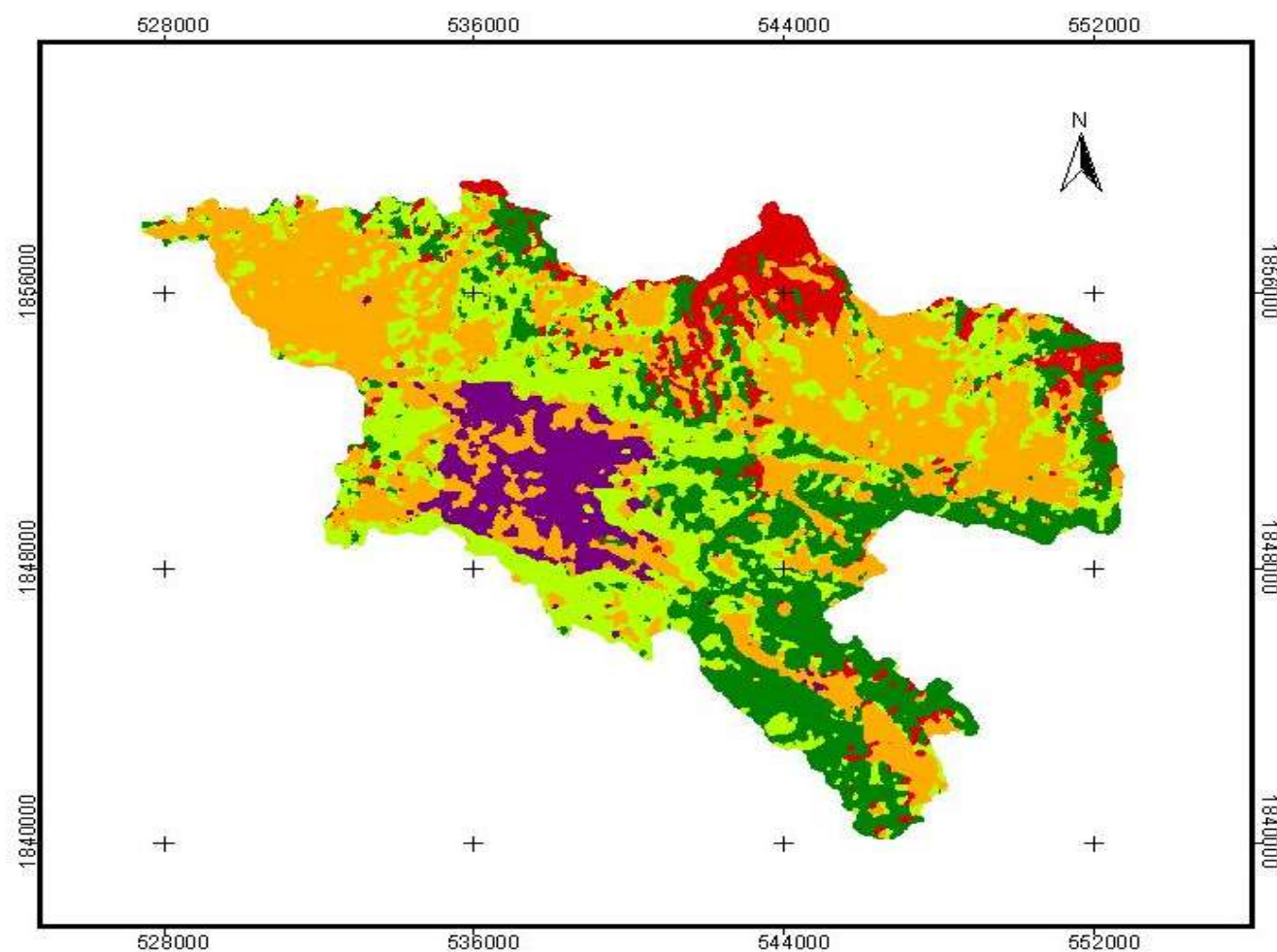


Figura 7. Mapa de uso de suelo 1993.

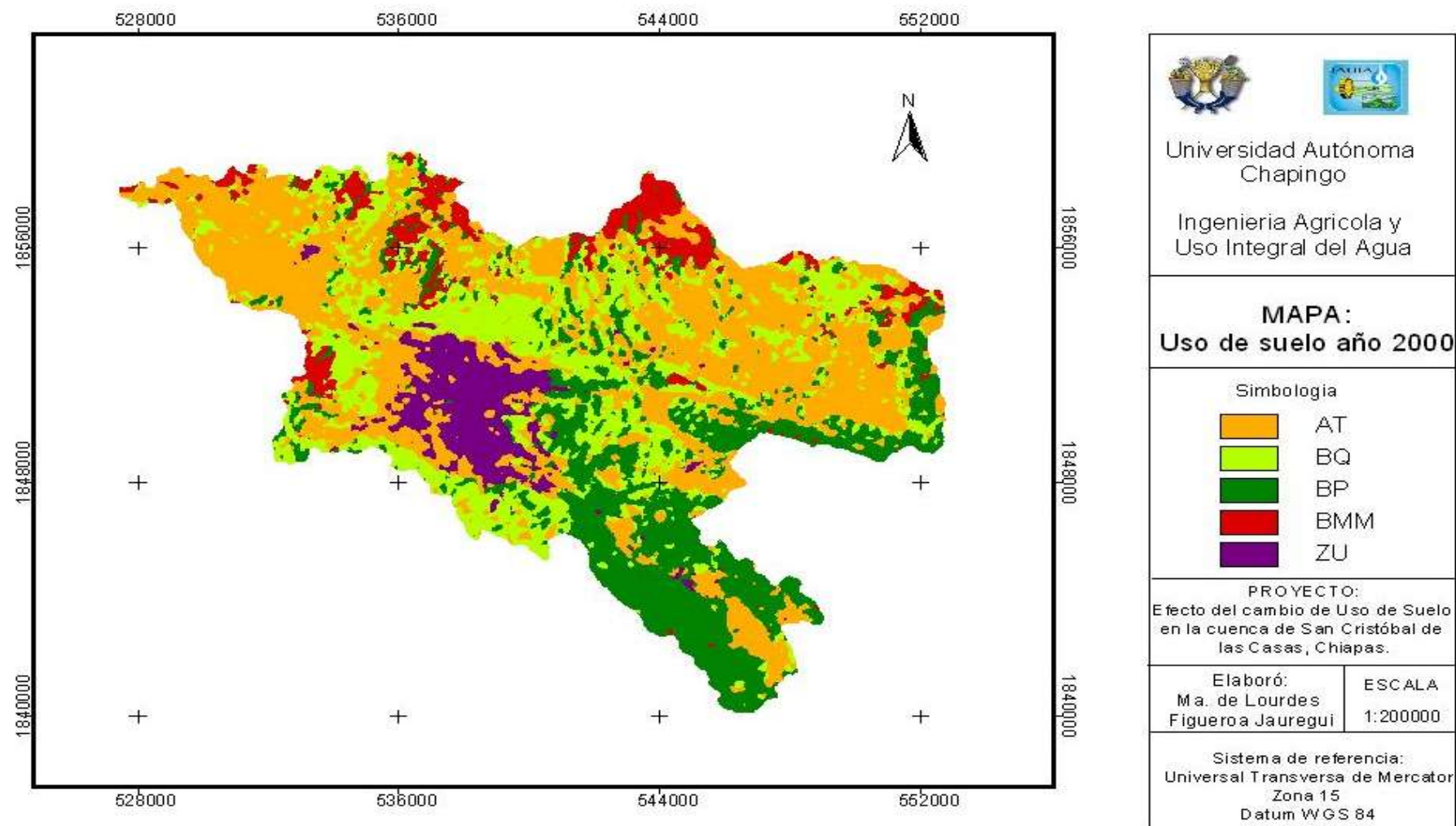


Figura 8. Mapa de uso de suelo 2000.

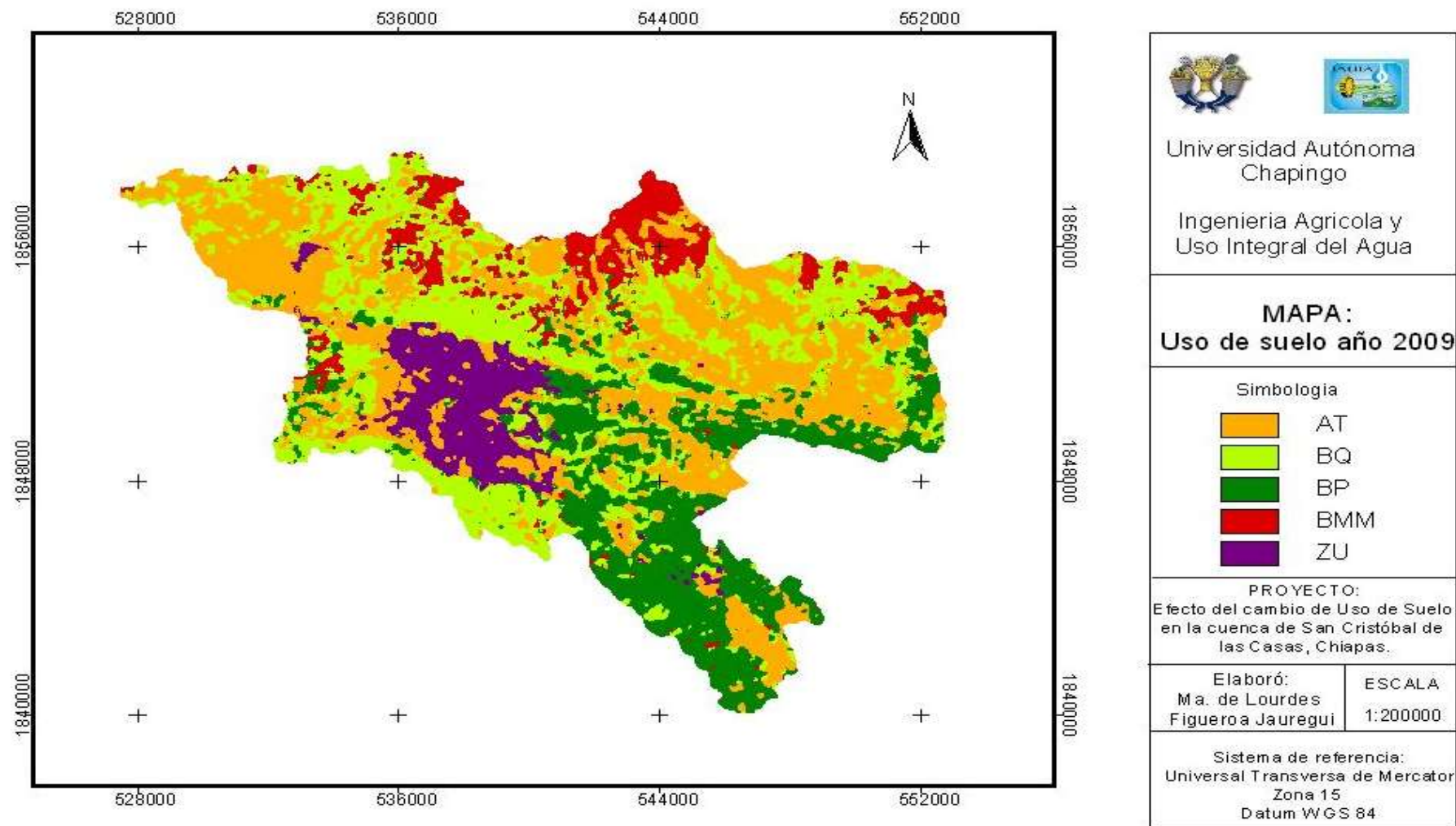


Figura 9. Mapa de uso de suelo 2009.

Estos dos últimos tipos de vegetación (BQ y BP), así como la presencia de bosque mesófilo de montaña (BMM) indican aptitud forestal eminente de la cuenca, por las alturas sobre nivel del mar alcanzadas en esta, sin embargo el impacto antropogénico se ve reflejado en la presencia de extensas áreas de agricultura de temporal (AT) cercanas a las pequeñas poblaciones en toda la cuenca.

La porción meridional central de la cuenca está dominada por los terrenos urbanos y suburbanos con presencia de humedales que estando rodeados por el área urbana se han reducido a un porcentaje casi imperceptible de la cuenca (no representado en mapas de uso de suelo proporcionados por ECOSUR). Gran parte del área que rodea la zona urbana se ha utilizado intermitentemente para la producción agrícola o se ha abandonado.

5.2 Dinámica del cambio de uso de suelo

5.2.1 Periodo 1975-1993

Para el año 1975 la superficie agrícola de la cuenca era de 10,096 ha, el bosque de encino alcanzaba las 8,090 ha, mientras que el área ocupada por bosque de pino fue de 5,981, el bosque mesófilo de montaña tenía 3,386 y las zonas urbanas para este año eran de 1,185 ha; superficies que sufrieron cambios para 1993 en las proporciones mostradas en el cuadro 7.

Cuadro 7. Matriz de cambio de uso de suelo periodo 1975-1993.

		1993					
		AT	BQ	BP	BMM	ZU	TOTAL
1975	AT	14.56	8.57	4.87	2.98	4.14	35.13
	BQ	9.63	7.77	5.92	3.17	1.66	28.15
	BP	5.24	5.53	7.06	2.19	0.78	20.81
	BMM	2.73	3.06	3.62	2.04	0.33	11.78
	ZU	1.28	1.13	0.62	0.21	0.88	4.13
TOTAL		33.44	26.07	22.10	10.60	7.80	100.00

Las tasas de cambio calculadas fueron de -0.27 para AT, -0.43 para BQ, 0.33 en BP, -0.59 en BMM y 3.60 para ZU; los valores negativos representan pérdida para estas coberturas, mientras que las ganancias se representan con valores positivos en la tasa de cambio. De las cubiertas forestales presentes en la cuenca, la más afectada es el bosque mesófilo de montaña, el bosque de encino por su ubicación en zonas más bajas con respecto a bosque de pino, se vio reducido en superficie para establecimiento de zonas agrícolas y urbanas, estas últimas son las que presentan el mayor aumento.

En general, la tasa de deforestación para el periodo 1975-1993 es de -0.18, indicando reducción de la superficie forestal, principalmente de bosque de encino y bosque mesófilo de montaña.

5.2.2 Periodo 1993-2000

En el periodo de 1993 al 2000, se vio un incremento en la superficie agrícola y zonas urbanas, acompañado de una disminución en bosque de encino y mesófilo de montaña. Pese a esto, los valores más altos en la matriz de cambio (cuadro 8) se presentan en la diagonal en la mayoría de los casos, lo que significa mayor porcentaje de permanencia o persistencia en cada uso.

Cuadro 8. Matriz de cambio de uso de suelo periodo 1993-2000.

		2000					
		AT	BQ	BP	BMM	ZU	TOTAL
1993	AT	26.95	3.54	0.68	0.17	2.10	33.44
	BQ	3.72	11.62	7.93	2.29	0.51	26.07
	BP	1.38	5.78	11.73	2.90	0.31	22.10
	BMM	1.56	3.57	2.38	2.92	0.17	10.60
	ZU	2.19	0.48	0.13	0.00	4.99	7.80
	TOTAL	35.80	24.99	22.86	8.28	8.08	100.00

La tasa de cambio en este periodo es de 0.98 para AT, -0.60 para BQ, 0.49 para BP, -3.46 para BMM y 0.50 para ZU. Las cubiertas arboladas (bosques) en la cuenca continuaron con pérdidas al presentarse una tasa de deforestación de -0.25.

5.2.3 Periodo 2000-2009

El porcentaje de cambio de uso de suelo de 2000 al 2009 (cuadro 9), representan nuevamente mayor porcentaje de persistencia en todas las clases.

Cuadro 9. Matriz de cambio de uso de suelo periodo 2000-2009.

		2010					
		AT	BQ	BP	BMM	ZU	TOTAL
2000	AT	21.64	7.73	1.67	1.15	3.61	35.80
	BQ	5.49	11.57	4.28	3.10	0.55	24.99
	BP	1.94	6.17	11.05	3.38	0.31	22.86
	BMM	0.89	2.76	1.35	3.29	0.00	8.28
	ZU	1.59	0.66	0.45	0.13	5.24	8.08
TOTAL		31.55	28.89	18.80	11.06	9.70	100.00

Las tasas de cambio del 2000 al 2009 fueron de -1.39 para AT, -2.15 para BP, 1.62 en BQ, 3.26 en BMM y 2.06 en ZU.

Las áreas agrícolas se vieron disminuidas como consecuencia del abandono de la agricultura por parte de las pequeñas poblaciones indígenas aledañas a la ciudad de San Cristóbal en la última década para dedicarse a las actividades de venta de artesanías a turistas en la ciudad. La industria del turismo crea el empleo formal e informal en hoteles, restaurantes, tiendas, agencias de viajes, la “economía de la calle”, y los

trabajos rurales. La economía de la calle emplea a centenares cuyos ingresos provienen de la venta de artículos típicos y otras actividades manuales.

Este abandono permitió la regeneración de bosque, que se ve reflejado en la tasa de deforestación de 0.25 en estos 9 años.

5.2.4 Consideraciones generales

En general, no se observó una marcada tendencia de cambio en la categoría de Agricultura de temporal como se hubiera esperado; las superficies de bosques de encino y bosque mesófilo de montaña si mostraron tendencia a disminuir hasta el último periodo en que hubo regeneración de estos.

Las Zonas Urbanas mantuvieron su tendencia de incremento pasando a más del doble de área a lo largo de los 34 años de estudio, considerando que la población en la cuenca aumentó de manera considerable en este tiempo: de alrededor de 60 mil habitantes en 1970 a más de 180 mil habitantes en 2005 (INEGI, 2005).

Un ejemplo de este crecimiento se observa en la parte norte de la ciudad de San Cristóbal de las Casas (figura 10), en donde se dieron asentamientos de grupos chamulas a raíz del conflicto zapatista, los cuales actualmente se dedican a la extracción y venta clandestina de madera.



Figura 10. Zona norte de la ciudad de San Cristóbal de las Casas.

La tasa anual de deforestación calculada fue de -0.19 considerando desde 1975 a 2009, que se encuentra por debajo de las reportadas en otras partes del país de 1 a 10% anual (Velázquez *et al.* 2002), pero que muestra alteraciones a las cubiertas arboladas por efecto del hombre.

Sin embargo, de manera similar a lo encontrado por Miranda *et al.* (2009) se observa persistencia en los usos en mayor porcentaje que los cambios de una clase a otras.

5.3 Pérdidas de suelo por erosión

En las figuras 11 a 14 se muestran los mapas obtenidos de los factores R, K, L y S que intervienen en la ecuación universal de pérdida de suelo obtenidos a través de la herramienta SEDEOT.

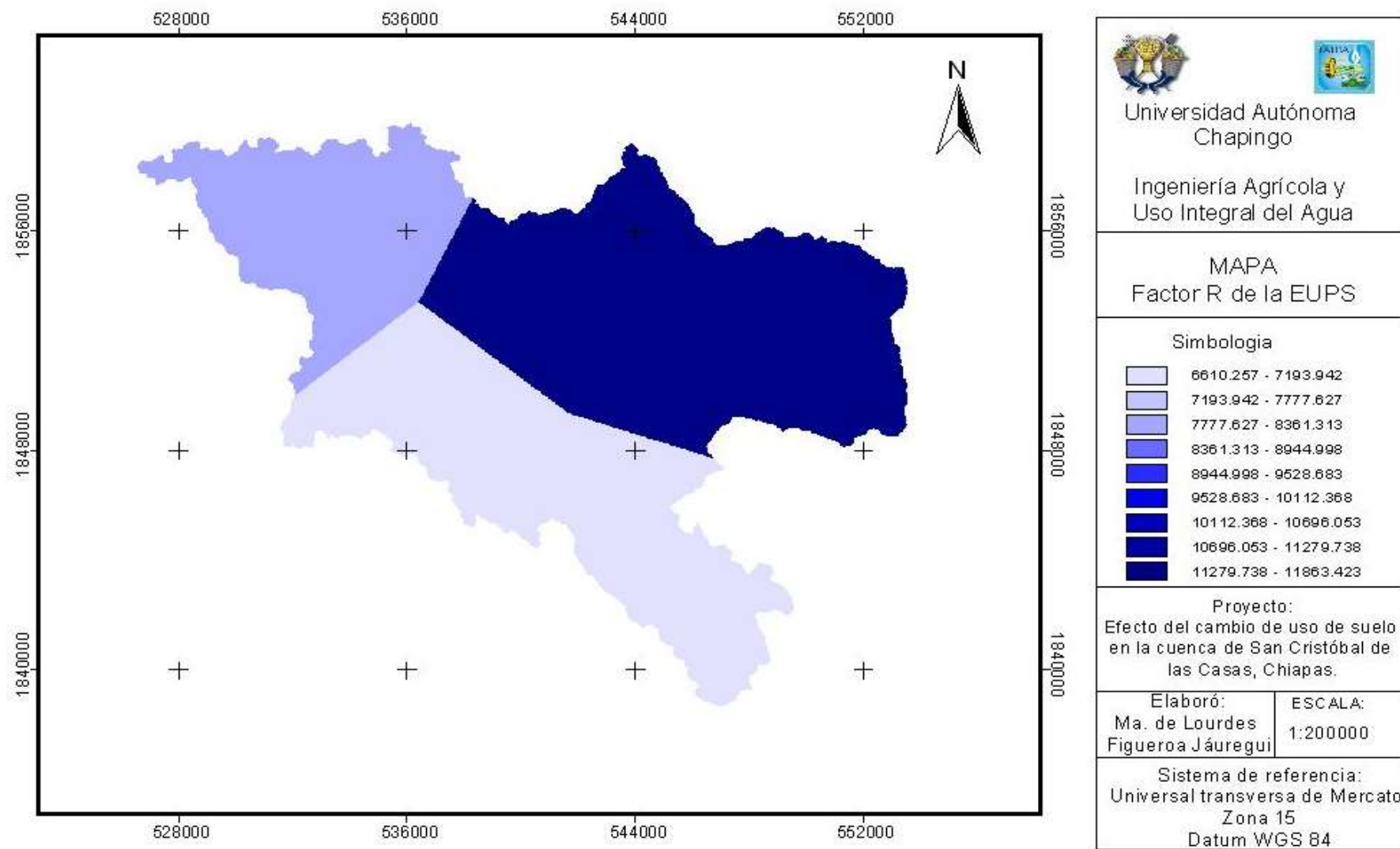


Figura 11. Mapa raster de factor R.

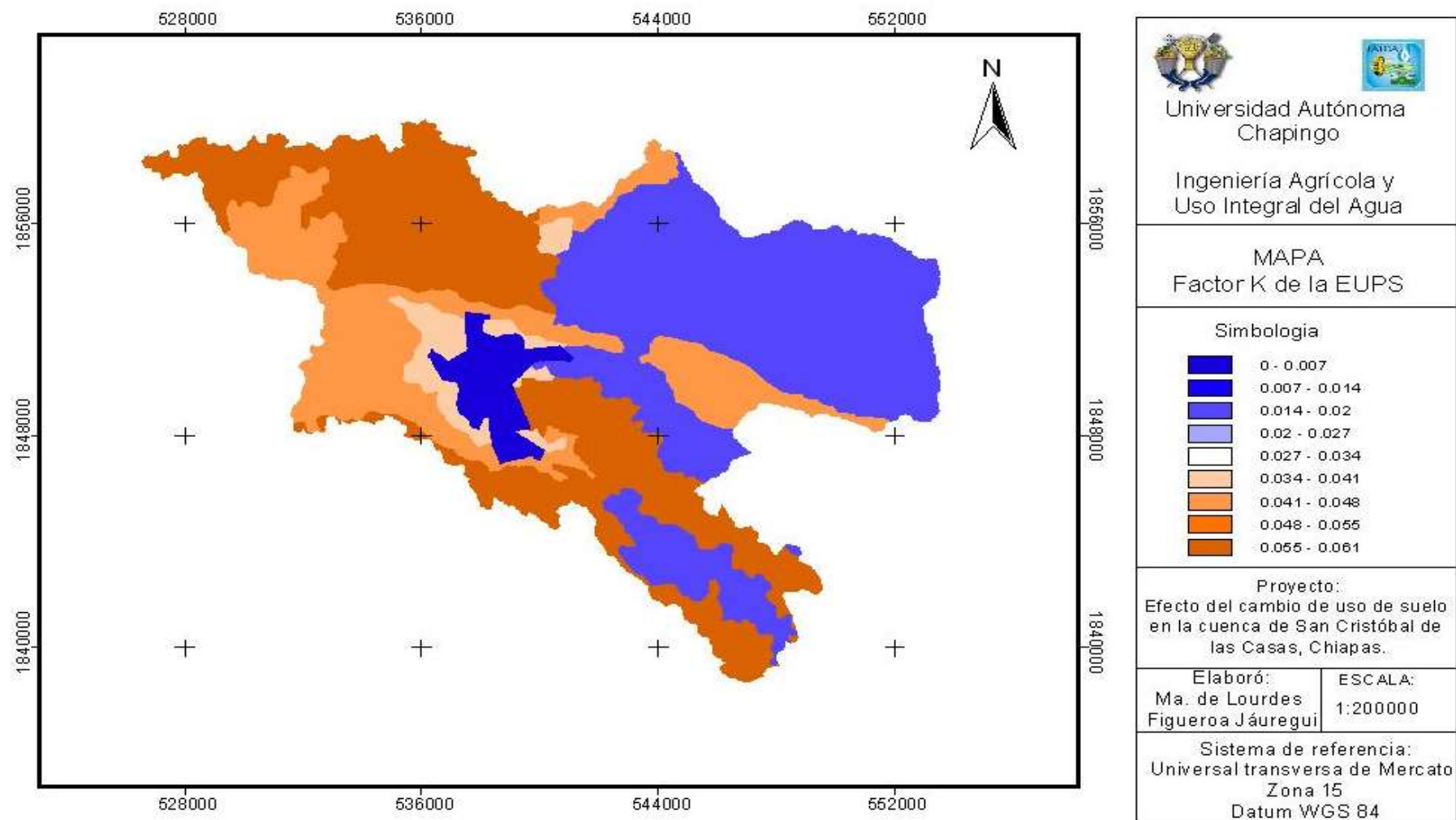


Figura 12. Mapa raster de factor K.

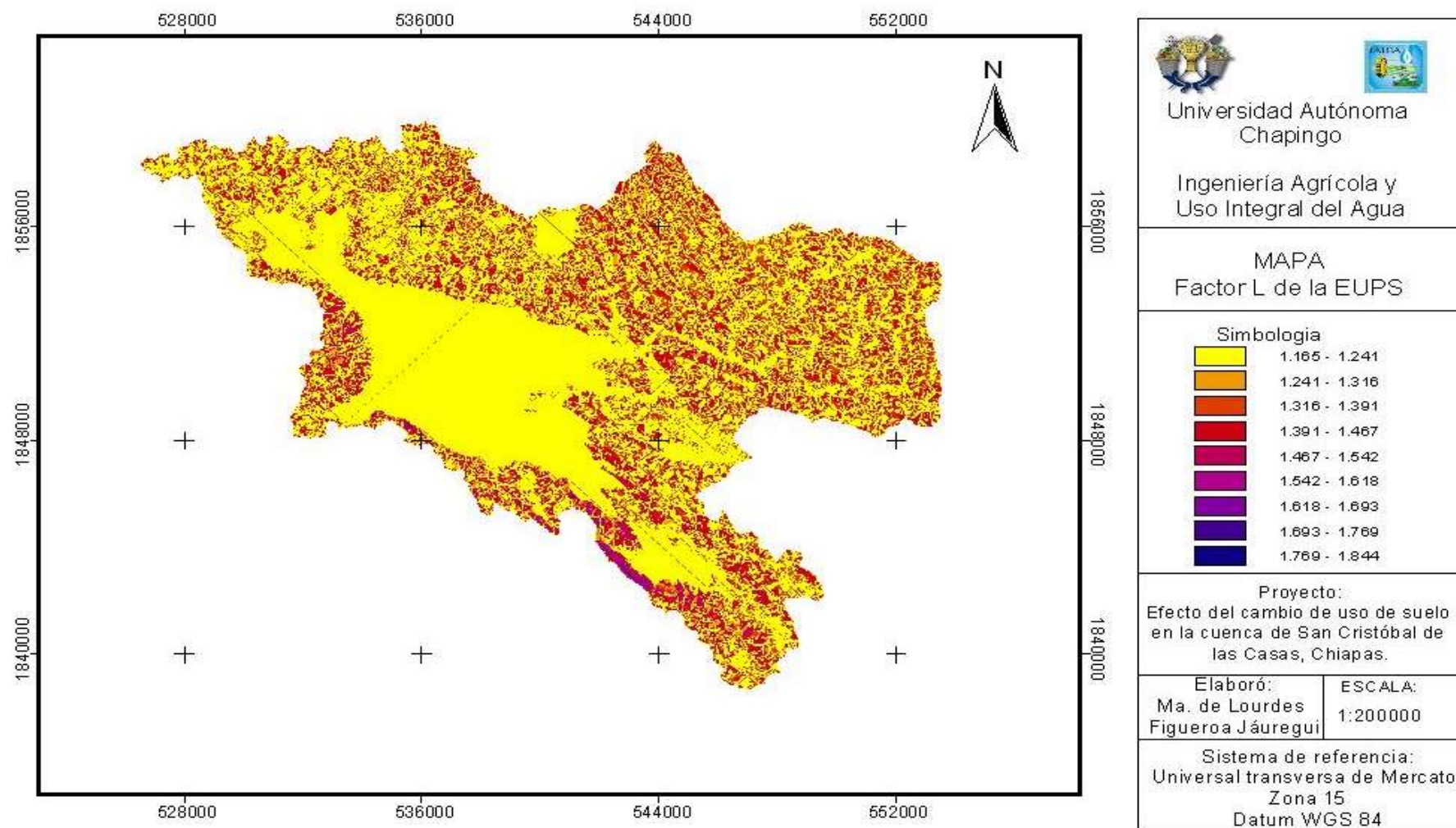


Figura 13. Mapa raster de factor L.

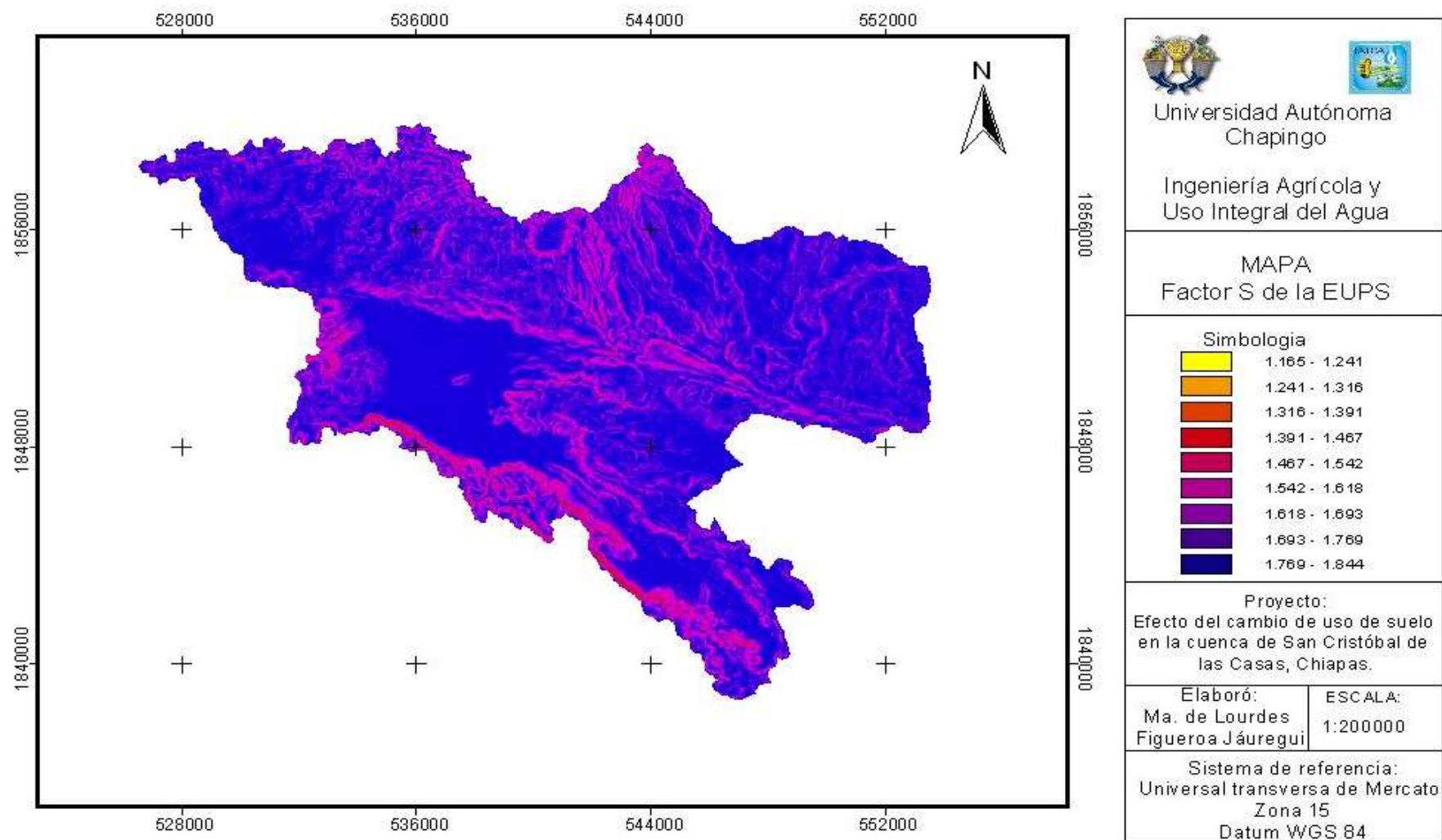


Figura 14. Mapa raster de factor S.

Estos factores se mantienen como constantes para los 4 años de estudio, considerando variación únicamente en mapa de factor C de acuerdo a los usos obtenidos anteriormente.

De acuerdo con los cuadros 4 y 5, los valores asignados del factor C a las clases de uso de suelo identificadas son de 0.4 para Agricultura de Temporal; 0.02 en Bosque de Encino; 0.03 para Bosque de Pino; 0.003 para bosque mesófilo de montaña y valor de 1.0 en Zonas Urbanas. La distribución de estos valores corresponde a la misma distribución de las categorías de uso identificadas, como se observa en figuras 15 a 18.

En cuanto a la tasa de erosión hídrica estimada, se detectó que más que un cambio generalizado en los valores de esta, es decir, más que un incremento en la superficie con los más altos niveles de erosión, ha ocurrido un desplazamiento de estas áreas.

Los mapas generados de erosión hídrica se muestran en figuras 19 a 22, mismos que se clasificaron de acuerdo FAO-PNUMA-UNESCO (1981) por grado de erosión en: Ligera (0- 10 ton/ha/año), Moderada (10-50 ton/ha/año), Alta (50-200 ton/ha/año) y Muy alta (más de 200 ton/ha/año).

El porcentaje de área con diferentes grados de erosión hídrica oscila entre el 20 y 30% en los 4 años de análisis (figura 23), sin embargo, en los periodos 1975-1993 y 1993-2000, la superficie con erosión ligera disminuyó pasando estas áreas a un grado de erosión moderada y alta.

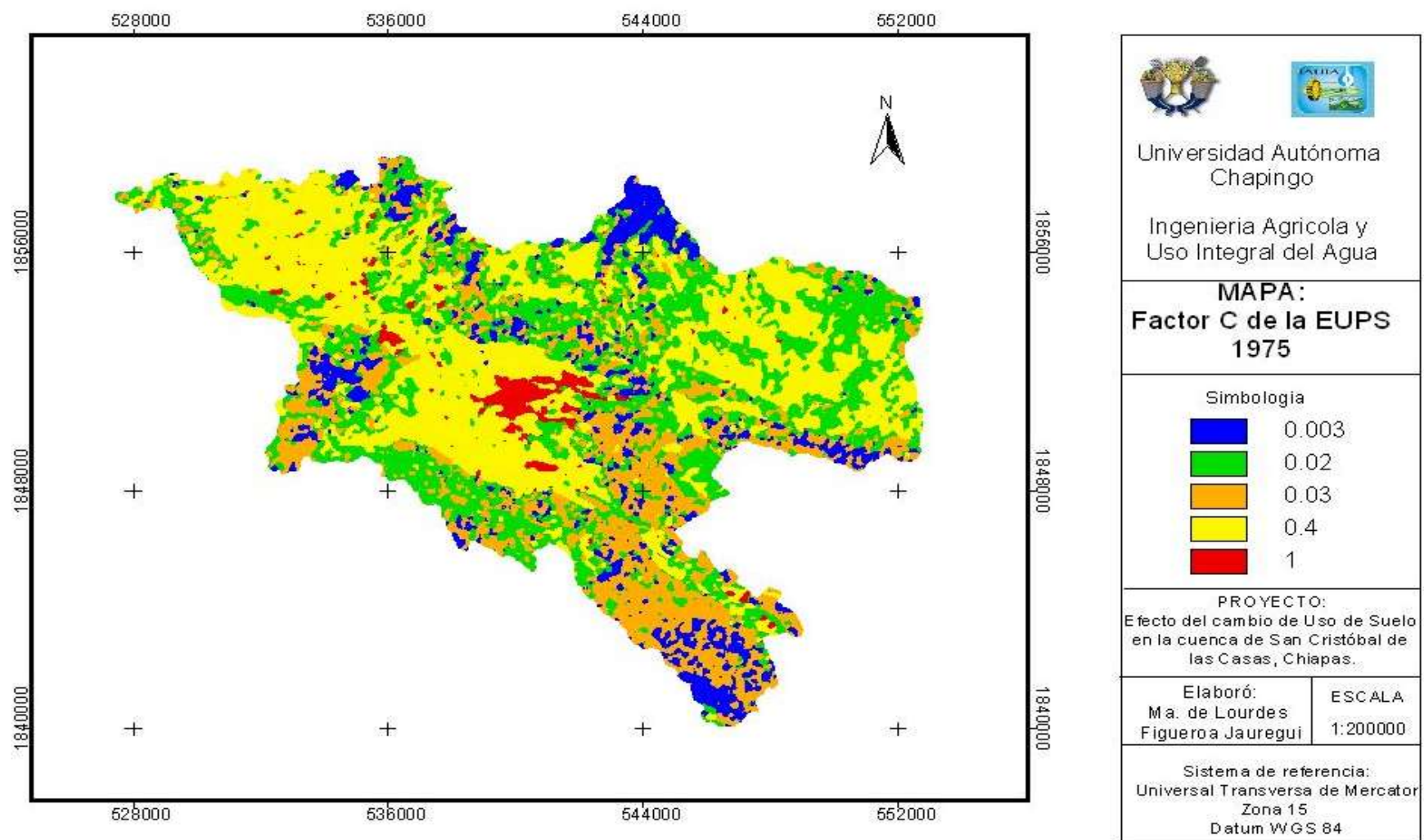


Figura 15. Mapa raster de factor C 1975.

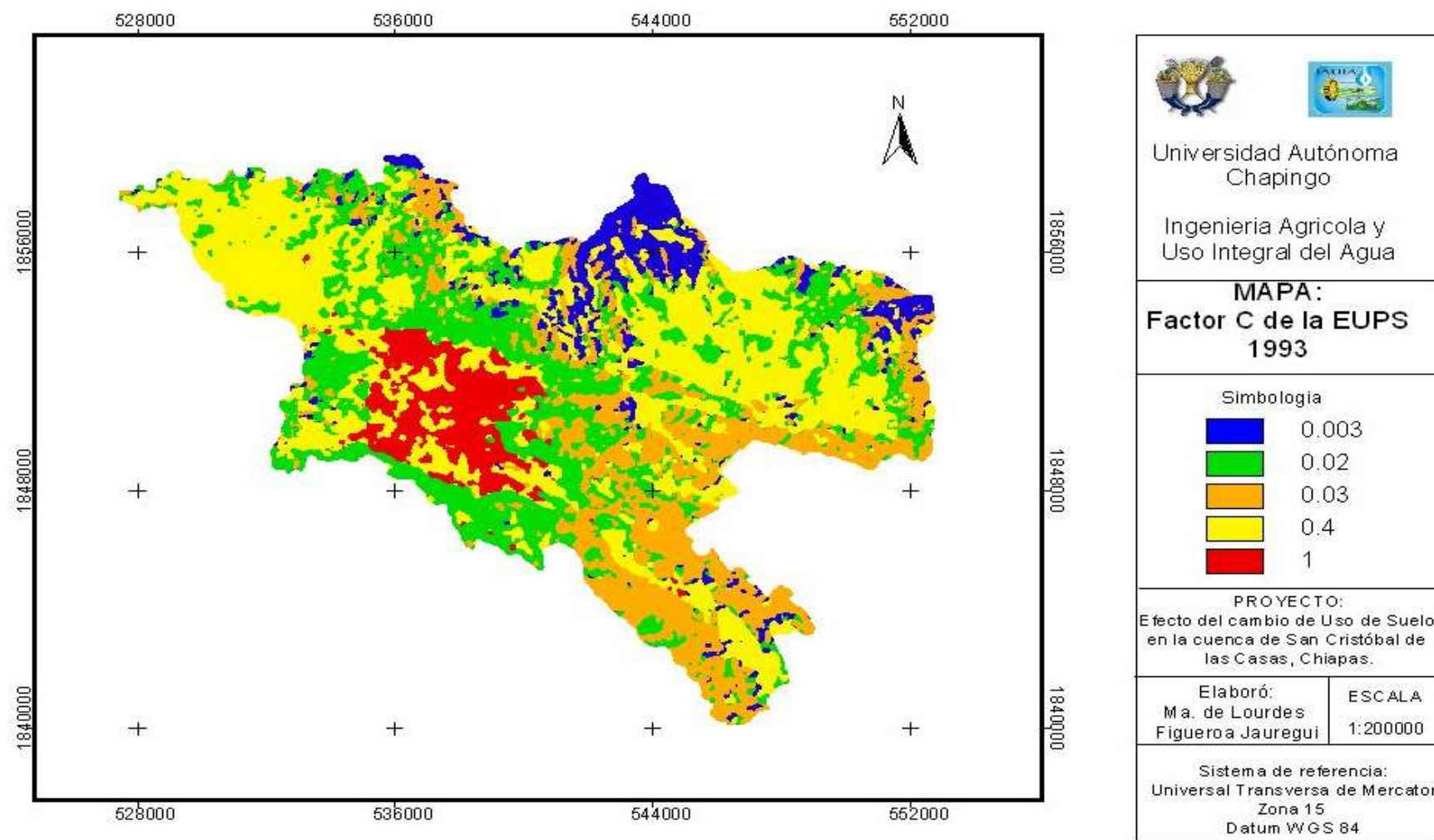


Figura 16. Mapa raster de factor C 1993.

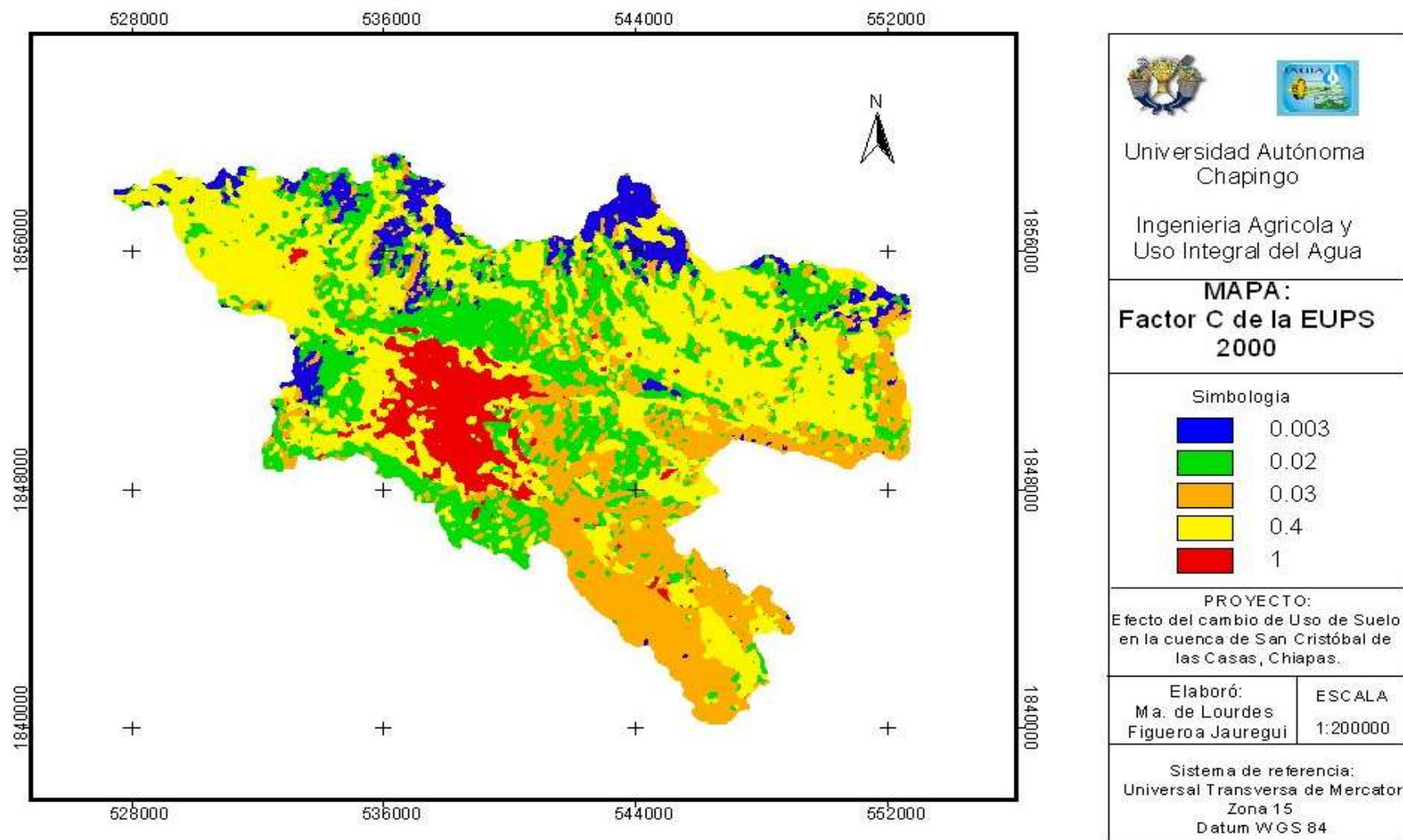


Figura 17. Mapa raster de factor C 2000.

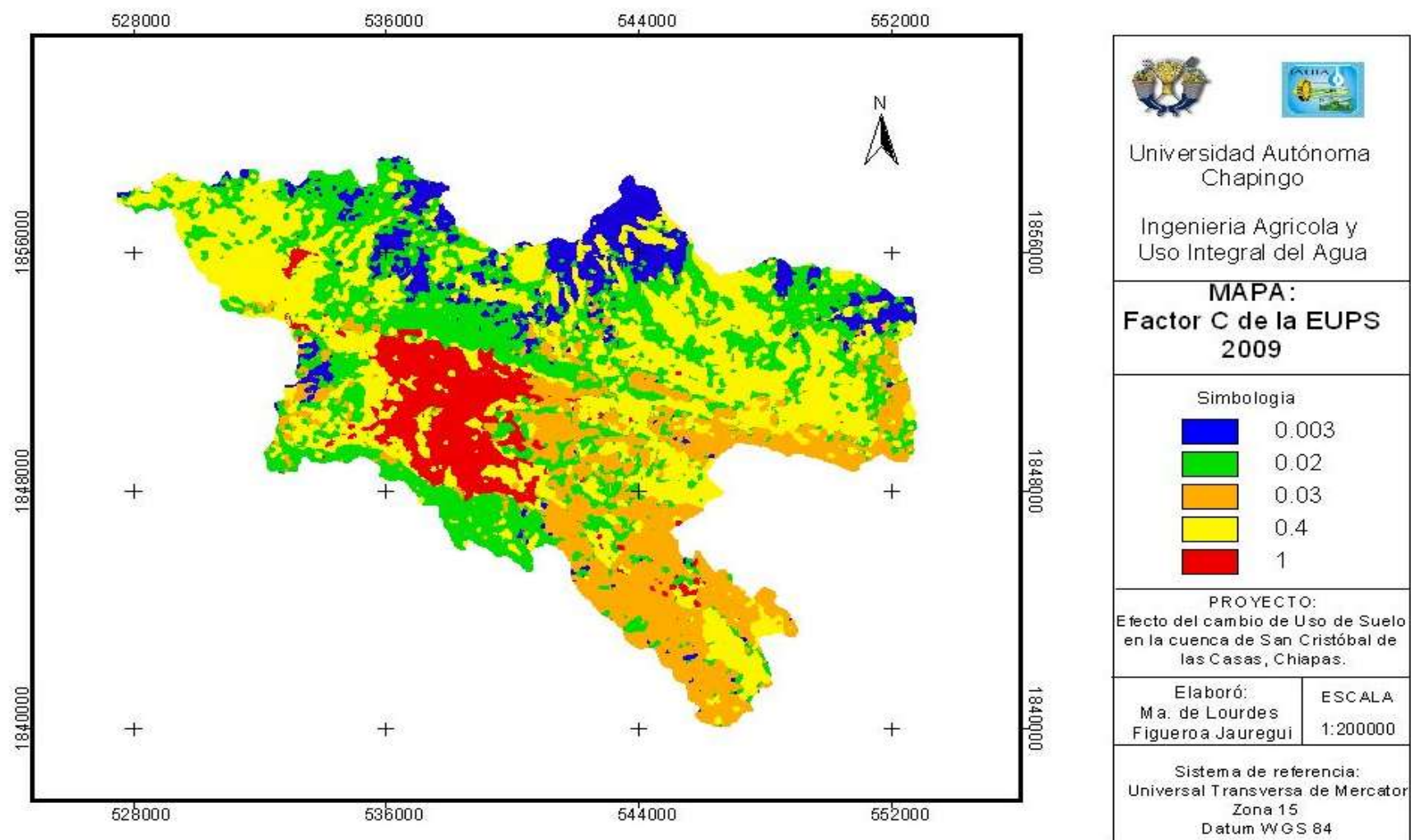


Figura 18. Mapa raster de factor C 2009.

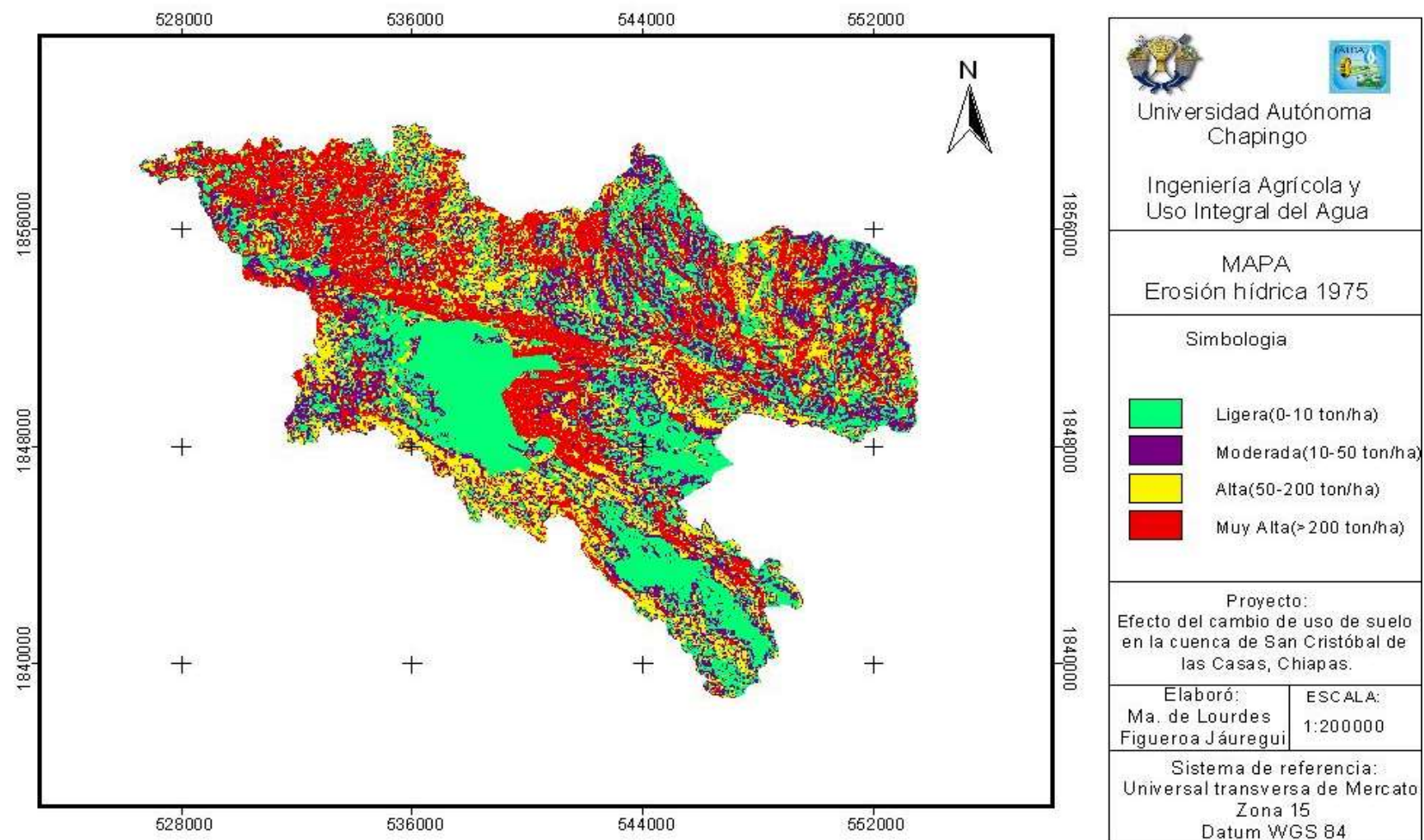


Figura 19. Mapa de erosión hídrica 1975.

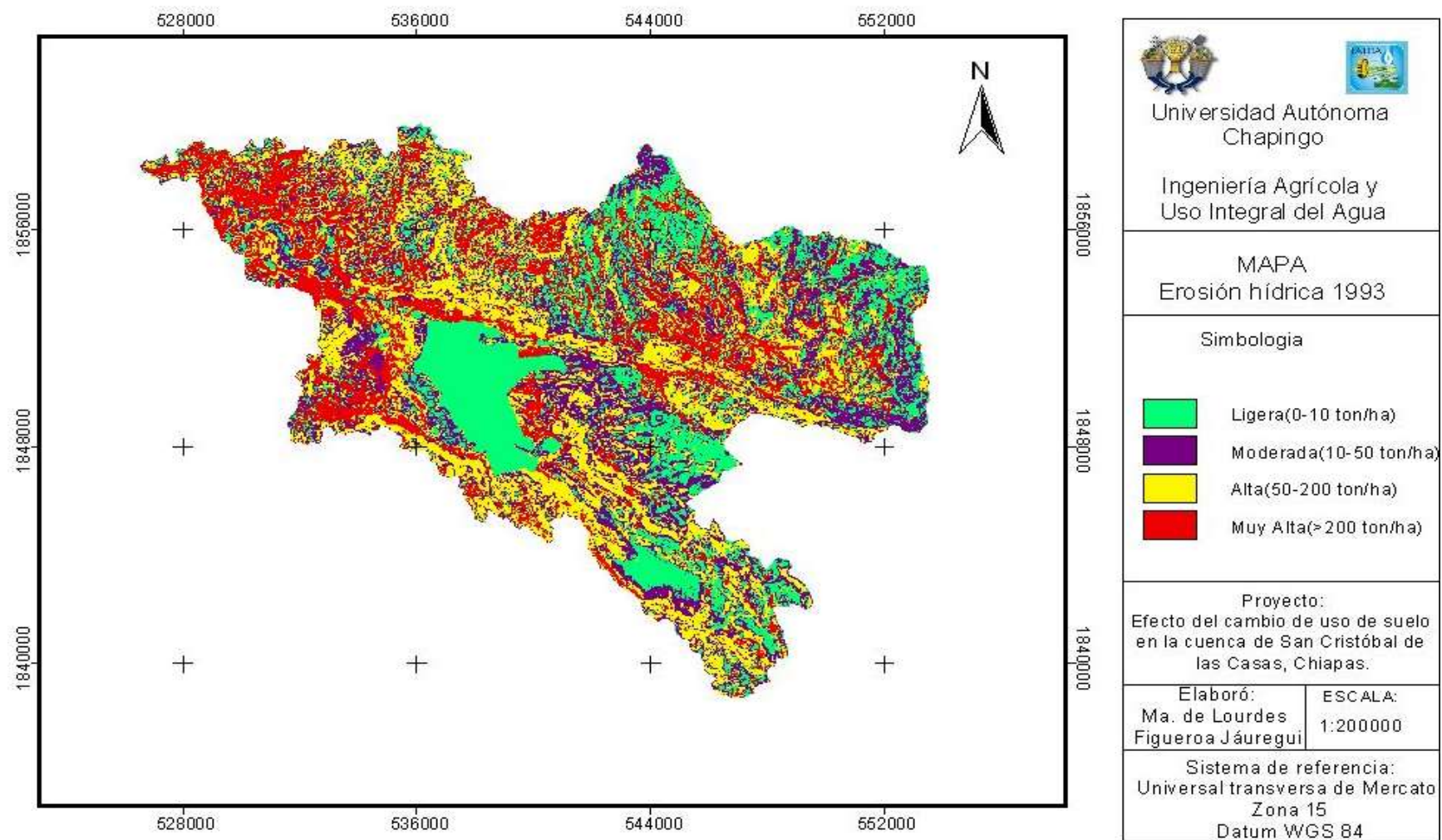


Figura 20. Mapa de erosión hídrica 1993.

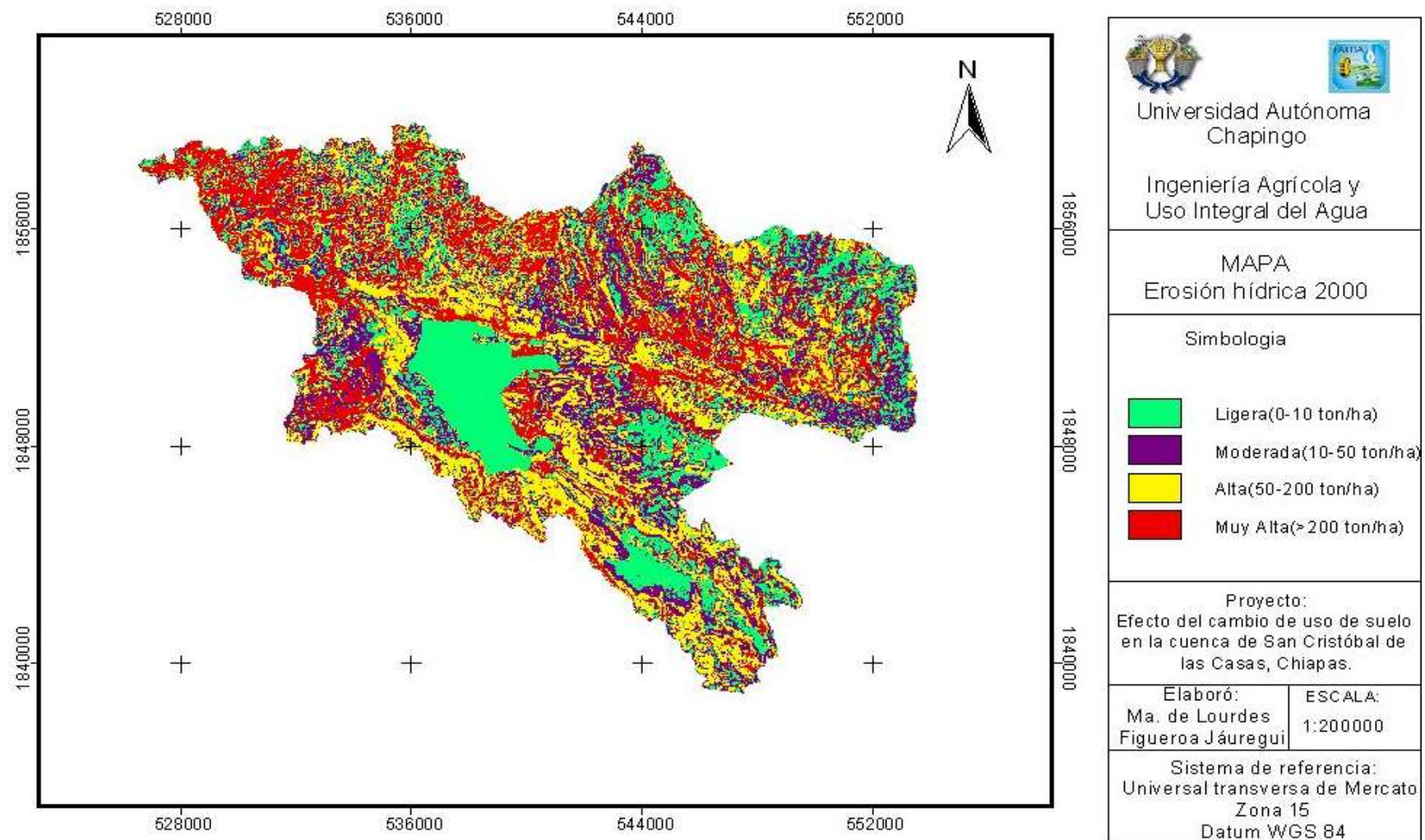


Figura 21. Mapa de erosión hídrica 2000.

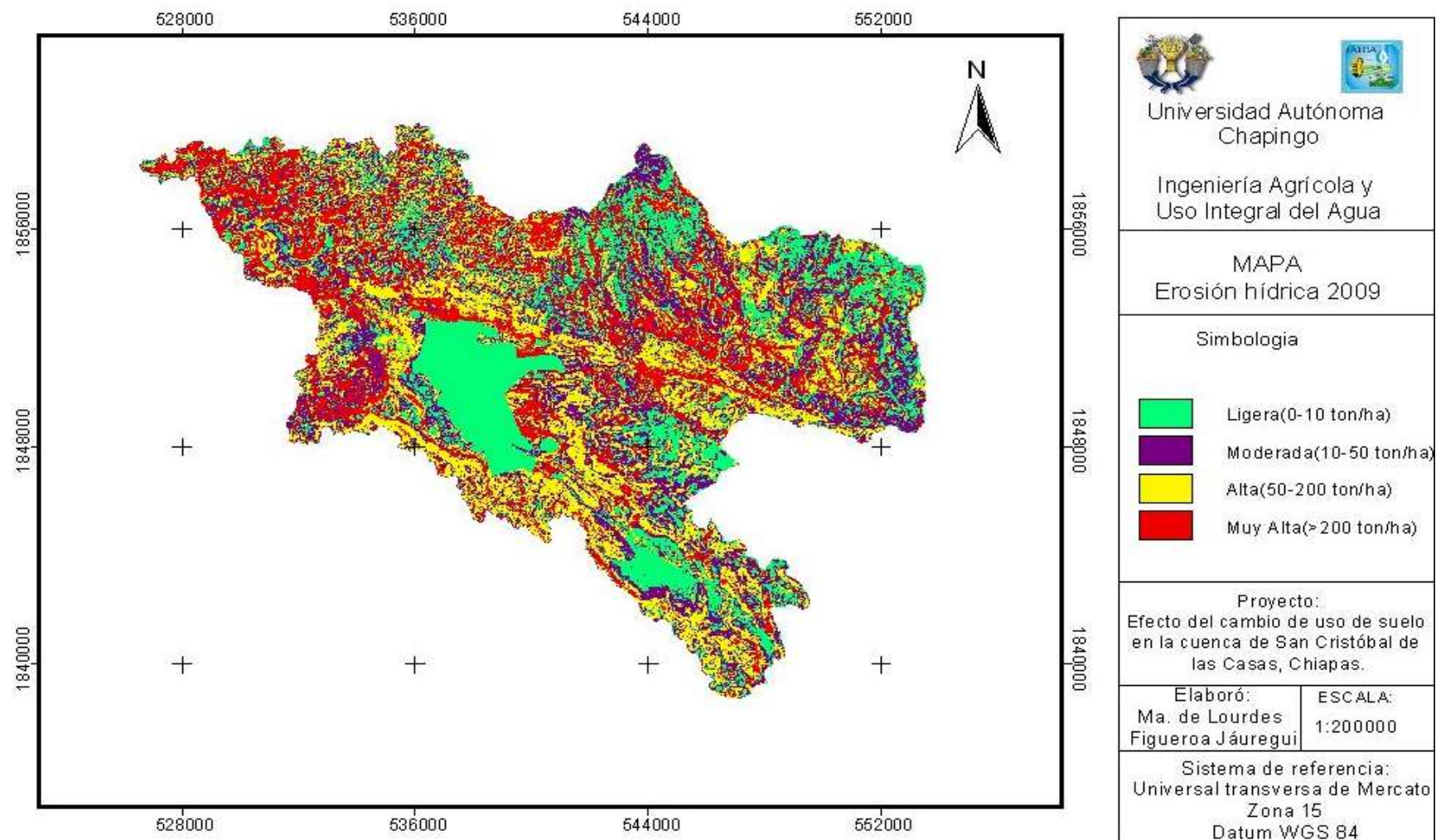


Figura 22. Mapa de erosión hídrica 2009.

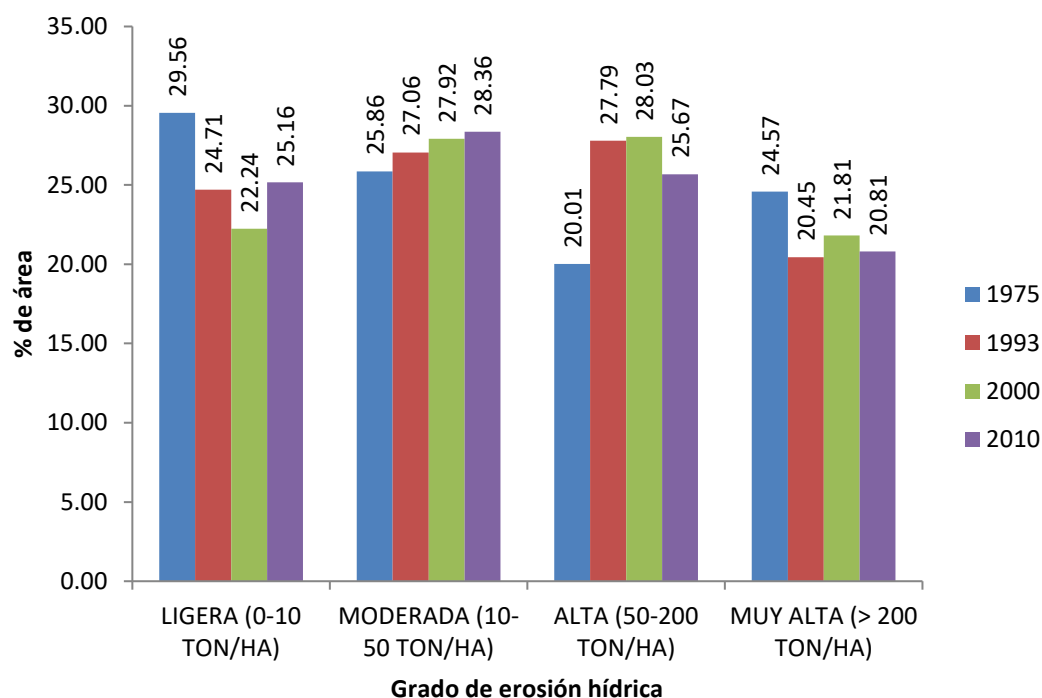


Figura 23. Porcentaje de área por grado de erosión para cada año de análisis.

Dado que no se vio una tendencia de cambio de uso de suelo muy marcada y que la tasa de deforestación fue baja, el porcentaje de la cuenca con un grado de erosión hídrica muy alta se mantuvo e incluso disminuyó para el 2009, como consecuencia de la disminución de la superficie agrícola y la regeneración de los bosques que se mencionaron anteriormente.

En el cuadro 10 se reflejan los datos de superficie de cada uno de los niveles de erosión definidos.

Cuadro 10. Clases y superficie de erosión en los años de estudio.

GRADO DE EROSION HIDRICA	1975*	1993*	2000*	2009*
Ligera (0-10 ton/ha)	8,494.88	7,101.07	6,390.89	7,231.56
Moderada (10-50 ton/ha)	7,432.52	7,776.60	8,025.05	8,151.50
Alta (50-200 ton/ha)	5,751.18	7,986.94	8,055.81	7,378.63
Muy alta (> 200 ton/ha)	7,063.18	5,877.15	6,270.01	5,980.07

*Superficie en has.

Tomando en cuenta que la tasa máxima permisible de pérdidas de suelo es de 10 ton/ha, la superficie de la cuenca que presenta algún grado de degradación paso de 70.5 a 75% en el periodo de 1975 a 2010, indicando que si existe efecto del cambio de uso de suelo sobre el nivel de pérdida de suelo por erosión, los datos encontrados se encuentran por debajo de la media reportada en México de 3% anual.

5.4 Esguerrimiento medio anual

La textura del suelo predominante en la cuenca de San Cristóbal de las Casas es media, es decir, se trata de suelos medianamente permeables, lo que los ubica en la clase B de acuerdo con el cuadro 6 de la sección 4.

De modo que se utilizó la segunda columna de dicho cuadro para la identificación de los valores de K de acuerdo al uso de suelo (cuadro 11); se muestra la superficie que ocupa cada uso de suelo en los años especificados.

Cuadro 11. Valores de K utilizados para cada año de análisis según el uso de suelo.

	1975		1993		2000		2010	
Clase de uso de	SUPERFICIE		SUPERFICIE		SUPERFICIE		SUPERFICIE	
suelo	(HAS)	K_011	(HAS)	K_011	(HAS)	K_011	(HAS)	K_011
AT	10,096.74	0.27	9,654.48	0.27	10,325.07	0.27	9,093.64	0.27
BQ	8,090.64	0.22	7,529.13	0.22	7,173.54	0.22	8,303.15	0.22
BP	5,981.93	0.22	6,234.48	0.22	6,509.07	0.22	5,396.26	0.26
BMM	3,386.79	0.16	3,063.15	0.16	2,404.97	0.16	3,135.33	0.16
ZU	1,185.66	0.29	2,260.52	0.29	2,329.11	0.29	2,813.38	0.29

Dado que el valor del factor K para todas las clases y en los 4 años de estudio es superior a 0.15, se aplicó la fórmula:

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5}$$

para la obtención de los coeficientes de escurrimiento.

El cuadro 12 muestra los valores de coeficiente de escurrimiento para cada categoría así como el volumen medio anual de escurrimiento en metros cúbicos en cada unidad para los 4 años analizados.

Considerando a la cuenca en su totalidad, el promedio ponderado de K, entendido como el resultado de dividir la sumatoria de cada valor por el área que ocupa entre el superficie total, fue de 0.2334 en 1975, de 0.2359 en 1993, 0.2386 para 2000 y de 0.2436 en 2009.

Los coeficientes de escurrimiento obtenidos con la fórmula mencionada al inicio de esta hoja, son: 0.1903 para el año 1975; 0.1935 en 1993; 0.1969 para el 2000 y 0.2031 en el año 2009.

La evolución del volumen medio anual de escurrimiento a través de los 34 años se muestra en la figura 24 en la que se observa incremento en el escurrimiento en la cuenca del año 1975 al 2009 a razón de 5.15 millones de m³ en este periodo.

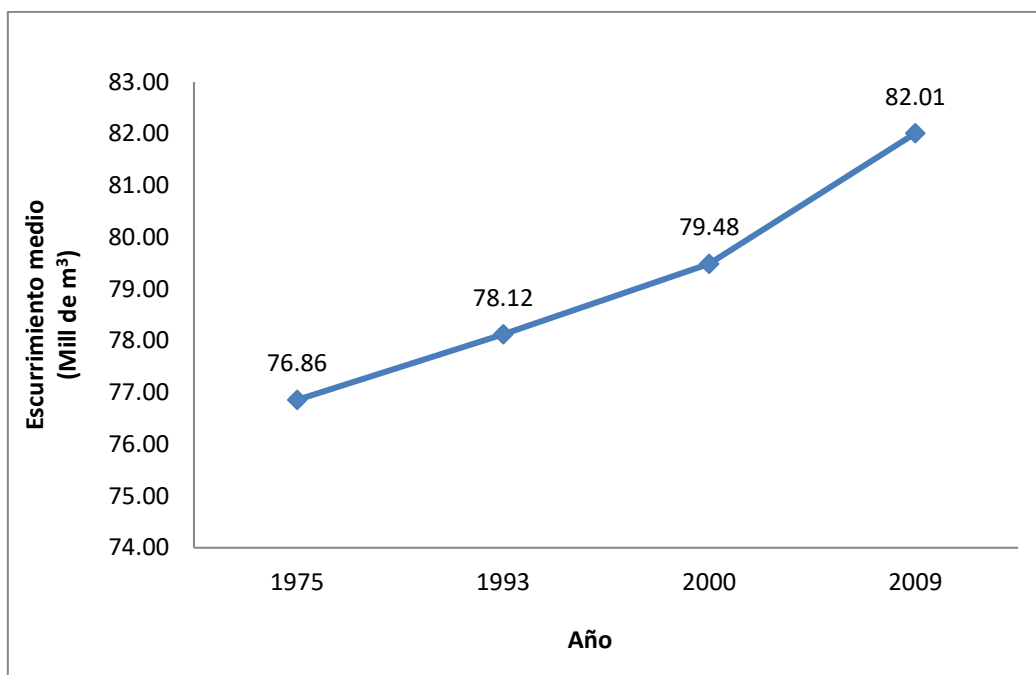


Figura 24. Tendencia del esguerrimiento superficial a lo largo de los años de estudio.

Los cambios de uso de suelo, y en particular el crecimiento de las zonas urbanas en la cuenca tuvo efecto en el esguerrimiento superficial estimado, ya que uno de los cambios que afectan en mayor medida los procesos hidrológicos en una cuenca es la urbanización (De et al 2003), que tiene influencia directa en el proceso de infiltración debido a la impermeabilización de las zonas naturales de drenaje.

La extensa alteración del bosque en la cuenca ha contribuido a un exceso de aguas pluviales y a la disminución de la recarga del manto acuífero. Aunque hay evidencia de la regeneración de los bosques en áreas donde los campos agrícolas se han abandonado, sigue habiendo una fuerte tendencia hacia bosques fragmentados y a la ocupación de estos por áreas urbanas.

Cuadro 12. Coeficientes de escurrimiento y escurrimiento medio anual.

Clase de uso	1975		1993		2000		2009	
	Ce	Vol. Esc. (m ³)	Ce	Vol. Esc. (m ³)	Ce	Vol. Esc. (m ³)	Ce	Vol. Esc. (m ³)
AT	0.2359	33460771.13	0.2359	31995113.84	0.2359	34217460.7	0.2359	30136471.7
BQ	0.1737	19742431.3	0.1737	18372258.78	0.1737	17504563.38	0.1737	20260985.3
BP	0.1737	14596847.97	0.1737	15213109.6	0.1737	15883152.3	0.2235	16940180.3
BMM	0.0991	4712801.207	0.0991	4262448.223	0.0991	3346574.638	0.0991	4362895.38
ZU	0.2608	4343738.281	0.2608	8281553.951	0.2608	8532837.632	0.2608	10306980.5

El crecimiento de la población ha contribuido a la tala de árboles y a la fragmentación del bosque a través de la cuenca. La efectividad de los bosques para proporcionar un servicio como un ecosistema que tenga funciones tales como filtración del agua, estabilidad del suelo, y agente que filtre los contaminantes, ha sido comprometida seriamente por la conversión de estas áreas a tierras de cultivos.

5.5 Repercusiones de los cambios de uso de suelo.

Por ser una zona que depende principalmente del turismo, se ha prestado poca atención a los efectos del cambio del uso del suelo en la región de San Cristóbal de las Casas, Chiapas tales como la erosión del suelo, la contaminación del agua de las poblaciones urbanas y rurales, las inundaciones, etc. A pesar de ser una de las regiones más húmedas de México, hay mucha gente dentro de la cuenca que no tiene acceso al agua potable y, peor aún, la disponibilidad de agua en los manantiales para abastecimiento humano es cada vez menor mientras la población es cada vez mayor.

A pesar de la regeneración de los bosques en áreas donde los campos agrícolas se han abandonado, el movimiento de campesinos dentro de Chiapas y el cambio de uso de suelo han provocado un aumento en el índice de degradación de la tierra. Aunque los efectos son un resultado de varios factores, el crecimiento de la población ha sido el factor más importante.

La repercusión más visible del cambio de uso, además de la disminución de agua subterránea, ha sido la reincidencia de inundaciones en la ciudad en años recientes (Herrera, 2009a), atribuidas a los azolves en los ríos y arroyos que atraviesan a esta.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se identificaron 5 usos de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas para los 4 años estudiados: Agricultura de temporal, Bosque de encino, Bosque de pino, Bosque mesófilo de montaña y Zona urbana.

Los principales cambios en uso de suelo observados en el periodo general de 1975 a 2009 fueron la disminución de áreas forestales, presentándose una tasa de deforestación de -0.19; y el crecimiento de zonas urbanas de 1,185.66 a 2,813.38 has.

Estos cambios repercutieron directamente en el porcentaje de superficie con degradación que paso de 70.5 a 75% en el periodo mencionado, en la distribución de las áreas con los más altos niveles de erosión hídrica, así como en la disminución de áreas con bajo nivel de erosión e incremento en superficies con tasa de erosión alta de 20.01 a 25.67% de la superficie total de la cuenca.

La pérdida de cubierta forestal en la cuenca, influyó en las condiciones hidrológicas en términos de incremento en los volúmenes de escurrimiento medio anual de 76. 86 millones de m³ en 1975, 78.12 en 1993, 79.48 en 2000 y 82.01 millones de m³ en 2009.

En base a lo anterior, se acepta la hipótesis propuesta de existencia de efectos del cambio de uso de suelo sobre los niveles de erosión hídrica y sobre los volúmenes de escurrimiento superficial en la cuenca de San Cristóbal de las Casas.

Por ser una zona históricamente afectada por conflictos sociales y con gran flujo poblacional, se recomienda un análisis de la dinámica de la población para entender a fondo los procesos de interacción entre los habitantes (usuarios) y los recursos naturales existentes en la cuenca, y de este modo poder elaborar planes de desarrollo urbano y de uso y manejo de los recursos, a fin de evitar que se agraven los problemas de degradación de suelos y disponibilidad de agua.

VII. LITERATURA CITADA

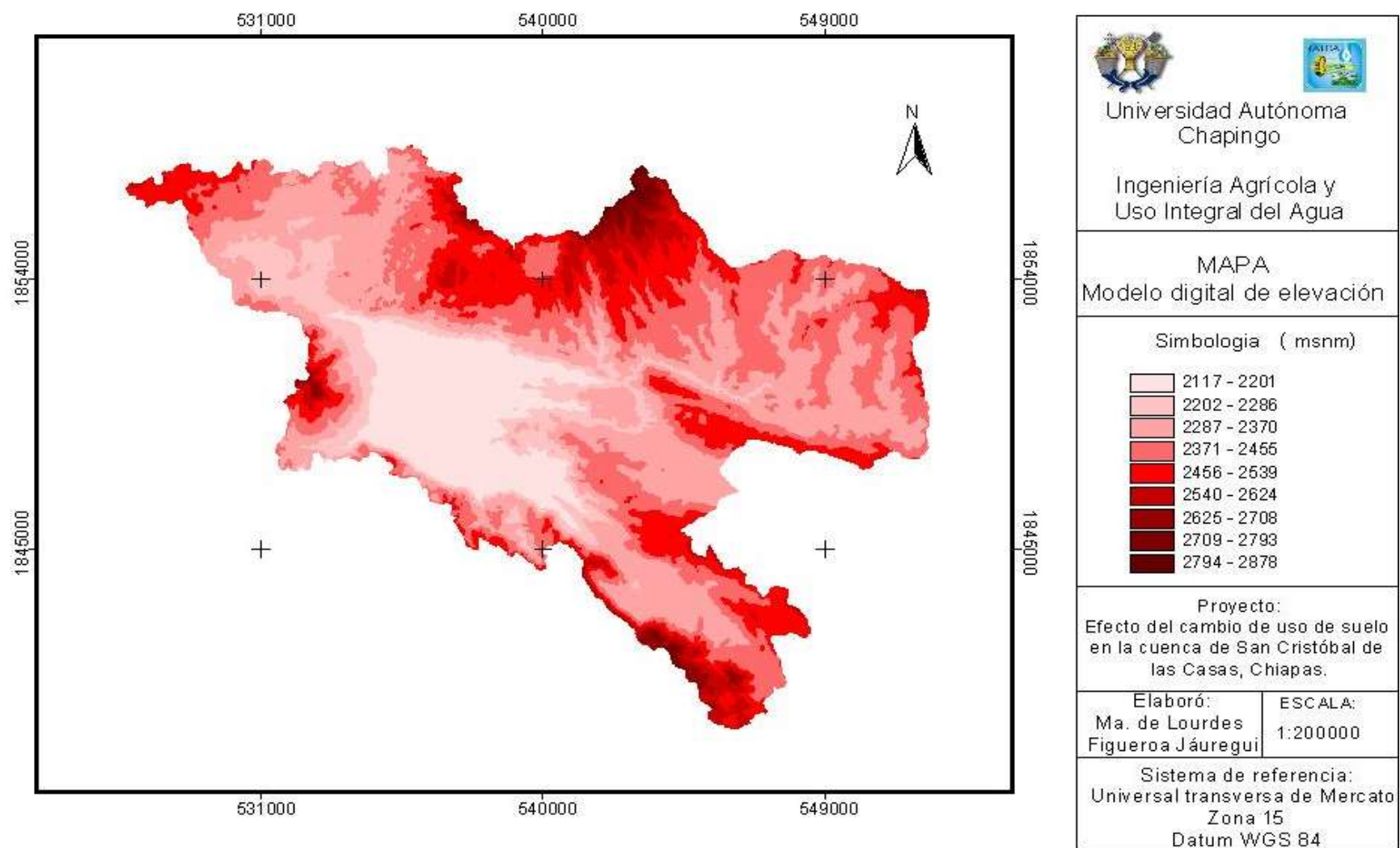
- Alvarado C.M., J.A. Colmenero R. y M.L. Valderrabano A. 2007. La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia ErgoSum*. Vol. 14 (003):317-326.
- Aparicio, M. 2001. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ed. Limusa. México.
- Ayala R.M. y M. Meneti. 2002. Alternativas a los problemas presentados en un proceso de clasificación basado en el reconocimiento espectral de patrones. *Revista internacional de ciencias de la tierra*. 75: 469-472.
- Bencala K., R. Hains, E. Liu, T. Nogueira, D. Segán y S. Stevens. 2006. Desarrollo de un Plan de Administración Sostenible para la Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. Tesis de maestría. University of California.
- Brath A., A. Castellarin and A. Montanari. 2002. Assessing the effects of land-use changes on annual average gross erosion. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(2):255–265.
- Brooks K. N., P. F. Folliott, H. M. Gregersen and J. L. Thames. 1992. *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa State University Press. 392 p.
- Chávez, Z.G. 2005. Del gobierno a la gobernabilidad de los recursos hídricos en México. En: *El Manejo Integral de Cuencas en México*. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Choi W. 2007. Estimating land-use change impacts on direct runoff and non-point source pollutant loads in the Richland Creek basin (Illinois, USA) by applying the L-THIA model. In: *Journal of Spatial Hydrology*. Vol. 7 (1): 47:65.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2000. Norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000: Conservación del recurso agua.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2004. *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2007. *Estadísticas del agua en México*. CNA-SEMARNAT. México.

- Cortés T.H.G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Cotler, H. 2007. El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. SEMARNAT-INE.
- Cotler H. y M.P. Ortega. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, México. *Catena* 65: 107-117.
- Cruz, B.G. 2003. La cuenca como unidad de planeación ambiental. En: Seminario sobre instrumentos económicos para cuencas ambientales. 26 de septiembre del 2003. INE-SEMARNAT. México.
- De R, A., Schmuck, G., Perdigao, V. and J. Thielen. 2003. The influence of historic land use changes and future planned land use scenarios on floods in the Oder catchment. *Physics and Chemistry of the Earth* 28: 1291–1300.
- Dourojeanni, A. 1998. Políticas públicas para el desarrollo sustentable: La Gestión Integrada de Cuencas. CNA-SEMARNAT. México.
- Eastman J.R. 2006. IDRISI Andes: Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs, Clark University, Worcester, MA. USA
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1981. Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO, PNUMA y UNESCO. Roma.
- Figueroa S. B., A. Amante O., H.G. Cortés T., J. Pimentel L., E.S. Osuna., J.M. Rodríguez O. y F.J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- García, G.A. 2005. La Cuenca hidrológica de San Cristóbal de la Casas, Chiapas: entre la gestión local y la nacional. En: problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México. Vargas S. y Mollard E. (Eds). IMTA-IRD. México.
- González-Espinosa M., N. Ramírez-Marcial., L. Galindo-Jaimes., A. Camacho-Cruz., D. Golicher., L. Cayuela y J.M. Rey-Benayas. 2009. Tendencias y proyecciones del uso del suelo y la diversidad florística en Los Altos de

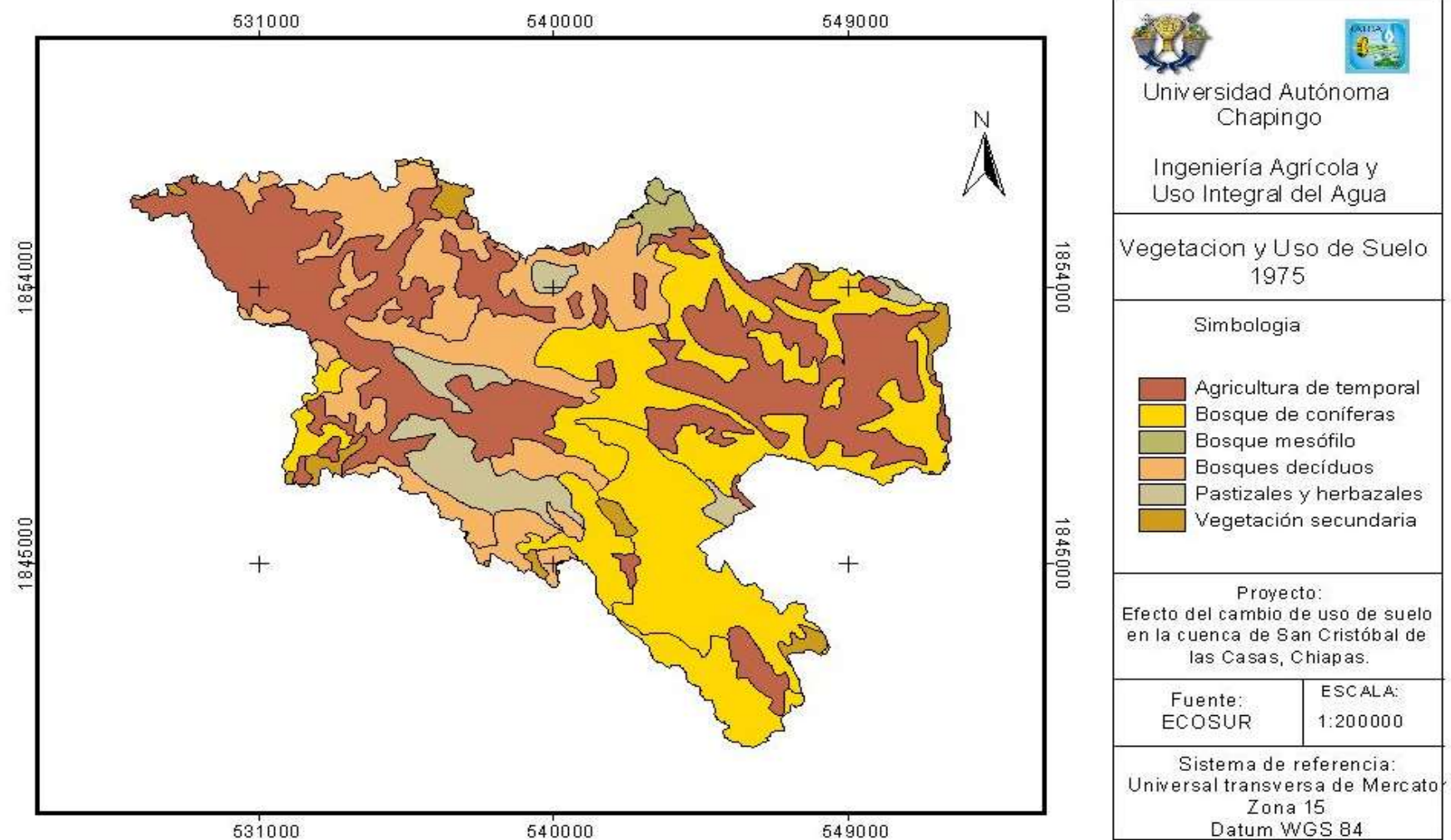
- Chiapas, México. Investigación ambiental: Ciencia y política pública. 1:40-53. INE. México.
- González, G.R. 2003. Automatización del sistema de evaluación y diagnóstico ecológico para el ordenamiento del territorio (SEDEOT): índice de erosión hídrica. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Heathcote, I.W. 1998. Integrated Watershed Management. University of Guelph. Ed. John Wiley & Sons. Canada.
- Henríquez, C., Azócar, G. y M. Aguayo. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile¹. Revista de Geografía Norte Grande 36: 61-74
- Henríquez, E. 2008. Gobierno entrega decretos. En: Cuarto poder. 3 de febrero de 2008. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México.
- Herrera, C. 2009a. Prevén riesgo por periodo de lluvias. En: Cuarto poder. 15 de mayo de 2009. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México.
- Herrera, C. 2009b. Ven pronta extinción de ríos. En: Cuarto poder. 26 de abril de 2009. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México.
- INEGI. 2000. Mapa edafológico 1:250,000.
- INEGI. 2005. II Censo Nacional de Población y Vivienda.
- Jewitt G.P.W., J.A. Garratt, I.R. Calder and L. Fuller. 2004. Water resources planning and modelling tools for the assessment of land use change in the Luvuvhu Catchment, South Africa. Physics and Chemistry of the Earth 29: 1233–1241
- Kauffer M. E. F. 2005. El consejo de cuenca de los ríos Usumacinta y Grijalva: los retos para concretar la participación y la perspectiva de cuencas. En: Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México. Vargas S. y Mollard E. (Eds). IMTA-IRD. México.
- Lal, R. 2000. Integrated Watershed Management in the global ecosystem. Soil and water conservation society. USA.
- Lopez T.M., T. Mitchel A. and F.N. Scatena. 1998. The effect of land use on soil erosion in the Guadiana watershed in Puerto Rico. In: Caribbean Journal of Science 34 (3-4): 298-307.

- Martínez, M. 2008. Fracasaré decreto si no hay crecimiento adecuado. En: Cuarto poder. 11 de febrero de 2008. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México.
- Mas, J.F., Velázquez, A., y S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. En: Investigación ambiental. Ciencia y Política pública. INE. México.
- Miranda A. L., L. Alicia Ibáñez-Castillo², J. René Valdez-Lazalde¹, Patricia Hernández-de la Rosa. 2009. Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río grande, Tlachapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia* 43: 333-344.
- Mustafa Y.M., M.S.M Amin, T.S.Lee and A.R.M Shariff. 2005. Evaluation of Land Development Impact on a tropical Watershed Hydrology Using Remote Sensing and GIS. In: *Journal of Spatial Hydrology* 5 (2): 16-30.
- Návar J. and T.J. Synnott. 2000. Surface runoff, soil erosion, and land use in northeastern Mexico. *Terra* 18 (3): 247-253.
- Palacio P. J. L., M. T. Sánchez., S. J. M. Casado., I. E. Propin., F. J. Delgado., C. A. Velázquez., M. L. Chias., B. M. I. Ortiz., A.J. González., S. G. Negrete., F. J. Gabriel M., y R. Márquez H. 2004. Indicadores para la Caracterización y Ordenamiento del Territorio. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM. México. 161 p.
- Schwab, G. O.; Richard K. Fravert; Talcott W. Edminster; Kenneth K. Barnes. 1990. Ingeniería de conservación de suelos y aguas. Ed. Noriega México.
- SRH. 1971. Boletín hidrológico núm. 38. Tomo 1.
- Tollan A. 2002. Land-use change and floods: what do we need most, research or management? In: *Water Science and Technology*. 45. (8): 183-190.
- Velázquez A., Mas J.F., Díaz-Gallegos J.R., Mayorga-Saucedo R., Alcántara P.C., Castro R., Fernández T., Bocco G., Ezcurra E. y J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México. *Gaceta ecológica* 62. INE. México.
- Wischmeier W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook* 537. USDA-SCS 58 p.

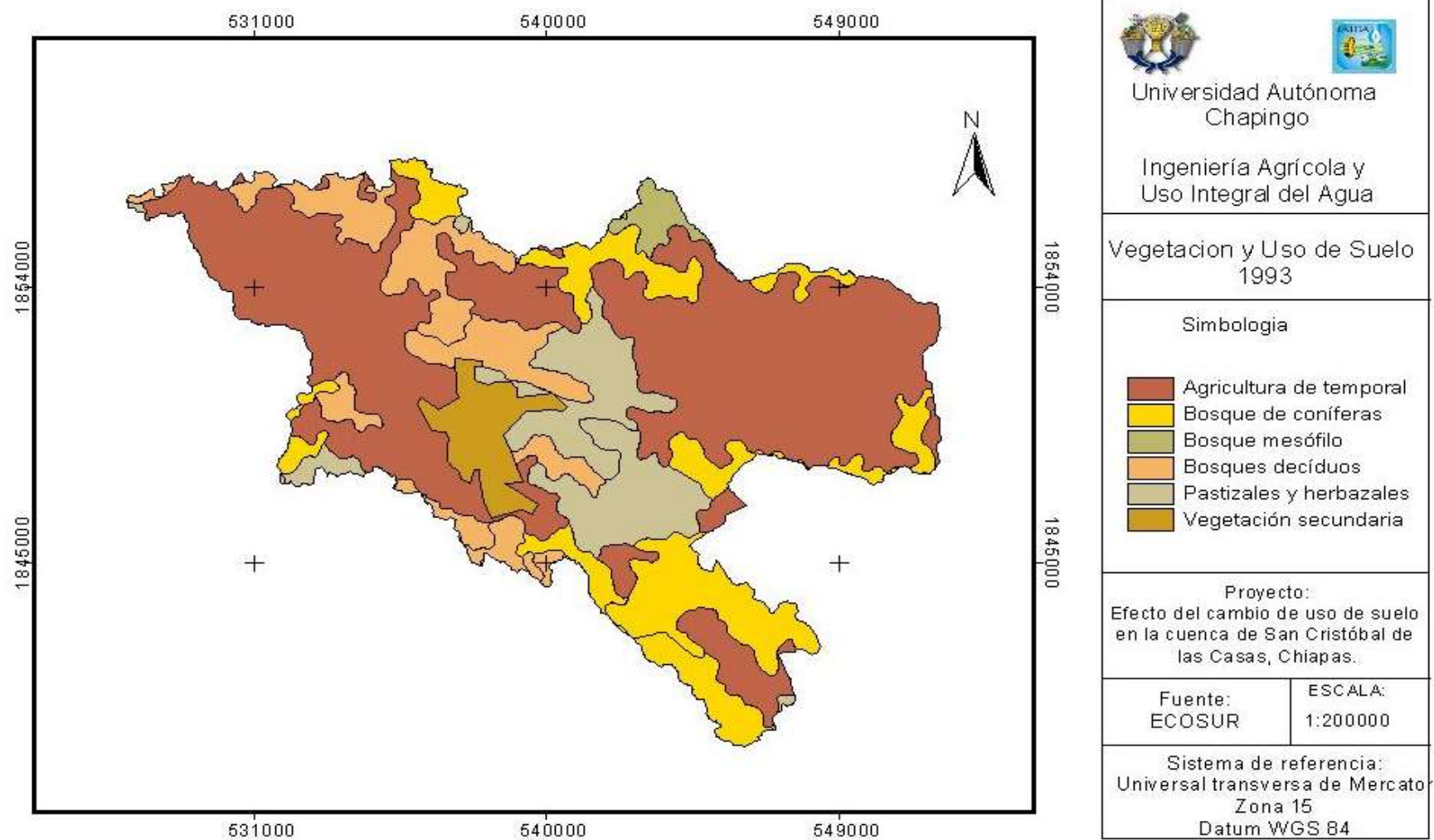
ANEXOS



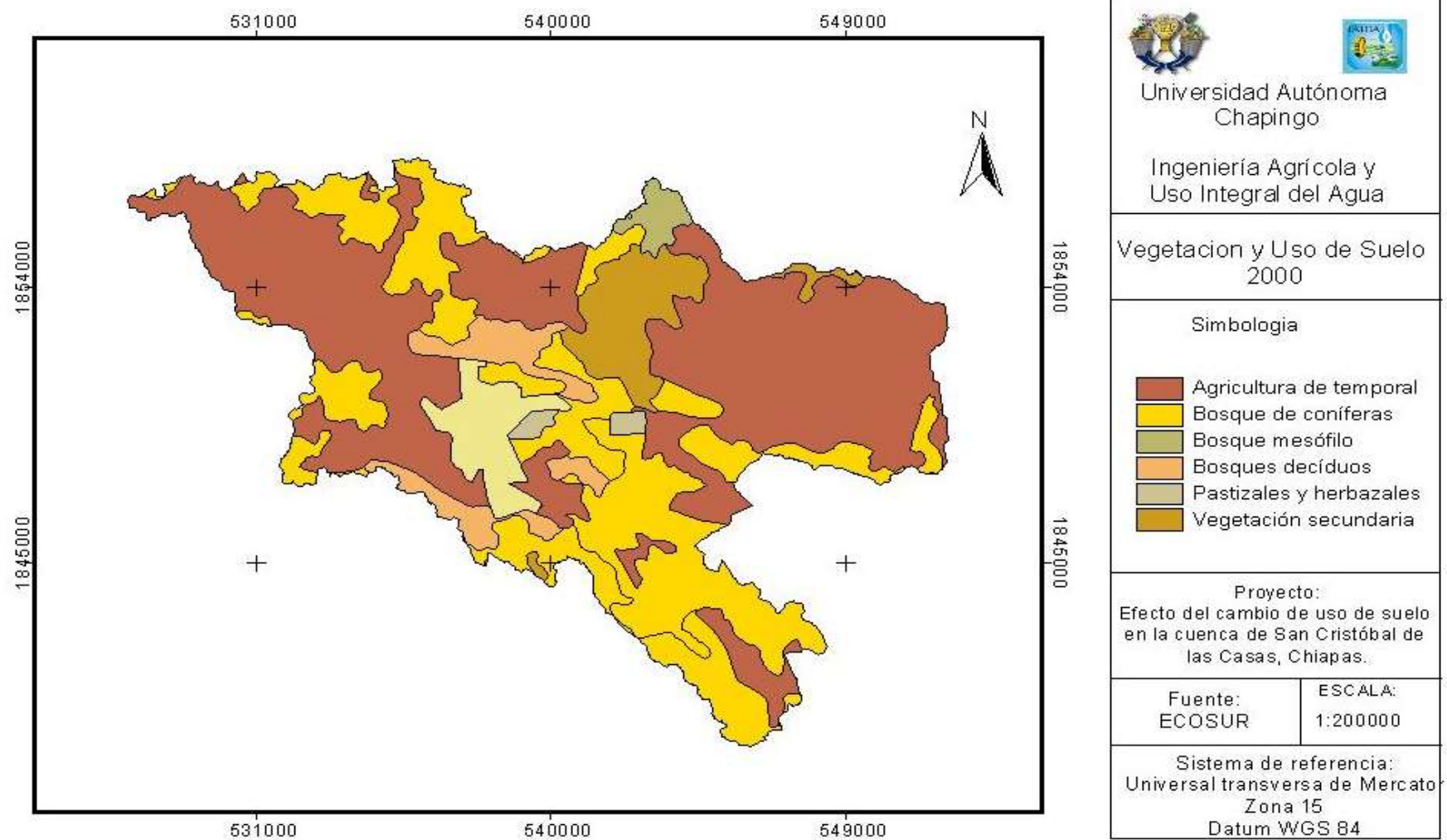
Anexo 1. Modelo digital de elevaciones



Anexo 2. Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo 1975.



Anexo 3. Datos vectoriales de vegetacion y uso de suelo 1993.



Anexo 4. Datos vectoriales de vegetación y uso de suelo 2000.

Anexo 5. Ecuaciones que estiman el factor R (EI₃₀).

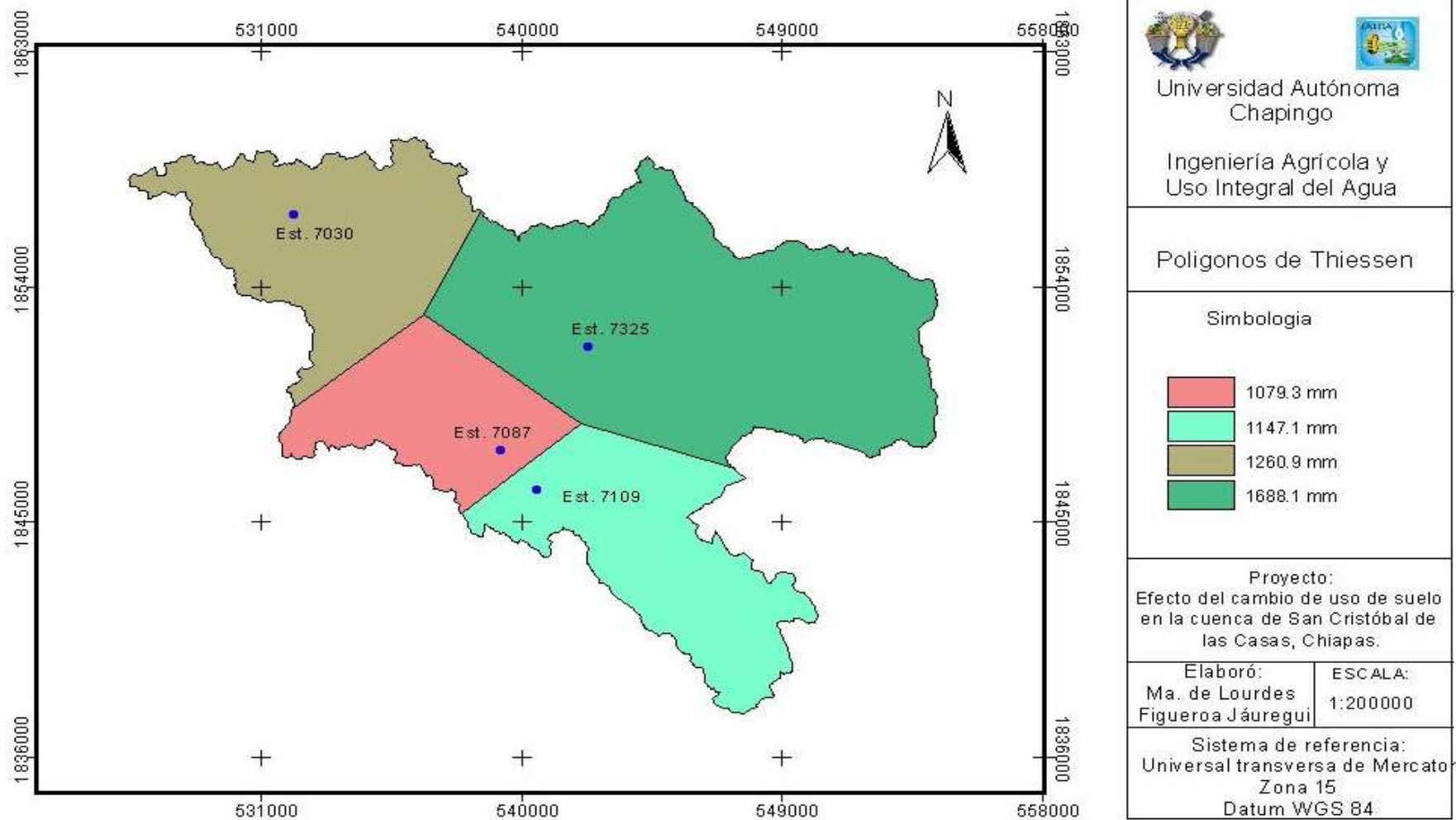
Región	Ecuación	R²
I	$Y = 1.2078X + 0.002276X^2$	0.92
II	$Y = 3.4555X + 0.006470X^2$	0.93
III	$Y = 3.6752X - 0.001720X^2$	0.94
IV	$Y = 2.8959X + 0.002983X^2$	0.92
V	$Y = 3.4880X - 0.000188X^2$	0.94
VI	$Y = 6.6847X + 0.001680X^2$	0.90
VII	$Y = -0.0334X + 0.006661X^2$	0.98
VIII	$Y = 1.9967X + 0.003270X^2$	0.98
IX	$Y = 7.0458X - 0.002096X^2$	0.97
X	$Y = 6.8938X + 0.000442X^2$	0.95
XI	$Y = 3.7745X + 0.004540X^2$	0.98
XII	$Y = 2.4619X + 0.006067X^2$	0.96
XIII	$Y = 10.7427X - 0.001008X^2$	0.97
XIV	$Y = 1.5005X + 0.002640X^2$	0.95

Fuente: Cortés, 1991.

Anexo 6. Valores del exponente (m) dependiendo del grado de inclinación.

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

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.



Anexo 7. Mapa de poligonos de Thiessen.