

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional  
Unidad Oaxaca



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE  
RECURSOS NATURALES

---

**“ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO HÍDRICO DEBIDO AL CAMBIO DE USO  
DEL SUELO EN LA SUBCUENCA ATOYAC DEL ESTADO DE OAXACA A  
TRAVÉS DE UN SIG”**

---

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO  
DE MAESTRO EN CIENCIAS  
PRESENTA:

**Diana Rocio Villarreal Hernández**

Director de tesis: Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Junio de 2011



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 03 del mes de junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **"Estimación del escurrimiento hídrico debido al cambio de uso de suelo en la subcuenca Atoyac del Estado de Oaxaca a través de un SIG"**

**Villarreal**

**Hernández**

**Diana Rocío**

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro: 

A	0	9	0	2	6	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dra. Lucila Lagrera Rivera

Dr. Magdalena Caballero Caballero

Dr. Francisco Castellanos León

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramirez

CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C I I D I R  
UNIDAD OAXACA  
IPN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 03 del mes junio del año 2011, el (la) que suscribe **Villarreal Hernández Diana Rocío** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A090265**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estimación del escurrimiento hídrico debido al cambio de uso de suelo en la subcuenca Atoyac del Estado de Oaxaca a través de un SIG”** y cede los derechos al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [dianasmile\\_villarreal@hotmail.com](mailto:dianasmile_villarreal@hotmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



---

**Villarreal Hernández Diana Rocío**

## RESUMEN

Se estudió el comportamiento del ciclo hidrológico, en particular la estimación de la lámina de escurrimiento hídrico en la subcuenca Atoyac, Oaxaca ocasionado por los cambios en las coberturas de uso de suelo durante un período de 15 años (1990-2005) a partir de la integración de imágenes de satélite (cobertura de suelo, modelo numérico de altitud y cartografía (edafología), utilizando el software SIG (Idrisi) para el procesado de la información. Se utilizó la cuenca hidrográfica como unidad de análisis la cual tiene diferentes características hidrogeológicas, lo que permitió relacionar parámetros morfológicos y climatológicos facilitando el análisis de los cambios de cobertura del suelo y sus efectos en la esorrentía.

La clasificación de las coberturas (bosque, agricultura, agua, zona urbana y pastizal) en el período de estudio, se realizó utilizando el método de máxima probabilidad, lo que permitió estimar sus cambios, siendo que para el bosque ocupaba un área del 40.96% en 1990, disminuyendo a 29.67% en 2005. La agrícola pasó de 47.84% a 53.74%. Las áreas con cuerpos de agua cambió de 0.06% a 0.12 %. El área urbana pasó de 7.37% a 14.22%, y las áreas de pastizal cambió de 3.77% a 2.25% en el periodo analizado. Los cambios de las coberturas mencionadas juegan un papel importante en la variación del tirante de la lámina de escurrimiento superficial provocando la disminución de zonas de infiltración que afectan las zonas de recarga del acuífero presentes en la zona. En particular, el crecimiento de la zona urbana ha favorecido en varios lugares la disminución de áreas de infiltración.

La variación de la lámina de escurrimiento para el periodo de 15 años debido a los cambios de uso de suelo en la subcuenca Atoyac fue de 12.1 mm para 1990 y de 15.1 mm para 2005. La metodología empleada en este estudio es una herramienta importante de planificación y toma de decisiones en estudios hidrológicos a nivel de cuenca.

Palabras clave: Cuenca, SIG, cambio, uso-suelo.

## ABSTRACT

The behavior of the hydrological cycle in Oaxaca, Mexico, was studied with a focus on estimation of runoff flow in the Atoyac subbasin produced as a result of changes in soil cover over a period of 15 years (1990-2005). Satellite images (soil cover, numerical altitude model, and cartography (edaphology)) were integrated using GIS (Idrisi) software for information processing. The hydrographic basin was used as the unit of analysis; the different hydrogeological characteristics of this basin made it possible to relate morphological and climatological parameters, facilitating analysis of changes in soil cover, and the effects of these changes on runoff.

Soil cover (forest, agricultural, water, urban area, and pastureland) during the period of study was classified using the maximum probability method, which made it possible to estimate changes over the period of study. Forest occupied 40.96% of the total area of study in 1990, dropping to 29.67% in 2005. Agricultural land increased from 47.84% in 1990 to 53.74% in 2005. The area covered by bodies of water increased slightly from 0.06% to 0.12%; urban areas increased from 7.37% to 14.22%, and pastureland decreased from 3.77% to 2.25% over the analyzed period. Changes in the above-mentioned soil covers were found to play an important role in variations in surface runoff levels, causing a decrease in infiltration areas, and affecting local aquifer recharge areas. The growth of the urban area in particular has facilitated a decrease in infiltration areas in several sites.

The variation in runoff as a result of changes in soil use in the Atoyac subbasin was found to be 3mm, rising from 12.1mm in 1990 to 15.1mm in 2005. The methodology used in this study is an important tool for urban planning and decision making regarding hydrological studies at the basin level.

Keywords: Basin, GIS, changes, soil use.

## DEDICATORIAS

A **Dios** por llenar mi vida de dicha y bendiciones.

A **mi madre** por su cariño y comprensión.

A **mis hermanos y familia** por su compañía y apoyo.

A aquellas personas que han estado en diferentes etapas de mi vida, algunas ausentes por la distancia y otras físicamente, sin importar donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí

## AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional** por la oportunidad de aceptarme como una de sus alumnas. Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de Maestría. Al **Espacio Común de Educación Superior (ECOES)** por el apoyo financiero a través de una beca de movilidad estudiantil. A la **COFAA (Comisión y Fomento de Actividades Académicas del Instituto Politécnico Nacional)** por las becas asignadas a los proyectos: Caracterización hidrogeológica para evaluar la calidad y cantidad de agua subterránea en el valle de Zaachila, Oaxaca con clave SIP 20090675. Evaluación de la calidad del agua en el Río de Los perros, Oaxaca con clave SIP 20100555. Metodología para la evaluación de zonas de riesgo por taludes debido a fenómenos hidrometeorológicos con clave SIP 20110019. Al **Sistema de Becas Institucional de Posgrado** por la asignación de la beca tesis.

A mis profesores del CIIDIR Oaxaca, por su comprensión, enseñanzas y por la gran calidad humana que me han demostrado, porque de alguna forma han contribuido en lo que ahora soy, especialmente a la comisión revisora y jurado de tesis integrado por el **Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Magdaleno Caballero Caballero, Francisco Castellanos León, Luicita Lagunez Rivera, y al Dr. Pastor Teodoro Matadamas** por la revisión, comentarios y sugerencias de la presente tesis

A mi director de tesis **Dr. Salvador I. Belmonte Jiménez** un gran ser humano, por la oportunidad, confianza y enseñanzas en la realización de este trabajo, por sus comentarios alentadores no solo en el ámbito académico sino también en el personal. A la **M. en C. María Ladrón de Guevara** por el apoyo brindado durante la maestría, es satisfactorio conocer personas como usted.

.

Al **Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA)** por las facilidades otorgadas durante mi estancia. Un agradecimiento especial al **Dr. Héctor Martínez Valdés** por su valiosa amistad, conocimientos, paciencia, esfuerzo y disposición en la mejora de este trabajo; por enseñarme que no hay límites, que lo que me proponga lo pueda lograr y que solo depende de mí.

A **mis amigos** porque siempre me han tendido su mano, por su gran amistad y por los momentos inolvidables que hemos vivido. Y a todas aquellas personas que contribuyeron al término de esta etapa. Doy gracias a Dios por ponerlos en mi camino.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 HIPÓTESIS.....	4
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES.....	5
2.2 MARCO TEORICO.....	6
2.2.1 Definición de cuenca hidrológica.....	6
2.2.2 Teledetección.....	7
2.2.3 Principales aplicaciones de la teledetección.....	8
2.2.4 El espectro electromagnético.....	8
2.2.5 Componentes de un sistema de teledetección.....	9
2.2.6 Firmas espectrales.....	9
2.2.7 Características de los sensores.....	10
2.2.8 Resolución de un sistema de sensor de teledetección.....	11
2.2.9 Correcciones de imagen satelital.....	12
2.2.10 Transformación.....	14
2.2.11 Categorización de imágenes: clasificación digital.....	14
2.2.12 Manejo de imágenes satelitales.....	15
2.2.13 Método de clasificación de máxima probabilidad (maxlike).....	15
2.2.14 Sistema del ciclo hidrológico en el software de SIG Idrisi.....	16

CAPITULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 AREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO.....	20
3.2 METODOLOGÍA.....	21
3.3 DELIMITACIÓN DE LA SUBCUENCA Y PARÁMETROS FISIOGRAFICOS.....	23
3.4 ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO HIDRICO.....	27
3.4.1 Precipitación.....	27
3.4.2 Evapotranspiración.....	31
3.4.3 Infiltración.....	33
3.4.4 Escurrimiento.....	44
3.5 ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO.....	45
CAPITULO 4 RESULTADOS.....	46
4.1 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS DE LA SUBCUENCA.....	46
4.2 COBERTURAS DE USO DE SUELO.....	49
4.3 PRECIPITACIÓN.....	57
4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	58
4.5 INFILTRACIÓN.....	61
4.6 ESTIMACIÓN DE LA LÁMINA DE ESCURRIMIENTO.....	68
4.7 ANALISIS ANUAL DEL ESCURRIMIENTO 1990 Y 2005.....	75
4.8 ANALISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE SUELO.....	82
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
5.1 Conclusiones.....	88
5.2 Recomendaciones.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	90

## ANEXOS

	Pág.
A IMÁGENES DE PRECIPITACION PROMEDIO EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	95
a1. Imagen superficial de la precipitación del mes de enero.....	96
a2. Imagen superficial de la precipitación del mes de febrero.....	96
a3. Imagen superficial de la precipitación del mes de marzo.....	97
a4. Imagen superficial de la precipitación del mes de abril.....	97
a5. Imagen superficial de la precipitación del mes de mayo.....	98
a6. Imagen superficial de la precipitación del mes de junio.....	98
a7. Imagen superficial de la precipitación del mes de julio.....	99
a8. Imagen superficial de la precipitación del mes de agosto.....	99
a9. Imagen superficial de la precipitación del mes de septiembre.....	100
a10. Imagen superficial de la precipitación del mes de octubre.....	100
a11. Imagen superficial de la precipitación del mes de noviembre.....	101
a12. Imagen superficial de la precipitación del mes de diciembre.....	101
B IMÁGENES DE TEMPERATURA PROMEDIO EN LA ZONA DE ESTUDIO.	102
b1. Imagen superficial de la temperatura del mes de enero.....	103
b2. Imagen superficial de la temperatura del mes de febrero.....	103
b3. Imagen superficial de la temperatura del mes de marzo.....	104
b4. Imagen superficial de la temperatura del mes de abril.....	104
b5. Imagen superficial de la temperatura del mes de mayo.....	105
b6. Imagen superficial de la temperatura del mes de junio.....	105
b7. Imagen superficial de la temperatura del mes de julio.....	106

b8. Imagen superficial de la temperatura del mes de agosto.....	106
b9. Imagen superficial de la temperatura del mes de septiembre.....	107
b10. Imagen superficial de la temperatura del mes de octubre.....	107
b11. Imagen superficial de la temperatura del mes de noviembre.....	108
b12. Imagen superficial de la temperatura del mes de diciembre.....	108
C IMÁGENES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PROMEDIO EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	109
c1. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de enero.....	110
c2. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de febrero.....	110
c3. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de marzo.....	111
c4. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de abril.....	111
c5. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de mayo.....	112
c6. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de junio.....	112
c7. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de julio.....	113
c8. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de agosto.....	113
c9. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de septiembre.....	114
c10. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de octubre.....	114
c11. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de noviembre.....	115
c12. Imagen superficial de evapotranspiración del mes de diciembre.....	115

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
2.1 Esquema de una cuenca hidrológica.....	7
2.2 Espectro electromagnético.....	9
2.3 Firma espectral de diversas características naturales de la superficie de la tierra. ....	10
3.1 Ubicación geográfica de la subcuenca Atoyac del estado de Oaxaca.	20
3.2 Diagrama general del trabajo de investigación.....	21
3.3 Requerimientos de entrada de los módulos del ciclo del agua.....	22
3.4 Módulo de importación del punto de salida de la cuenca.....	24
3.5 Módulo del ciclo hidrológico.....	25
3.6 Módulo para la delimitación de cuencas hidrológicas.....	25
3.7 Módulo para la estimación de parámetros de cuenca.....	26
3.8 Mascara de la subcuenca Atoyac.....	26
3.9 Distribución espacial de las estaciones climatológicas presentes en la zona de estudio.....	27
3.10 Base de datos de las estaciones climatológicas de la zona de estudio.....	28
3.11 Base de datos de precipitación promedio (mm) de la zona de estudio.	29
3.12 Distribución espacial de la precipitación promedio registradas en las estaciones climatológicas de la zona de estudio.....	29
3.13 Módulo para la generación de la imagen superficial de precipitación....	30
3.14 Base de datos de temperatura de la zona de estudio.....	31
3.15 Módulo para la interpolación de temperatura de la zona de estudio....	32
3.16 Módulo de estimación evapotranspiración.....	33
3.17 Mosaico de una imagen satelital de cobertura de suelo.....	35
3.18 Imagen raster de descripción edafológica de la zona de estudio.....	40
3.19 Imagen vectorial de edafología de la zona de estudio.....	41
3.20 Imagen de permeabilidad según tipo de suelo en la zona de estudio...	42
3.21 Imagen del porcentaje de pendiente presente en la subcuenca.....	42

3.22	Módulo de estimación de la infiltración para 1990.....	43
3.23	Módulo para la estimación del escurrimiento hídrico.....	44
3.24	Módulo de Land Change Modeler para el análisis de coberturas de suelo.....	45
4.1	Imagen compuesta del MNA y la red de drenaje de la subcuenca.....	46
4.2	Tipos de clima que prevalecen en la subcuenca de estudio.....	47
4.3	Grafica de la curva hipsometrica de la subcuenca Atoyac.....	48
4.4	Imagen de NDVI según cobertura de suelo 1990.....	49
4.5	Imagen de NDVI según cobertura de suelo 2005.....	50
4.6	Imagen compuesta en falso color (BGR, 247) de 1990.....	51
4.7	Imagen compuesta en falso color (BGR, 247) de 2005.....	51
4.8	Firmas espectrales generados con el módulo de SIGCOMP.....	52
4.9	Imágenes resultado de la clasificación con maxlike 1990.....	53
4.10	Imágenes resultado de la clasificación con maxlike 2005.....	53
4.11	Imagen clasificada y filtrada de la cobertura de suelo de 1990.....	54
4.12	Imagen clasificada y filtrada de la cobertura de suelo de 2005.....	54
4.13	Imagen clasificada requerida en el proceso de infiltración para 1990...	56
4.14	Imagen clasificada requerida en el proceso de infiltración para 2005...	56
4.15	Imagen de distribución superficial total de la precipitación promedio del área de estudio.....	57
4.16	Hietograma de precipitación promedio mensual anual del área de estudio.....	58
4.17	Imagen de distribución espacial de la temperatura promedio anual....	59
4.18	Imagen de distribución de la evapotranspiración promedio anual.....	60
4.19	Histograma de la evapotranspiración mensual en la subcuenca.....	60
4.20	Imagen del coeficiente de escurrimiento generado para 1990.....	61
4.21	Imagen del coeficiente de escurrimiento generado para 2005.....	62
4.22	Imagen superficial de infiltración de junio de 1990.....	62
4.23	Imagen superficial de infiltración de junio de 2005.....	63
4.24	Imagen superficial de infiltración de julio de 1990.....	63
4.25	Imagen superficial de infiltración de julio de 2005.....	64
4.26	Imagen superficial de infiltración de agosto de 1990.....	64
4.27	Imagen superficial de infiltración de agosto de 2005.....	65

4.28	Imagen superficial de infiltración de septiembre de 1990.....	65
4.29	Imagen superficial de infiltración de septiembre de 2005.....	66
4.30	Imagen superficial total anual de infiltración de 1990.....	67
4.31	Imagen superficial total anual de infiltración de 2005.....	67
4.32	Imagen vectorial generada en la estimación de la lámina de escurrimiento.....	68
4.33	Lámina de escurrimiento superficial de junio de 1990.....	69
4.34	Lámina de escurrimiento superficial de junio de 2005.....	70
4.35	Lámina de escurrimiento superficial de julio de 1990.....	70
4.36	Lámina de escurrimiento superficial de julio de 2005.....	71
4.37	Lámina de escurrimiento superficial de agosto de 1990.....	71
4.38	Lámina de escurrimiento superficial de agosto de 2005.....	72
4.39	Lámina de escurrimiento superficial de septiembre de 1990.....	72
4.40	Lámina de escurrimiento superficial de septiembre de 2005.....	73
4.41	Lámina de escurrimiento superficial de octubre de 1990.....	73
4.42	Lámina de escurrimiento superficial de octubre de 2005.....	74
4.43	Lamina de escurrimiento anual del 1990.....	76
4.44	Lamina de escurrimiento anual del 2005.....	77
4.45	Relación de ganancias y pérdidas de las coberturas de suelo.....	82
4.46	Grafica de cambio por clase de cobertura.....	83
4.47	Análisis de la variación neta experimentada en la cobertura bosque...	84
4.48	Análisis de la variación neta experimentada en la cobertura agricultura.....	85
4.49	Análisis de la variación neta experimentada en la cobertura agua.....	85
4.50	Análisis de la variación neta experimentada en la cobertura zona urbana.....	85
4.51	Análisis de la variación neta experimentada en la cobertura pastizal...	85
4.52	Imagen de cambios de cobertura entre los años 1990 y 2005.....	86
4.53	Imagen de cambios de cobertura en la subcuenca Atoyac.....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Nombre</b>	<b>Pág.</b>
2.1	Características de la resolución radiométrica de las imágenes de bandas.....	12
2.2	Coeficiente de escurrimiento.....	19
3.1	Tipos de cobertura.....	36
3.2	Coberturas de uso de suelo de interés en la clasificación.....	37
3.3	Clasificación de coberturas de uso de suelo requerida en la infiltración	38
3.4	Descripción edafologica según tipo de suelo presente en la zona de estudio.....	39
4.1	Parámetros fisiográficos generados en la subcuenca Atoyac.....	48
4.2	Análisis de la vegetación en el mosaico.....	49
4.3	Coberturas de uso de suelo de interés en el estudio.....	50
4.4	Resultados del análisis de los cambios de cobertura de suelo.....	55
4.5	Resumen de los resultados del balance hídrico de la subcuenca Atoyac.....	74
4.6	Características hidrológicas y edafológicas.....	78
4.7	Características hidrológicas y edafológicas.....	79
4.8	Análisis de contribución (+) y pérdidas (-) de coberturas de suelo.....	84

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del crecimiento acelerado de la población, cada vez se ejerce una enorme presión sobre los recursos naturales, lo que ha traído consigo también, la transformación de los ecosistemas naturales, así como, el deterioro del medio ambiente, y por ende, la pérdida irreversible de muchas especies de flora y fauna.

En la actualidad, los cambios de cobertura de suelo es uno de los problemas al que se enfrentan en el estado de Oaxaca, ya que se requieren de estos para retener el agua de escurrimiento que se presentan durante las precipitaciones pluviales, para así, favorecer la recarga de los mantos acuíferos de la zona.

El estudio de los cambios de cobertura de suelo de la Subcuenca Atoyac, que se ubica en los Valles Centrales del estado de Oaxaca, es de trascendental importancia para el estado, porque abastece de agua a los mayores centros urbanos de la zona. Debido al crecimiento urbano descontrolado y acelerado, han traído consigo por un lado, una alta demanda de agua y por el otro, la disminución de disponibilidad del recurso, lo que ha ocasionado por consecuencia, una sobreexplotación del manto acuífero de la zona.

La presente investigación se llevó a cabo en la subcuenca Atoyac, ubicada en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, México. Donde, debido al cambio de uso de suelo que se han dado durante un período de 15 años (1990-2005), como producto de las diversas actividades humanas realizadas, tales como: la tala indiscriminada de los bosques, los asentamientos humanos irregulares y el crecimiento de las zonas de cultivo, se estimaron los cambios que han sufrido los escurrimientos de agua en la subcuenca.

La estimación de los cambios presentados en los escurrimientos, se llevó a cabo empleando el módulo del ciclo del agua implementado en el software de SIG Idrisi. Para ello, se requirieron de imágenes satelitales de cobertura de suelo, de edafología, de los registros de las bases de datos climatológicas y de parámetros de las características físicas de los tipos de suelo de la zona de análisis de estudio.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las coberturas del suelo se han ido transformado, desde que, los seres humanos comenzaron a utilizarlo y aprovechar los recursos naturales de su entorno. Sin embargo, los cambios que se han dado en los últimos 50 años, han sido muy notorios (Metzger et al., 2006) debido al aumento de la población, que se han traducido en cambios sustanciales en los ecosistemas naturales.

Uno de los principales problemas, que se ha manifestado en la subcuenca Atoyac ubicado en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, es sin duda, el cambio de uso de suelo, debido al crecimiento acelerado y consigo el urbano. Además, de múltiples cambios en los procesos naturales de la zona como la: erosión, deforestación, urbanización sin una adecuada planificación, prácticas agrícolas incompatibles con la zona, el aumento de las aguas residuales vertidas al cauce del río Atoyac, cauce principal de esta subcuenca.

Los cambios del uso de suelo de la zona, han conducido a la variación en la lámina de agua de escorrentía y subsecuentemente, en el de infiltración y por consecuencia, a la del agua subterránea.

Los factores antes mencionados, se ven seriamente alterados debido al cambio de uso de suelo de diferente manera, los cuales, se pueden analizar de manera directa e indirecta. De la manera indirecta, se puede realizar a través del empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), empleando la cartografía, la fotografía aérea y las imágenes satelitales, etc.

Mientras que, existen diferentes métodos directos e indirectos, que permiten estimar los cambios de uso de suelo. El método directo, implica un arduo trabajo de campo con altos costos económicos, mientras que, el método indirecto, contempla el empleo de imágenes digitales como una alternativa para analizar los cambios de uso de suelo a través de los SIG.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento acelerado de la población, ha propiciado una enorme presión sobre los recursos naturales, el agua, es uno de ellos, ya que, la demanda de agua por parte de ésta, se ha incrementado de forma acelerada en los últimos años en la subcuenca Atoyac, ubicado en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, México.

Para analizar el comportamiento hidrológico de la esorrentía en la zona, se requiere realizar un balance hídrico de la subcuenca Atoyac, mediante, el empleo de un método directo o indirecto para la estimación. Emplear el método indirecto en la estimación, requiere del empleo de un software de SIG, el cual, permite el manejo de una gran cantidad de datos en forma digital y numérica. Debido a los enormes avances de implementación de modelos hidrológicos en el área computacional, se han convertido en una herramienta muy valiosa, que permite llevar a cabo estudios de este tipo de forma indirecta.

Como ya se ha señalado anteriormente, el empleo de un software de SIG para realizar este tipo de estudios, es una herramienta muy valiosa, ya que, permite realizar estudios para simular los efectos de los diferentes cambios que se presentan en una cuenca, específicamente, para este estudio, el comportamiento del escurrimiento hidrológico, en base al análisis específico del efecto de los cambios de cobertura y los efectos directos que estos conllevan a la esorrentía.

Los resultados obtenidos con la aplicación de la herramienta del SIG que están en forma de imágenes espaciales y temporales, del escurrimiento y de los cambios de cobertura de suelo, podrían permitir identificar, como se han modificado los comportamientos del escurrimiento en toda la zona de la subcuenca Atoyac y así, poder ver, cuál ha sido la influencia del cambio de cobertura en estos, de tal manera que, también permitan ver como estos cambios se han visto reflejados en los niveles del agua subterráneas del acuífero de la zona.

### **1.3. HIPÓTESIS**

Los cambios en el escurrimiento en la subcuenca Atoyac se han visto seriamente afectados por los cambios de uso de suelo que ha sufrido la zona durante un periodo de 15 años.

### **1.4. OBJETIVO GENERAL**

Estimar el comportamiento del escurrimiento hídrico durante un periodo de 15 años comprendidos entre 1990 y 2005, debido a los cambios de uso de suelo generados en la subcuenca Atoyac, ubicada en los Valles Centrales de Oaxaca a través de un SIG (Idrisi).

### **1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Adquisición y tratamiento, de las imágenes espectrales de satélite (cobertura de suelo y modelo numérico de altitud) de la zona de estudio.
- Obtención y tratamiento, de las bases de datos de precipitación, temperatura y edafología.
- Clasificación y tratamiento, de las imágenes de cobertura de uso de suelo para los años 1990 y 2005, empleando, el método de clasificación supervisada.
- Empleo del módulo del ciclo hidrológico, que se encuentra implementado en el software de SIG Idrisi, para estimar, el comportamiento de los escurrimientos hídricos, comprendido en un período de 15 años, entre 1990 y 2005.

## CAPITULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES

El estudio del cambio en el uso de suelo, ha tomado gran importancia en los últimos años, debido a las afectaciones que este proceso desencadena dentro de una cuenca, los trabajos que se han hecho entorno a este tema han sido variados, a continuación se mencionan algunos de aquellos, que se ven involucrados con el tema de investigación.

En México, la utilización de la percepción remota (teledetección) es un método nuevo, empleado para poder estudiar el cambio en el uso de suelo, es por eso, que se están haciendo nuevos trabajos de investigación con el afán de emplear estos métodos.

Buendía *et al.* (2002), aplicaron imágenes satelitales en la generación de la cartografía de uso de suelo y vegetación, de una región utilizando imágenes obtenidos por los satélites landsat y Spot, para 10 unidades de clasificación empleando 4 tratamientos (componentes principales, análisis de textura, convolución y filtrado), donde, obtuvieron un resultado con las bandas de las imágenes Landsat TM3, TM4 y TM5, sin tratamiento y, Spot XS1, XS2 y XS3, con el tratamiento de componentes principales del 69.07% para los dos tratamientos.

Prol-Ledesma *et al.* (2002), utilizaron datos cartográficos e imágenes del satélite Landsat para estimar el cambio de uso de suelo en los alrededores del Distrito Federal (México), empleando el software de SIG Idrisi. Para ello, se realizó un preprocesamiento, que consistió en hacer una georeferenciación y corrección atmosférica, además, se efectuaron composiciones con las bandas de las imágenes satelitales en falso color, para obtener una mejor definición del tipo de vegetación del área de estudio y el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), mientras que, la clasificación supervisada se realizó empleando el algoritmo de máxima verosimilitud.

Algunos de los estudios que se han hecho, en los cuales se consideraron, el cambio de uso de suelo en una cuenca hidrológica, se mencionan los siguientes:

Ziyong *et al.* (2008), realizaron un estudio de cambio de uso de suelo en una cuenca de la zona de Datong, el objetivo de éste, fue determinar el cambio de uso de suelo utilizando imágenes multitemporales Landsat en un período de nueve años, tomando cuatro fechas, basado en una clasificación supervisada con el método de algoritmo de máxima verosimilitud, donde, las imágenes se clasificaron en seis categorías. Por otro lado, otro estudio que se ha hecho en una cuenca, es el de Carreño *et al.* (2008), que se realizó de 1984 a 2000, como consecuencia de los aportes de agua de drenaje agrícola a la cuenca, se utilizaron 3 mapas, se realizó una clasificación supervisada usando el algoritmo de máxima verosimilitud, se realizó un análisis de NDVI y, para la clasificación utilizaron el coeficiente kappa, el cual midió, el grado de precisión de la clasificación.

Honglin *et al.* (2006), examinaron los cambios en la cobertura del suelo en un período de 10 años, empleando imágenes en tres fechas de épocas similares, pero en distintos años, a partir del cálculo del NDVI, las imágenes fueron corregidas para eliminar los efectos atmosféricos, georeferenciadas donde se clasificaron en cinco tipos, la clasificación no supervisada se realizó mediante el algoritmo ISODATA, las imágenes fueron estratificadas, donde se concluyó que, los cambios en la cobertura del suelo son acompañados por cambios en la temperatura de la superficie del suelo.

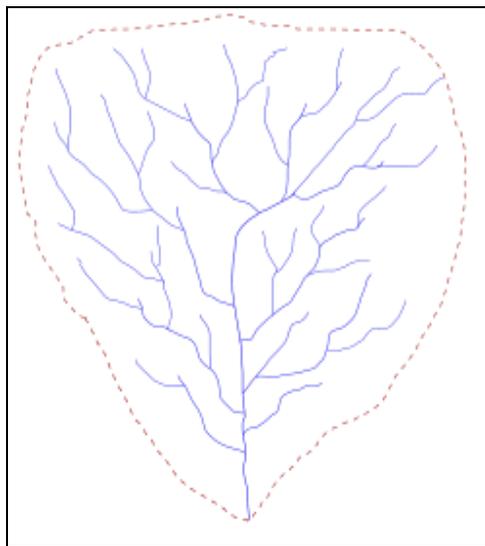
Fikir *et al.* (2009) realizaron un estudio, donde, determinaron el impacto del manejo integrado de cuencas de uso de suelo en una cuenca y el cambio, de uso de suelo que se ha generado, esto se realizó mediante el empleo de la teledetección y los SIG, en el caso de las imágenes satelitales, se tomaron para ver, el actual uso de suelo y el procesamiento de datos, se realizó a través del software de SIG Ilwis, es por esto que, Castañeda y Dubrot (2009) mencionan que, cuando los mapas de suelo y vegetación no están disponibles, la teledetección es un medio alternativo para obtener información.

## **2.2 MARCO TEORICO**

### **2.2.1 Definición de cuenca hidrológica**

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2008), define cuenca como: la unidad de territorio, delimitada por un parte agua, en donde, escurre el agua en distintas formas y

esta, se almacena o fluye hasta un punto de salida (desembocadura), que puede ser, el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal o bien, el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aún, sin que desemboque en el mar (Figura 2.1). En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituyen la unidad de gestión de los recursos hídricos; en México, se tiene el conocimiento de que se han delimitado 728 cuencas (NOM-011-CNA-2000).



**Figura 2.1.** Esquema de una cuenca hidrológica (Llamas, 1993).

La cuenca, está conformada por componentes biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora y fauna) y antropocéntrico (socioeconómicos, culturales, institucionales), que están todos interrelacionados y en equilibrio, entre sí. Bommathanahalli (1997) menciona que, al afectar a uno de estos componentes se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema.

### **2.2.2 Teledetección**

La teledetección o percepción remota, se define como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, asumiendo que, entre la tierra y el sensor, existe una interacción energética (Chuvieco,

2007). Por otro lado, Siegal y Gillespie (1980), definen a la teledetección como la ciencia de recopilación de información, que describe objetos o escenas a distancia, que no pueden ser estudiadas sin esta técnica, debido a que son inaccesibles.

### **2.2.3 Principales aplicaciones de la teledetección.**

El avance tecnológico en la observación de la tierra en los últimos años, se han desarrollado de forma rápida y, los problemas que deterioran al medio ambiente han provocado el desarrollo de nuevas tecnologías como la teledetección.

La teledetección, proporciona información remota espacial actualizada, de fenómenos que ocurren en la tierra. Pérez *et al.* (2002) mencionan que, las principales aplicaciones de la teledetección, abarcan diversas disciplinas en la que la variable espacial tiene que ver. Los principales ejemplos de aplicaciones de la teledetección en las que, las imágenes espaciales han acreditado su valía como herramienta de investigación se pueden mencionar las siguientes: el inventario de recursos para estudios de impacto ambiental, medidas de aguas superficiales y humedades, cartografía de la cobertura vegetal del suelo, población de rendimientos de cultivo, análisis en tiempo real de masas nubosas, cartografía térmica de la superficie del mar para el estudio de las corrientes marinas, entre otras aplicaciones.

### **2.2.4 El espectro electromagnético**

El flujo energético, que se transmite entre la cobertura terrestre y el sensor, está constituido de una forma de radiación electromagnética. La energía, se transfiere por tres procesos: convección, conducción y radiación, está última, constituye la base de los sistemas de teledetección (Chuvienco, 2007). Gandía *et al.* (1991) mencionan que, el ojo humano, es sensible a un intervalo de longitudes de onda que va desde 0.4 a 0.78  $\mu\text{m}$ , lo que se conoce como espectro visible, que es, una pequeña parte del espectro electromagnético, tal como se muestra en la figura 2.2.

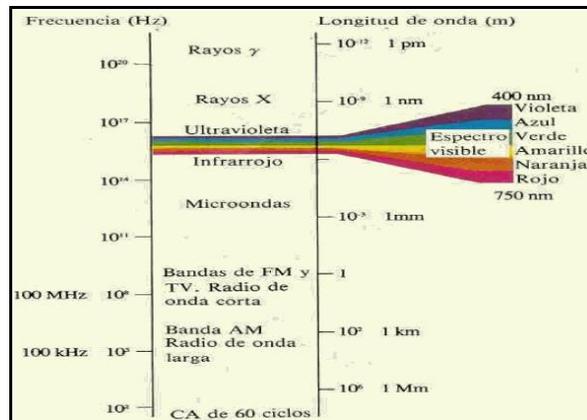


Figura 2.2. Espectro electromagnético (Trejo, 2006).

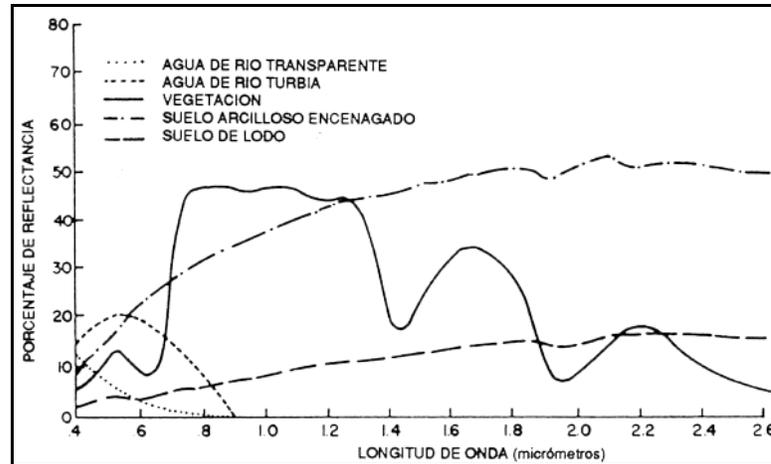
### 2.2.5 Componentes de un sistema de teledetección

Un sistema de teledetección, según Chuvieco (2007), está constituido de los siguientes elementos: fuente de energía, cubierta terrestre, sensor, sistema de recepción-comercialización, intérprete y usuario final.

### 2.2.6 Firmas espectrales

En la teledetección, es fundamental conocer el concepto de firma espectral, debido a que, es la que permite identificar objetos, para elegir las bandas espectrales y el sensor más conveniente. Pérez *et al.*, (2002), la definieron como, un grafico donde representaron la longitud de onda en el eje X y la reflectividad en el eje Y, donde, se observa que cada cubierta se ve representada por una curva característica en él, tal como lo muestra la figura 2.3. Estos trazos con singularidades a modo de rubricas, personalizan su comportamiento espectral frente al de otras cubiertas.

A dichas curvas, se le denominan espectros, signaturas o firmas espectrales. Su diferente trazado, permite distinguir varias cubiertas o estados diferentes de una misma cubierta. Por su parte Chuvieco (2007), define a la firma espectral como curvas de reflectividad.



**Figura 2.3.** Firma espectral de diversas características naturales de la superficie de la tierra (Meaden, 1992).

### 2.2.7 Características de los sensores

La teledetección, se lleva a cabo a través de sensores, instrumentos susceptibles para detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que les llega desde la tierra a través de la atmosfera y la convierten en un una magnitud física, que puede ser tratada y grabada (Sobrino, 2000). Para Keller *et al.* (2004), un sensor es un dispositivo que mide y registra, la energía electromagnética.

Los sensores, convierten la señal electromagnética, en un formato analógico (fotografía) o digital (imágenes). Las características de la imagen registrada, dependen en gran medida de las propiedades del sensor y de la distancia al suelo, desde la cual, se realiza la adquisición de datos (Sobrino, 2000).

En los sistemas de sensores de Teledetección, se habla de cinco resoluciones distintas tales como la: espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular. Gracias a estos, pueden evaluarse rangos de precisión geométrica en los sistemas de precisión, referentes a conceptos de suma importancia para el análisis de las imágenes espaciales (Pérez *et al.* 2002).

### 2.2.8 Resolución de un sistema de sensor de Teledetección

**Resolución espacial:** es el término, que se le designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. La resolución espacial de un sensor óptico-electrónico, depende de varios factores como son: la altura orbital, la velocidad de exploración y del número de detectores. En cuanto a los detectores de antena, su resolución depende del radio de abertura, de la altura de la plataforma y de la longitud de onda a la que trabajen.

La resolución espacial, tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, por cuanto marca, de alguna forma, el nivel de detalle que éste ofrece, en consecuencia, la resolución espacial, está en estrecha relación con la escala de trabajo y con, la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación (Chuvieco, 2007).

**La resolución espectral:** indica el número y anchura, de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor. En este sentido, un sensor, será un tanto más idóneo, cuanto mayor sea el número de bandas que proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. Además, conviene que esas bandas sean lo más suficientemente estrechas, con el objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Por el contrario, bandas muy amplias, suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés (Chuvieco, 2007).

**La resolución radiométrica:** indica la capacidad del sensor para discriminar del sensor relaciones entre los distintos tipos de resolución.

**La resolución temporal:** se refiere, a la periodicidad con la que se adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre (Chuvieco, 2007), mide, el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto, de este modo, podemos cuantificar la capacidad que tiene un sistema de sensor para registrar los cambios temporales acaecidos sobre una determinada cubierta, lo cual, es de vital importancia a la hora de abordar estudios evolutivos. La resolución temporal, está condicionada por el tipo de orbita, el ángulo de barrido y la velocidad del satélite (Pérez *et al.* 2002).

**La resolución angular:** se refiere, a la capacidad, que tiene un sensor para tomar imágenes oblicuas. Propiedad que, permite no solamente acortar los ciclos temporales de

recubrimiento, sino que, posibilita la generación de imágenes estereoscópicas y por tanto, la reconstrucción del relieve.

En un análisis en conjunto de las diferentes resoluciones de los satélites, llegaríamos a la conclusión de que, un satélite, no es mejor ni peor que otro debido a su resolución. Cada misión espacial, ha concebido unos sensores adaptados a unos determinados objetivos y eso, es lo importante según Pérez *et al.* (2002).

En la siguiente tabla 2.1, se muestran las características de resolución radiométrica de las imágenes de las bandas, según la procedencia del sensor del satélite Landsat.

**Tabla 2.1.** Características de resolución radiométrica de las imágenes de bandas.

Banda	Zona del espectro	Sensor ( $\mu$ )	
		TM	ETM+
1	Visible azul	0.45-0.52	0.45-0.52
2	Visible verde	0.52-0.60	0.53-0.61
3	Visible rojo	0.63-0.69	0.63-0.69
4	Infrarrojo próximo	0.76-0.90	0.78-0.90
5	Infrarrojo lejano	1.55-1.75	1.55-1.75
6	Térmico lejano	10.4-12.5	10.4-12.5
7	Térmico próximo	2.08-2.35	2.08-2.35
8	Visible	No existe	0.52-0.90

### 2.2.9 Correcciones de imágenes satelitales

Las correcciones de una imagen, son los procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, en su localización o en la radiometría de los píxeles que

la componen (Chuvienco, 2007), es decir, son operaciones requeridas antes de hacer el análisis de datos y la extracción de estos, dentro de estas, se tienen las siguientes:

### **Correcciones radiométricas**

Es la técnica, que modifica los niveles digitales originales de cada pixel para acércalos a los que, habría presentes en la imagen en caso de una recepción ideal (Chuvienco, 2007). Sobrino (2000) menciona que, esta técnica trata de minimizar las alteraciones en las imágenes, se utiliza, cuando existen irregularidades del sensor o ruido atmosférico, que se originan cuando es captada la imagen.

### **Correcciones geométricas**

Se refiere, a cambios en la posición que ocupan los pixeles, es decir, modificar sus coordenadas (Chuvienco, 2007). La técnica se aplica, cuando, existen distorsiones geométricas del sensor debido a la geometría del sensor con la tierra, y la conversión de los datos a coordenadas reales (por ejemplo latlong o UTM) de la superficie de la tierra.

### **Correcciones topográficas**

Técnica que consiste en, el fraccionamiento de imágenes, se aplica por que existen distorsiones en el relieve cuando se capta la imagen.

El realce, se refiere, a las técnicas dirigidas hacia la mejora de la calidad visual de la imagen para hacer más evidentes los rasgos de interés (Chuvienco, 2007), que incluye, estiramiento al contraste y filtrado espacial.

El filtro, se aplica en análisis digital para aislar componentes de interés. Lira (2002) menciona que, en la percepción remota, el filtrado, se aplica banda por banda o después de un realce. El filtrado, se utiliza para eliminar el ruido de una imagen o para dejar pasar un cierto rango de frecuencias.

Existen dos procedimientos para llevara a cabo el proceso de filtrado en las imágenes: el primero, consiste en aplicar a todos los pixeles de la imagen, una operación aritmética, que tenga en cuenta el valor de los inmediatos (filtros en el dominio espacial) y un segundo, para retener ciertos componentes de las frecuencias de la imagen (filtros en el dominio de la frecuencia), esto quiere decir, que el filtrado, se basa en la transformada de

Fourier, que representan los componentes de fase y amplitud, que definen una determinada imagen.

Mientras que, el contraste, es un procedimiento que implica un cambio de forma del histograma reasignando los valores de los píxeles, las imágenes, al ser captadas tienen muchas deficiencias en su aspecto, con el contraste aumenta la calidad visual para una mejor interpretación. Pérez *et al.* (2002), hacen referencia que, en los software de teledetección y los programas de tratamiento de imágenes digitales, disponen de múltiples técnicas para realizar este proceso.

### **2.2.10 Transformación**

El concepto de transformación, es similar al del realce a más de una banda. El problema que existe, cuando se analizan las imágenes multiespectrales, es que, se correlacionan entre ellas, esto produce que exista información redundante. Chuvieco (2007) establece que, por el método de análisis por componentes principales se pueden sintetizar las bandas originales, creando unas nuevas bandas, tomando la parte más relevante de la información original.

La transformación Tasseled Cap, ofrece componentes de significado físico preciso, independientemente del tipo de imagen que se esté analizando, tiende a poner en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo (Chuvieco, 2007).

### **2.2.11 Categorización de imágenes: clasificación digital**

Sobrino (2000) define a la clasificación como, uno de los pasos más importantes en el procesamiento de imágenes, es una alternativa visual para agrupar los puntos, que bajo cierto grado de similitud, se asemejen.

Para Cihlar *et al.* (1998), un método de clasificación, debe reunir las siguientes características: exacto, reproducibles por otro, no sensible a ruidos pequeños en los datos de entrada, que cubra todo el territorio y que, el objetivo que no esté marcado por las decisiones del intérprete. Este último no muy aceptable por que en ocasiones el intérprete puede resolver problemas en la discriminación de cubiertas. Chuvieco (2007), describe la clasificación digital con un enfoque más cualitativo, que implica, categorizar una imagen multibanda en términos estadísticos, supone reducir la escala de medida continua (los

niveles digitales de cada píxel originalmente detectados por el sensor) a una escala categórica (tipos de vegetación) u ordinal (densidad de vegetación).

### **2.2.12 Manejo de imágenes satelitales**

Las imágenes, obtenidas por los satélites por medio de la teledetección, ofrecen una perspectiva única de la Tierra, sus recursos y el impacto, que sobre ella ejercen los seres humanos. Algunos satélites, son sensibles a través de las nubes y la niebla, que oculta parte de la superficie terrestre. Además, es por medio de las imágenes de satélite, que se revelan detalles ocultos remotos que el ojo humano no puede observar. Algunas imágenes, por ejemplo, muestran las enfermedades de la vegetación, la existencia de minerales en afloramientos rocosos o la contaminación de los ríos. El valor práctico y la multiplicidad de las aplicaciones de las imágenes, continúan aumentando a medida que se lanzan nuevos satélites, que se suman a los que ya están en órbita. Al haber más satélites, se dispone de imágenes en una cantidad creciente de tamaños de escena, resoluciones espectrales, frecuencias de paso y detalles espaciales (Geosat, 2009).

El empleo de imágenes satelitales, dentro de la investigación ambiental son en: cuencas hidrológicas, planos de inundación y vegetación, desarrollo y planificación urbana, mapeo, planificación, administración de uso de suelos, en alineamientos: carreteros, canales, tuberías, clasificación de cultivos, entre otras aplicaciones más.

El software Idrisi en tratamiento de imágenes, es uno de los paquetes de SIG utilizados en teledetección, sus orígenes, se remontan en 1987 en la Universidad de Clark USA, dispone de módulos de análisis de riesgo, soporte a decisiones geográficas, superficie y modelado espacial. Desde su origen, tuvo gran aceptación como herramienta para la manipulación avanzada de imágenes (Pérez *et al.*, 2002).

### **2.2.13 Método de clasificación de máxima probabilidad (Maxlike)**

El método de clasificación de máxima probabilidad, representa la aproximación ideal al problema de la clasificación. Tal método, utiliza como regla de clasificación, la regla de Bayes (o algunas de las otras reglas, derivadas de las de Bayes). Cada clase, deberá venir descrita por una función de densidad de probabilidad establecida, que de antemano,

dependerá de un número finito de parámetros, los cuales, deberán haber sido determinados a partir de las áreas de entrenamiento previamente definidas. La definición de la función densidad de probabilidad para cada clase, es lo que permitirá, dado unos valores de las variables consideradas para un punto, determinar, la probabilidad de que dicho punto pertenezca a cada una de las clases y asignarlo así, a la clase, a la que tenga una mayor probabilidad de pertenecer. Como tal función de densidad de probabilidad, se puede considerar la distribución normal.

#### **2.2.14 Sistema del ciclo hidrológico en el software de SIG Idrisi**

En la actualidad, los SIG constituyen una herramienta muy práctica para la generación de imágenes de distribución superficial de datos climatológicos (espacial y temporal), así como también, los modelos hidrológicos implementados en un software han incrementado la potencia y las velocidades de las operaciones de cálculo, lo que han proporcionando un medio adecuado para responder a las cuestiones relacionadas con la distribución espacial de la esorrentía hídrica superficial (Triviño y Ortiz, 2004).

Investigaciones recientes llevadas a cabo en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) a través del Laboratorio de Hidrogeomática, han permitido implementar módulo del ciclo del agua en el software de SIG Idrisi (Franco, 2008) con el fin de poder estimar todos los componentes que integran el ciclo hidrológico a nivel de cuenca. A continuación se describen los fundamentos y las bases teóricas, considerados en los componentes del ciclo hidrológico.

#### **Precipitación**

El método matemático utilizado para generar una imagen superficial es la interpolación, debido a que permite la distribución espacial de los valores de precipitación. Anteriormente, los hidrólogos utilizaban métodos como el de polígonos de Thiessen, de isohietas y el promedio aritmético, sin embargo, estos no cumplen actualmente los requerimientos de distribución superficial de los datos climatológicos en los estudios realizados.

## Evapotranspiración

La evaporación es un proceso esencial dentro del ciclo hidrológico (Antón y Díaz, 2000), debido a que, se estima que representa aproximadamente el 75% de la precipitación total anual de los continentes que retorna a la atmósfera (Campos, 1998).

Para la estimación de la evapotranspiración se consideraron tres métodos, el de Turc, Thornwaith y Hargreaves-Samani. El empleo de cualquiera de los métodos depende del estudio (Franco, 2008). En la estimación de la evapotranspiración en el presente trabajo de investigación se utilizó el método de Hargreaves-Samani.

$$E_t = 0.075 R_i T_t$$

Donde

$R_i$  = transformación a lámina de agua evaporada (mm/mes).

$T_t$  = temperatura promedio expresada (°F).

## Infiltración

En la estimación de este parámetro, se utiliza la metodología empleada por la SEMARNAT (2005), que se basa en el método de C.W. Thornthwaite que es representada por la siguiente ecuación.

$$IP_j = P_j - (P_j * Ke_j)$$

Donde:

$IP_j$  = infiltración potencial mensual (mm).

$P_j$  = precipitación mensual promedio (mm).

$Ke$  = coeficiente de escurrimiento mensual (adimensional).

$j$  = indicador del mes considerado.

El caudal de infiltración real se calcula con la ecuación SEMARNAT 2005:

$$I r_j = ETP_j - P_j$$

Donde:

$I r_j$ = infiltración mensual real (mm).

$ETP_j$ = evapotranspiración de referencia mensual (mm).

El coeficiente de escurrimiento puede tomar diversos factores, para este caso se utilizó la tabla 2.2, el cual puede tomar valores entre cero y uno.

### **Escurrimiento**

Una vez obtenida la precipitación, evapotranspiración y la infiltración, se obtiene el escurrimiento con la siguiente ecuación:

$$Esc_j = P_j - ETP_j - I r_j$$

Donde:

$P_j$ = precipitación mensual promedio (mm).

$ETP_j$ = evapotranspiración de referencia mensual (mm).

$I r_j$ = infiltración mensual real (mm).

$j$ = indicador del mes considerado.

### **Coefficiente de escurrimiento**

El coeficiente de escurrimiento, es un parámetro indispensable en la estimación de algunas fases de los componentes del hidrológico, que a su vez, depende de numerosos factores tales como son: el tipo de precipitación, de su intensidad y distribución en el tiempo, de la humedad inicial del suelo, del tipo de terreno, del tipo de cobertura vegetal existente, de la interceptación que provoque, del lapso de tiempo que consideremos, de entre otros. Normalmente, éste parámetro toma valores comprendidos entre cero y uno.

El coeficiente de escurrimiento se obtiene a partir de la tabla desarrollada por Benítez *et al.* (1980), en el cual se consideran la cobertura del suelo, el tipo de suelo y la pendiente (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Coeficientes de escurrimiento (Benítez *et al.*,1980).

Cobertura del suelo	Tipo de suelo	Pendiente (%)				
		>50	20-50	5-20	1-5	0-1
<b>Sin vegetación</b>	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
<b>Cultivos</b>	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
<b>Pastos, vegetación ligera</b>	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
<b>Hierba</b>	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
<b>Bosque, vegetación densa</b>	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

## CAPÍTULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

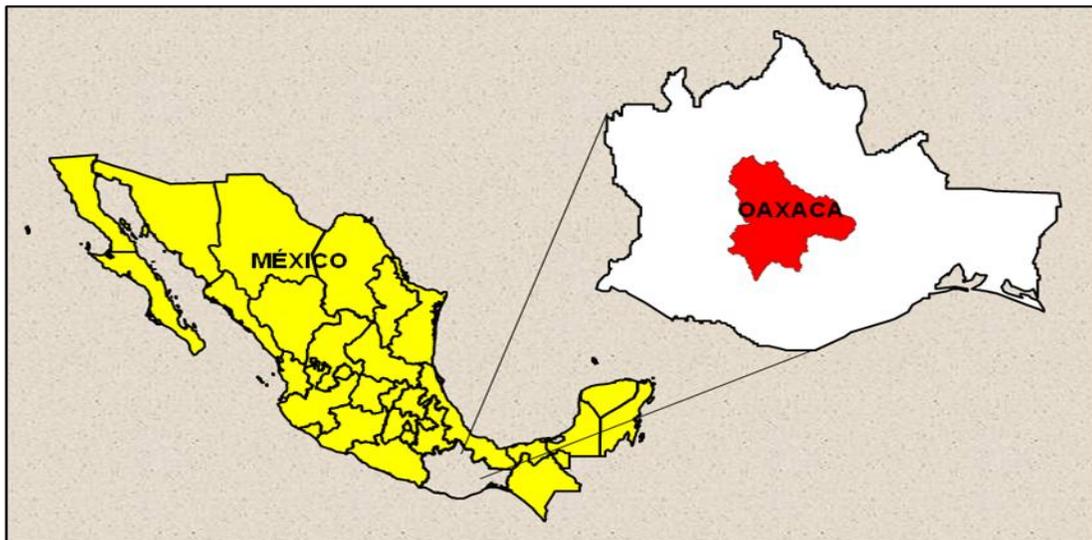
#### 3.1 AREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO

##### Introducción

En el presente capítulo, se muestra el panorama de la zona de estudio donde se realizó el trabajo, en primera instancia, se considero a nivel de mosaico (cuadro). A nivel de cuenca, se describen las características generales más importantes enseguida

##### Ubicación

La subcuenca Atoyac en estudio del Valle de Oaxaca, tiene un área superficial de 3,727 km<sup>2</sup>, la cual representa, el 3.9% de la superficie estatal, se localiza, al sureste de la República Mexicana en la porción centro del Estado de Oaxaca, en la región hidrológica número 20 Costa Chica-Río Verde, en la cuenca río Atoyac (figura 3.1) entre las coordenadas: longitud mínima 16° 27´ 45” y máxima 17° 26´ 33”, y latitud: mínima 97° 8´ 54” y máxima 96° 11´ 1”. Las coberturas de uso de suelo presentes en la zona son: bosque, agricultura, agua, zona urbana y suelo desnudo. Los tipos de suelo que prevalecen son: regosol, acrisol, luvisol, cambisol, feozem, litosol y vertisol.



**Figura 3.1.** Ubicación geográfica de la subcuenca Atoyac del estado de Oaxaca.

## Plataforma de SIG empleado

El paquete de Software de SIG Idrisi se empleó, ya que es, un paquete que permite la compatibilidad con el usuario, además de que, es el con que se cuenta en el laboratorio del Centro de Recursos Idrisi (CRI) del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), dependiente de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) (Martínez, 2010).

## 3.2 METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente trabajo de investigación, se muestra en los siguientes diagramas de flujo metodológicos. La figura 3.2, establece de forma general la metodología empleada en todo el trabajo, mientras que, la figura 3.3, muestra el diagrama de requerimientos de entrada de los módulos del ciclo de agua.

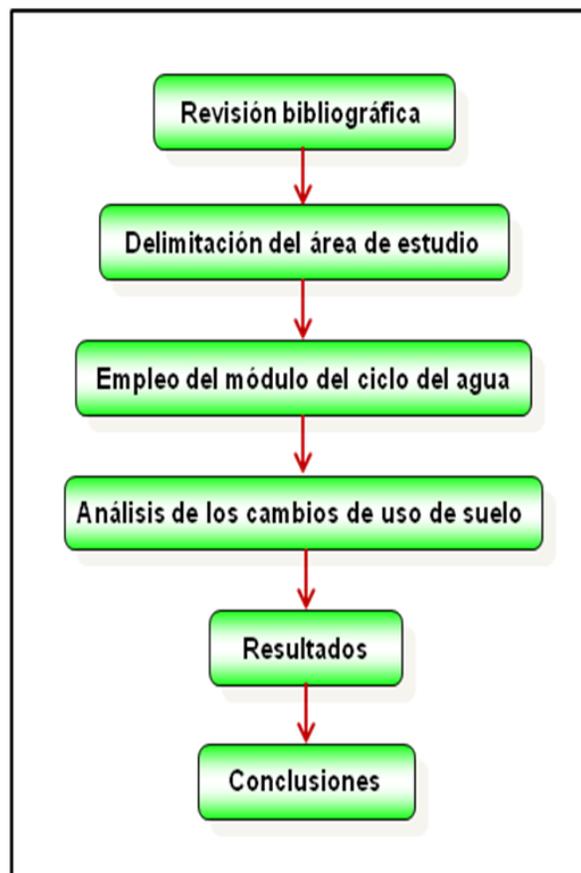


Figura 3.2. Diagrama general del trabajo de investigación.

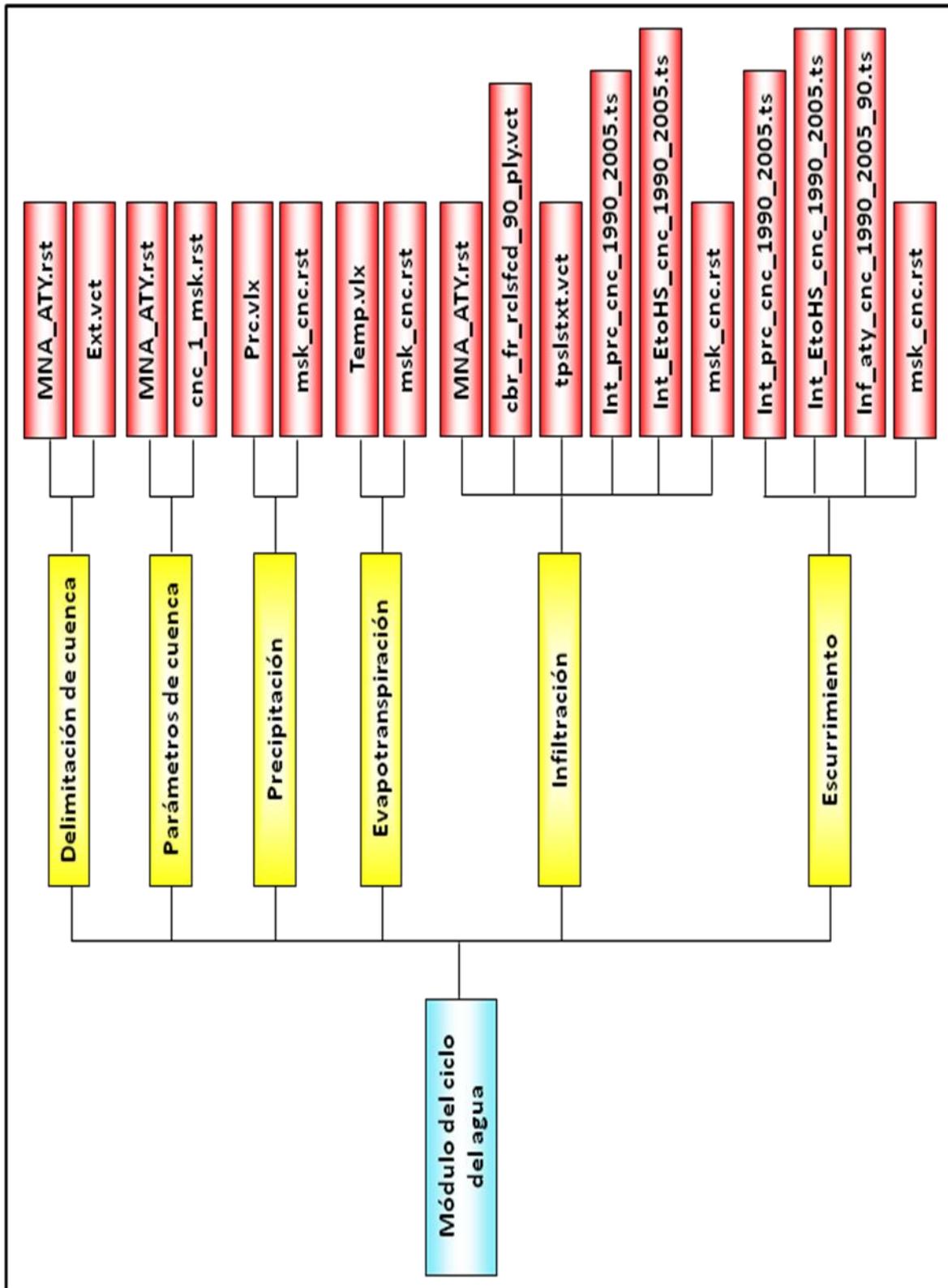


Figura 3.3 Requerimientos de entrada de los módulos del ciclo del agua.

### 3.3 DELIMITACIÓN DE CUENCA Y PARÁMETROS FISIOGRAFICOS

Antes de emplear el módulo del ciclo del agua, en primera instancia, se definió la zona de estudio, en la que se pretendía estimar la variabilidad de la esorrentía basados en los cambios de uso de suelo. Para ello, se realizó un trazado, esto con el fin de ubicar los Valles Centrales del Estado de Oaxaca y la forma de la subcuenca Atoyac, en base a las coordenadas geográficas.

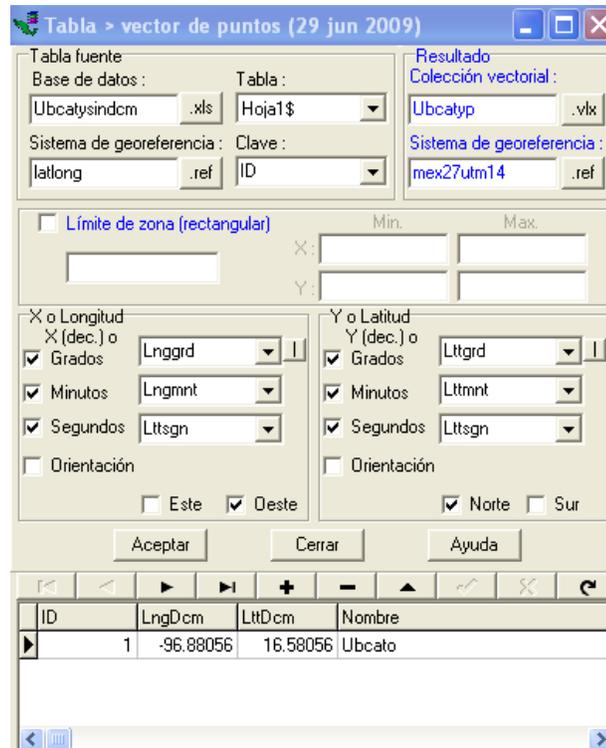
Una vez ubicada la zona de estudio, se procedió a trazar la subcuenca Atoyac a mano sobre las cartas topográficas E14-9 y E-1412, 1: 250 000, editadas por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), para ello, se estableció como punto de salida de la subcuenca, las coordenadas geográficas siguientes: latitud (Lat.) 16° 34' 50" y longitud (Long.) 96° 52' 3".

Después de haber obtenido el trazado de la máscara de la subcuenca (límite) sobre las cartas topográficas, se procedió después a obtenerla en forma digital a través del empleo del módulo para la generación de cuencas en formato digital, ya implementado en el software Idrisi. Para ello, primero se le dio tratamiento a la imagen (SRTM) del Modelo Numérico de Altitud (MNA), que fue adquirida en formato TIFF, con una resolución espacial de 3 arcos de segundo (aproximadamente 90 metros). La imagen del MNA, fue tomada por la misión topográfica SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) en el año 2000 y se descargó de la página de internet <http://www.cgiar-csi.org/>.

La adquisición del mosaico (cuadro) de la imagen del MNA (SRTM) se realizó en las siguientes coordenadas geográficas (Latlong): longitud de -100.5 a -99 y latitud de 19 a 20.5, posteriormente se importaron a Idrisi y se proyectó la imagen al sistema mex27utm14 (Universal Transversal Mercator) correspondientes a la zona de estudio, asignándole una resolución espacial de 100 metros (tamaño de píxel).

Una vez terminado el proceso anterior, se obtuvo el límite de la subcuenca Atoyac en base al punto de salida de la subcuenca, que se ubicó en las coordenadas geográficas (Latlong): latitud 16° 34' 50" y longitud 96° 52' 3". Para generar la imagen vectorial del punto de salida de la cuenca (ext.vct), se creó una tabla en Excel con las coordenadas geográficas de longitud y latitud del punto de la salida de la cuenca, la cual, se importó y

se proyectó a Méx27utm14 con el módulo Table to points de Idrisi (Figura 3.4), para generar la imagen vectorial del punto de salida de la cuenca (ext.vct).



**Figura 3.4.** Módulo de importación del punto de salida de la cuenca (CRI,2011).

En la delimitación de la cuenca, se utilizó el módulo del ciclo hidrológico (Franco, 2008) que se observa en la figura 3.5, en el cual se seleccionó el icono delimitación (Figura 3.6), que requiere como entradas las imágenes: del modelo numérico de altitud (SRTM) y la vectorial del punto de salida de la subcuenca (MNA.rst y ext.vct). Una vez introducidas las imágenes requeridas por el módulo, se ejecutó para generar la imagen de la máscara de la cuenca (límite) de forma acumulativa.

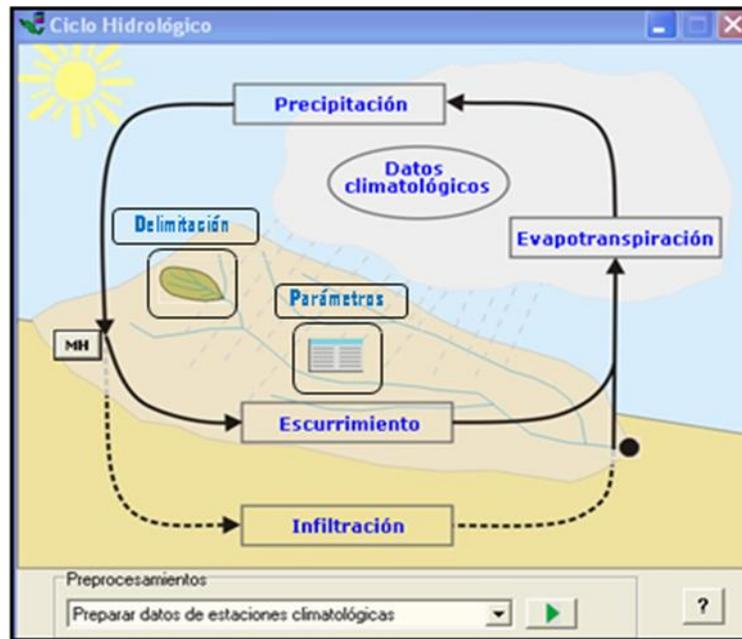


Figura 3.5. Módulo del ciclo hidrológico (Franco, 2008).

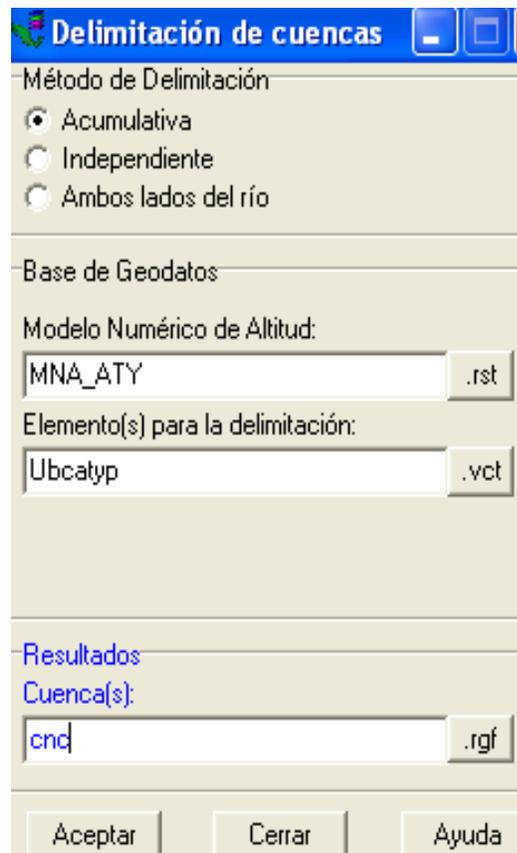


Figura 3.6 Módulo para la delimitación de cuencas hidrológicas.

Mientras que, para determinar los parámetros fisiográficos de la cuenca, se empleó el icono de parámetros (Figura 3.7), el cual, se encuentra también integrado en el módulo del ciclo hidrológico, que requirió como entradas las imágenes de: el modelo numérico de altitud (MNA-ATY) y la máscara de delimitación de la cuenca (cnc\_1\_msk) que se muestra en la figura 3.8.

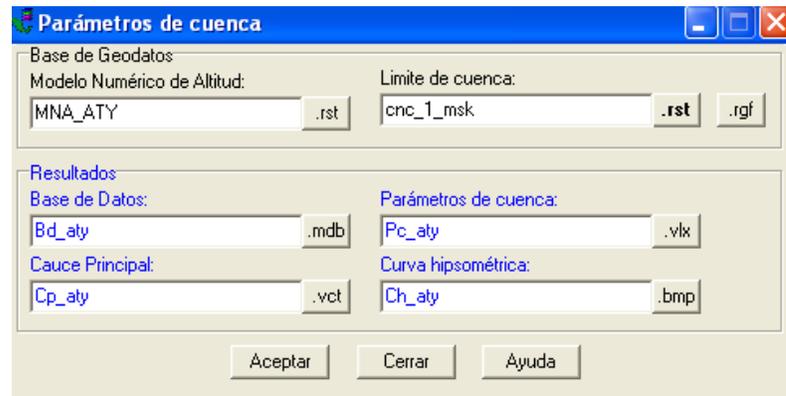


Figura. 3.7. Módulo para la estimación de los parámetros de cuenca.

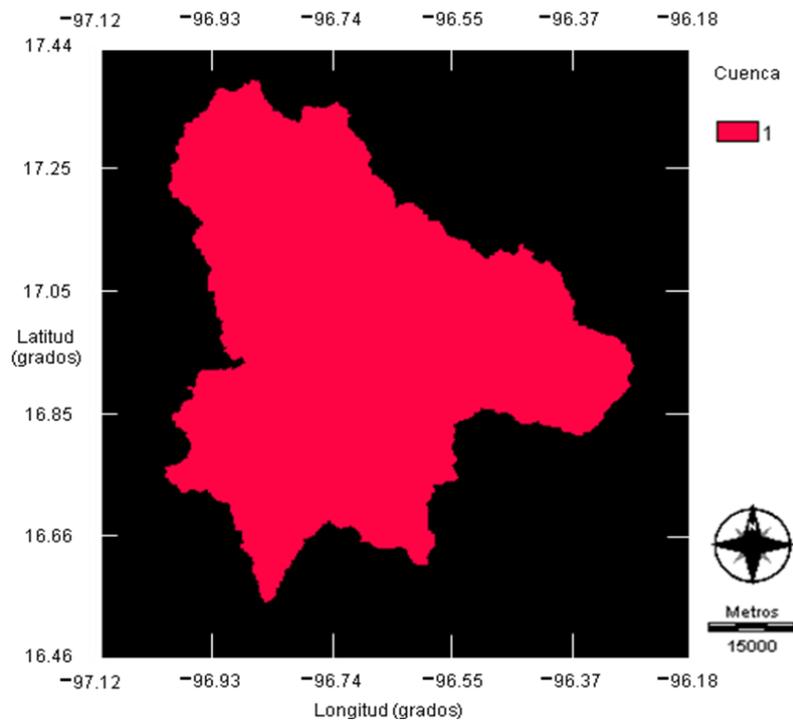
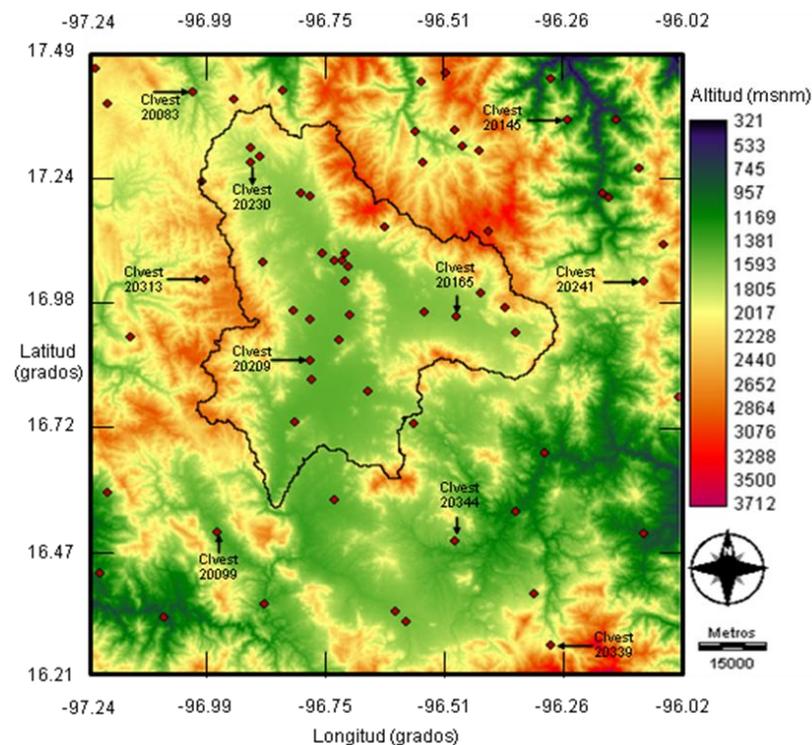


Figura 3.8. Máscara de la subcuenca Atoyac.

### 3.4 ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO HÍDRICO

#### 3.4.1 Precipitación

Para adquirir la información climatológica, de precipitación y temperatura, diaria de forma mensual y anual, durante un período de 15 años de la zona de estudio, se adquieren de la base de datos de CLICOM (2010). Para ello, se consideran las estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera de la subcuenca Atoyac. El total de estaciones climatológicas ubicadas en la zona de estudio fueron 67, las cuales se muestran espacialmente en la figura 3.9. Donde, cada punto representa una estación climatológica con la clave de cada una de las estaciones, los cuales permiten la liga de los registros de las bases de datos de precipitación y temperatura. El período de estudio comprende 15 años debido a que, se adquirieron imágenes satelitales de cobertura de suelo de 1990 y 2005.



**Figura 3.9.** Distribución espacial de las estaciones climatológicas presentes en la zona de estudio.

La figura 3.10, muestra la tabla de las bases de datos (.vlx), donde, se observan las claves de las estaciones climatológicas, así como sus coordenadas geográficas (LATLONG) de ubicación y del municipio de localización.

CLAVE	LngDcm	LtDcm	Id	CVE-OMM	MUNICIPIO
20004	-96.54972	17.43306	3141		SAN JUAN ATEPEC
20007	-96.09972	17.01667	3144		SAN PEDRO Y SAN PABLO AYUTLA
20022	-96.70056	16.95667	3159		SAN BARTOLO COYOTEPEC
20023	-96.41667	17.125	3160		SAN MIGUEL AMATLAN
20034	-96.79972	17.20722	3171		VILLA DE ETLA
20040	-96.54972	17.26667	3177		SANTA CATARINA IXTEPEJI
20041	-96.48306	17.33306	3178		IXTLAN DE JUAREZ
20044	-96.87833	17.06583	3181		SAN FELIPE TEJALAPAM
20046	-96.83306	17.41667	3183		SAN JUAN BAUTISTA JAYACATLAN
20070	-96.59389	16.32944	3207		MIHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ
20071	-96.61667	16.35	3208		MIHUATLAN DE PORFIRIO DIAZ
20076	-97.21667	17.46667	3212		ASUNCION NOCHIXTLAN
20078	-96.71028	17.02722	3214	76775	OAXACA DE JUAREZ
20079	-96.70972	17.08306	3215		OAXACA DE JUAREZ

**Figura 3.10.** Base de datos de las estaciones climatológicas de la zona de estudio.

Para importar de forma espacial las estaciones climatológicas que se ubican en el área de estudio, se utilizó el módulo Table to points, implementado en Idrisi, posteriormente, se proyectaron a mex27utm14 con el módulo Project, el cual, genera un archivo vectorial con su respectivo archivo .vlx, que liga la base de datos de las estaciones.

Una vez realizado el proceso anterior, fue necesario realizar un análisis a los registros de las bases de datos, con el objeto de eliminar errores de tipo humano o técnicos, originados en las estaciones climatológicas, como lo son: los datos registrados de equipos no calibrados, datos con registrados de valores altos o bajos, entre otros.

La figura 3.11, muestra la tabla de las bases de datos de precipitación promedio (mm), obtenidos de las estaciones climatológicas durante el análisis realizado. Mientras que, en la figura 3.12 se muestran distribuidos de forma espacial las estaciones con su valor de precipitación promedio (imagen vectorial), que permitirán generar una imagen superficial de precipitación promedio anual (raster), para el período antes mencionado de la zona de estudio, debido a que los datos de precipitación se encuentran distribuidos espacialmente en forma puntual.

5	6	7	8	9	10	11	12	PrcAnl
53.4	201.4	177.1	139	180.1	90.4	22.6	13.9	932.9
80.1	264.4	300.9	269.7	282.2	118.7	50.1	26.8	1497
65.7	176	104.3	149.4	118.9	53.1	12.6	5.9	740.5
151.2	268.7	199.9	195.2	251.7	116.3	44	18.5	1372.8
110.5	228.8	239.3	227	228.5	101.8	28.7	14.7	1274.6
80	172.9	169.5	160.1	172.9	77.9	30.4	14	943.8
65.3	209.5	207	191.2	229.4	129.3	59.9	26.7	1203.9
106.5	196.6	166	171	184.5	66.3	12.4	7	989.6
38	104.5	96.3	94.9	102.4	31.6	8.9	2.6	502.6
139.6	255.2	182.7	194.1	191.8	81.3	14.3	7.8	1137.9

Figura 3.11. Base de datos de precipitación promedio (mm) de la zona de estudio.

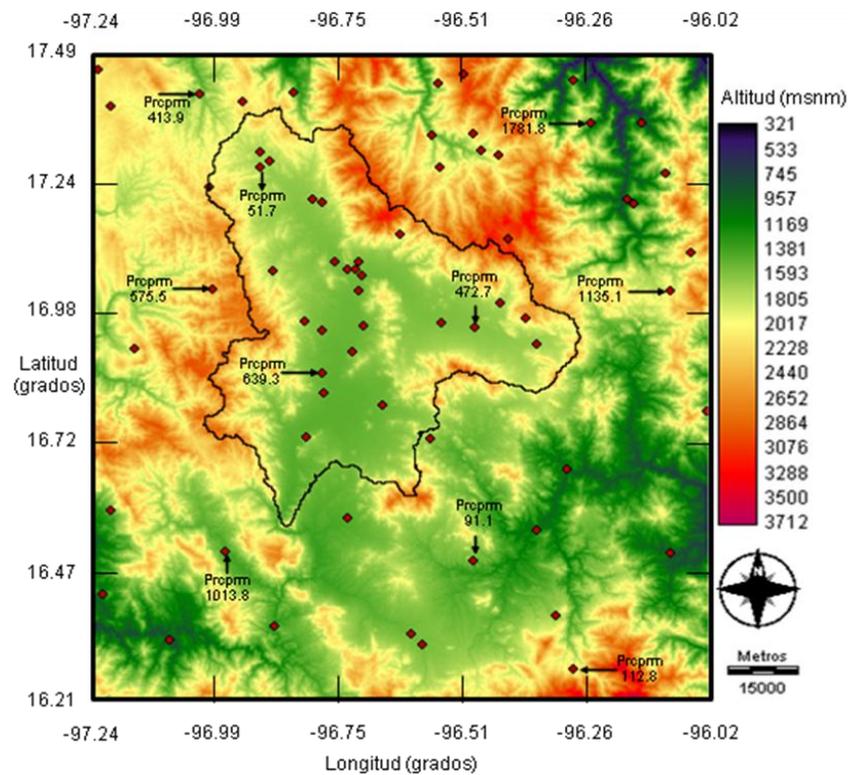
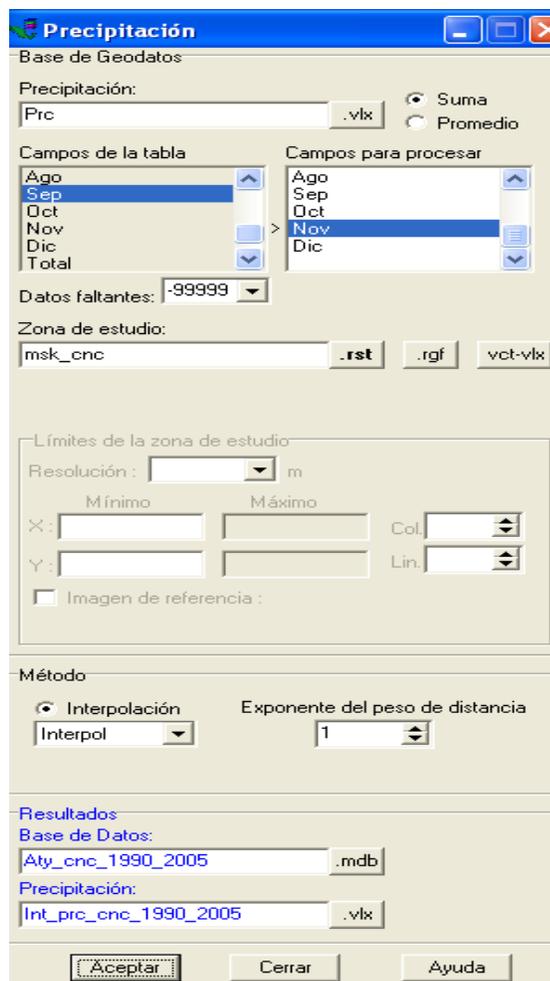


Figura 3.12. Distribución espacial de la precipitación promedio registradas en las estaciones climatológicas de la zona de estudio.

Una vez, que ya se cuenta con la base de datos de precipitación promedio anual de las estaciones climatológicas en formato vectorial y la imagen del MNA de la zona de estudio, estos, se utilizan como archivos de entrada en el módulo Precipitación (Figura 3.13), el cual, se encuentra dentro del módulo del ciclo de agua (Figura 3.5), para generar una imagen superficial de distribución espacial de la precipitación del área de estudio.

Para esto, se eligió la opción del método de Interpolación de Ponderación de Distancia Inversa (Interpol), con un exponente de distancia equivalente a 2 y no, el de Superficies tendenciales, ya que éste, se basa en el análisis de tendencia de datos y no genera una imagen superficial de distribución de la lluvia (Plata, 2008).



**Figura 3.13.** Módulo para la generación de la imagen superficial de precipitación.

### 3.4.2 Evapotranspiración

#### Preparación de datos

En la adquisición de los registros de las bases de datos de temperatura de la zona de estudio, se utilizó el mismo procedimiento que se empleó en la importación y análisis de las bases de datos de precipitación. La figura 3.14, muestra la tabla de las bases de datos de temperatura promedio (°C) obtenidos de las estaciones climatológicas derivado del análisis realizado.

Para la generación de las imágenes de superficie de temperatura, se empleó el mismo procedimiento al de precipitación, utilizando como entradas, el archivo .vix de temperatura y la imagen de la máscara de la subcuenca Atoyac (Figura 3.15).

5	6	7	8	9	10	11	12	TemAnl
16	15.3	14.8	14.9	14.6	14.2	12.3	12	13.9
14.5	13.7	13.3	13.1	12.7	11.9	10.2	10.2	11.9
18	17.5	17.4	17.1	16.3	16.5	14.3	14.1	15.8
10.9	9.4	9.3	9.4	9	9.2	8.5	8.4	9.2
19.2	18.5	18.2	18	17.5	16.9	14.9	13.8	16.3
16.7	16.5	16.2	16.1	15.6	14.9	12.4	11.7	14.1
16.1	15	14.8	14.8	14.2	13.5	11.5	10.9	13.2
17.8	17.3	17.1	16.7	16.3	16.2	14.3	13.6	15.5
20.6	19.2	19.4	19.8	19.1	18.8	16.8	15.4	18
18.2	17.7	17.6	17.5	16.7	16.2	13.7	11.9	15.2

**Figura 3.14.** Base de datos de temperatura de la zona de estudio.



**Figura 3.15.** Módulo para la interpolación de temperatura de la zona de estudio.

Una vez obtenida las bases de datos de la temperatura, se procedió a generar la imagen de distribución superficial de evapotranspiración (mm), para ello, se utilizó el módulo evapotranspiración del ciclo hidrológico, el cual, cuenta con dos métodos para poder generarse, uno de forma mensual y otro anual. Para estimar la evapotranspiración mensual, se tiene dos métodos, el de Hargreaves-Samani y Thornthwaite, y para el anual, el método de Turc. Para este caso de estudio, se ejecutó el análisis por el método de Hargreaves-Samani, empleando el método de interpolación Interpol, para esto, se ingreso el archivo vectorial de datos mensuales de temperatura y el archivo matricial de la máscara de la cuenca, tal como se muestra en la figura 3.16.

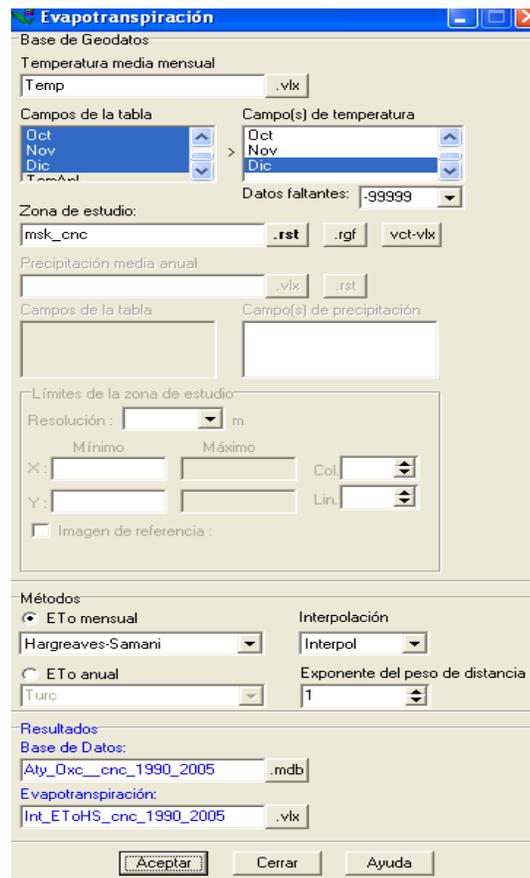


Figura 3.16. Módulo de estimación de la evapotranspiración.

### 3.4.3 Infiltración

#### Preparación de datos

Para poder estimar la infiltración, se requiere de entrada los siguientes parámetros de base de geodatos:

- ❖ MNA
- ❖ Cobertura del suelo
- ❖ Tipo de suelo
- ❖ Precipitación

- ❖ Evapotranspiración
- ❖ Zona de estudio (cuenca)

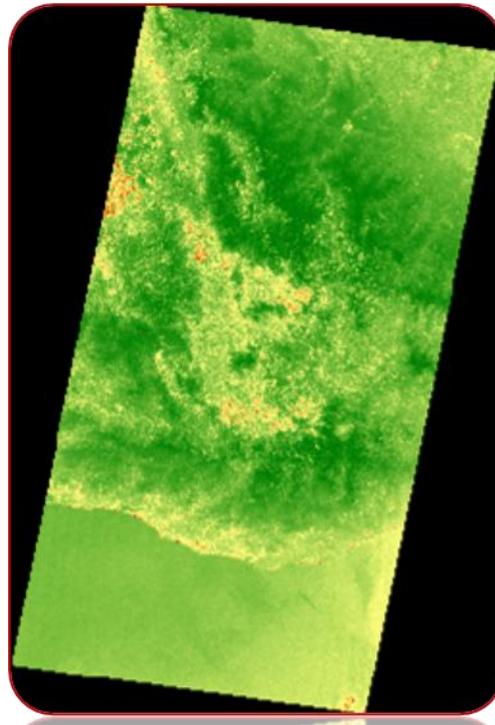
De donde, el archivo del MNA y la máscara de la zona de estudio, se generaron en el proceso de la delimitación de la cuenca, mientras que, el grupo matricial (.ts) de precipitación y evapotranspiración, se generaron en los procesos anteriores.

### **Clasificación de las coberturas de uso de suelo**

En la generación de las imágenes de cobertura de uso de suelo, fue necesario realizar una clasificación de las coberturas de uso de suelo para los años de 1990 y 2005, utilizando el método de clasificación supervisada, con el fin de obtener dos imágenes de cobertura de suelo, que se requieren en el proceso de estimación de la infiltración. A continuación, se describe el proceso de clasificación de las coberturas.

Durante la evaluación del cambio de uso de suelo en la zona de estudio, se utilizaron las imágenes de cobertura de suelo de los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper (ETM<sup>+</sup>), en formato TIFF, de una misma época del año, pero con fechas diferentes, del 29 de abril para 1990 y del 21 de marzo para 2005, adquiridas con una resolución espacial de tamaño de píxel de 28.5 metros. Las imágenes se descargaron de Earth Science Data Interface de la página de Internet <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. de la Facultad de Ingeniería de Maryland, USA.

Con el objeto de cubrir toda el área de estudio, se requirieron de dos imágenes satelitales de cobertura de suelo para crear un mosaico de imágenes, como el que se observa en la figura 3.17 y posteriormente, se proyectaron a las coordenadas UTM y cortadas en las coordenadas: x=700900 e y=1929300 y x=799700 e y= 1822000, al tamaño de la imagen del MNA, éste proceso, se repitió con las 6 bandas (1,2,3,4,5, y 7) de ETM y las 6 del TM. La resolución empleada en las imágenes fue de 100 m. y proyectadas a mex27utm14.



**Figura 3.17.** Mosaico de una imagen satelital de cobertura de suelo.

Antes de realizar la clasificación empleando el método de clasificación supervisada, se realizó primero un análisis de la cobertura de vegetación mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de cada grupo de imágenes de los sensores. Las bandas satelitales de cobertura de uso de suelo empleadas en el análisis del NDVI fueron, la banda 3 (rojo visible) y la banda 4 (infrarrojo cercano), empleando la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

Dónde:

NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada

IR= valor digital del pixel en la banda infrarroja

R= valor digital del pixel en la banda roja

Esta ecuación, se aplica a todos los píxeles de la imagen raster uno por uno. Para encontrar las áreas con vegetación, se realizó una clasificación de las imágenes de NDVI para las dos imágenes de los años de estudio.

## MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

El primer paso empleado para realizar el proceso del método de clasificación supervisada, consistió en realizar una visita al área de estudio, con el fin de tener un conocimiento previo de la zona e identificar áreas representativas de uso de suelo (llamados sitios de entrenamiento). Para el análisis de coberturas de uso de suelo con las bandas de las imágenes, primero, se hicieron composiciones con las bandas, tal como se muestran en la tabla 3.1, en las que, generalmente se puede identificar clases de cobertura de suelo que estas imágenes presentan.

**Tabla 3.1** Tipos de cobertura (Fernández y Herrero, 2001)

<b>Composiciones</b>	<b>Descripción</b>	<b>BGR</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	Color natural	1,2,3	Agua poco profunda, vegetación, suelo desnudo, laderas
<b>2</b>	Falso color	2,3,4	Vegetación vigorosa, cultivos, nubes, ciudades, áreas de escasa vegetación
<b>3</b>	Falso color	3,5,4	Realza los límites entre el agua y la tierra, tipos de vegetación
<b>4</b>	Falso color	2,4,7	Áreas urbanas, forestales y praderas
<b>5</b>	Falso color	1,4,3	Vegetación, áreas edificadas
<b>6</b>	Falso color	1,3,5	Suelo, ríos.
<b>7</b>	Falso color	1,4,5	Diferentes tipos de vegetación

A partir de las clases de cobertura observada en las imágenes compuestas, se decidió utilizar la imagen compuesta BGR 247, (Blue, Green y Red), debido a que, proporcionó una mejor visibilidad para la identificación de los tipos de cobertura para analizarla en el SIG de Idrisi. Posteriormente, se digitalizaron los sitios de entrenamiento en forma de polígonos de los diferentes tipos de cobertura elegidos a clasificar, asignándoles un identificador único a cada tipo de cobertura tal como se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Coberturas de uso de suelo de interés en la clasificación.

Identificador	Cobertura
1	Bosque
2	Agricultura
3	Agua
4	Zona urbana
5	Pastizal

Después, se hizo un análisis de los píxeles de los sitios de entrenamiento generados, creando sus firmas espectrales con el módulo de Makesig para los tipos de cobertura digitalizados, con el fin de generar un cuadro de comparación de firmas, a través del empleo del módulo SIGCOMP.

Terminado el proceso anterior, se empleó, el módulo del clasificador de máxima probabilidad (MAXLIKE), desarrollado con base a la estadística bayesiana, debido a que este, presentó mejores resultados para la clasificación. Debido a que, el resultado de la imagen clasificada de cobertura de suelo generada, se mostraba muy pixelada (efecto conocido como sal y pimienta), se le aplicó un proceso de filtrado a través del filtro moda con el fin de eliminar el efecto. El módulo que se empleó para realizar el proceso de filtrado fue el de FILTER, activando el tipo de filtrado de moda con una ventana de barrido de filtrado de 3x3.

El tamaño de los mosaicos empleados para realizar la clasificación de uso de suelo, correspondió al mismo tamaño del mosaico de la imagen del MNA, descrito anteriormente para los dos periodos (1990 a 2005). Mientras que, para obtener las áreas de superficie

de las diferentes coberturas del uso de suelo de la zona de estudio, se realizó empleando el módulo área implementado en Idrisi.

Finalmente, la clasificación de los archivos de las imágenes de cobertura de suelo de 1990 y 2005 generados, se reagruparon en una nueva clasificación para adaptarlas en otro orden, debido a que, para estimar el proceso de infiltración, el método así lo requiere, que dando ahora agrupados de la manera como se muestra en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Clasificación de coberturas de uso de suelo requerida en la infiltración.

Identificador	Cobertura
1	Sin vegetación
2	Cultivos
3	Pastos y vegetación ligera
4	Zona urbana
5	Pastizal

### Tipos de suelo

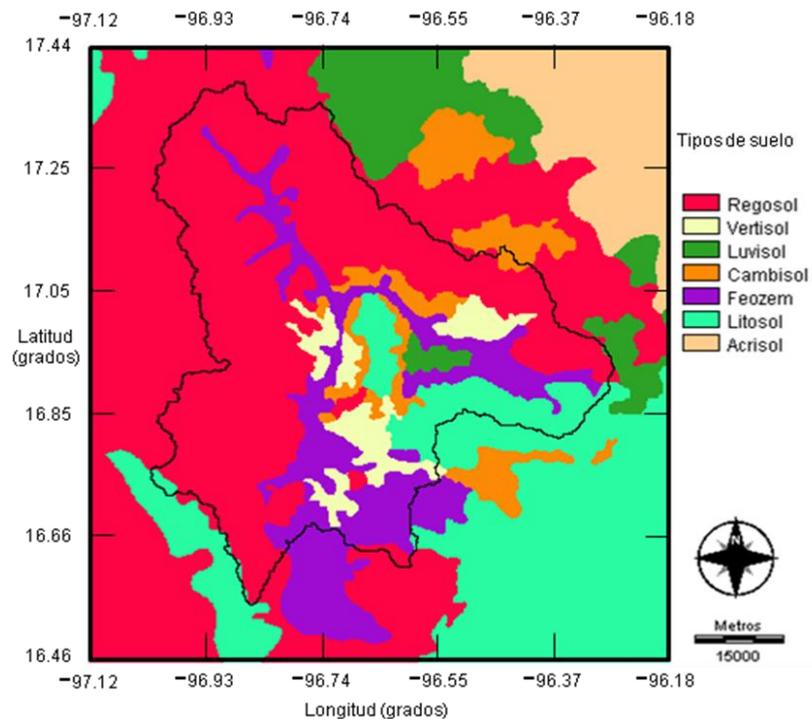
En la generación de las imágenes de tipo de suelo requeridas por el módulo de infiltración, se requirió de una imagen de edafología, proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Para ello, se descargó la información de los archivos tipo shapefile, en formato vectorial, compuesto por 4 archivos (shp, shx, dbf y prj). Después, se importó a Idrisi, se realizó un corte al tamaño del mosaico del MNA y se convirtió la imagen a formato matricial y con el módulo Project fue proyectado de coordenadas mex27ccl.ref a mex27utm14.

Posteriormente, se obtuvieron dos imágenes, una en formato raster y otra vectorial, además, de una tabla de atributos asociada a la imagen vectorial (tabla 3.4), con la cual se clasificaron los diferentes polígonos del mismo tipo de suelo en uno sólo y, así generar una imagen raster y vectorial, como las que se observan en la figuras 3.18 y 3.19, que describen los tipos de suelo presentes en la zona de estudio.

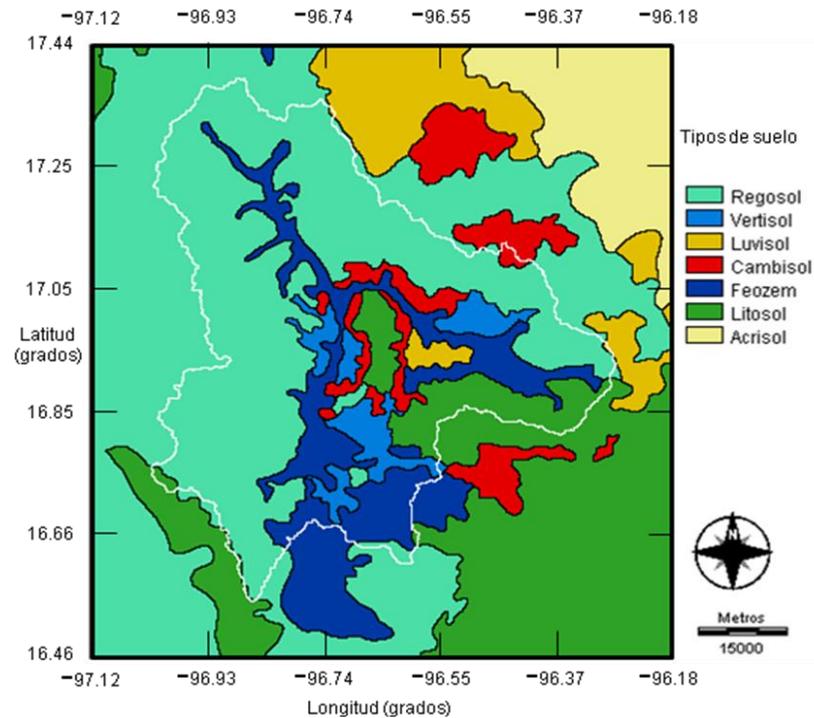
**Tabla 3.4.** Descripción edafológica según tipo de suelo presentes en la zona de estudio.

<b>Clave</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Textura</b>	<b>Clave</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Textura</b>
5406	Regosol	Gruesa	5211	Luvisol	Fina
5380	Regosol	Gruesa	5696	Regosol	Media
5555	Vertisol	Media	5655	Litosol	Fina
5317	Regosol	Media	5674	Feozem	Media
5585	Luvisol	Media	5663	Vertisol	Fina
5622	Cambisol	Media	5653	Feozem	Media
5617	Regosol	Media	5662	Feozem	Media
5446	Regosol	Gruesa	5711	Regosol	Media
5457	Feozem	Media	5603	Litosol	Media
5556	Litosol	Fina	5609	Litosol	Gruesa
5564	Vertisol	Gruesa	5534	Luvisol	Fina
5451	Regosol	Gruesa	5394	Regosol	Media
5586	Vertisol	Fina	5256	Litosol	Media
5590	Regosol	Gruesa	5460	Regosol	Media
5559	Cambisol	Media	5362	Feozem	Media
5558	Cambisol	Media	5444	Cambisol	Media
5540	Cambisol	Media	5231	Acrisol	Media
5627	Vertisol	Fina	5385	Acrisol	Fina
5624	Regosol	Gruesa	5520	Luvisol	Fina
5675	Regosol	Media	5650	Cambisol	Media

Clave	Tipo de suelo	Textura	Clave	Tipo de suelo	Textura
5525	Regosol	Media	5482	Regosol	Media
5557	Cambisol	Media	5626	Regosol	Media
5637	Cambisol	Media	5728	Regosol	Media
5600	Feozem	Media	5643	Cambisol	Media
5511	Cambisol	Media	5770	Regosol	Media
5606	Litosol	Media	576	Regosol	Media
5667	Regosol	Media	5583	Litosol	Media
5596	Feozem	Media			



**Figura 3.18.** Imagen raster de descripción edafológica de la zona de estudio.

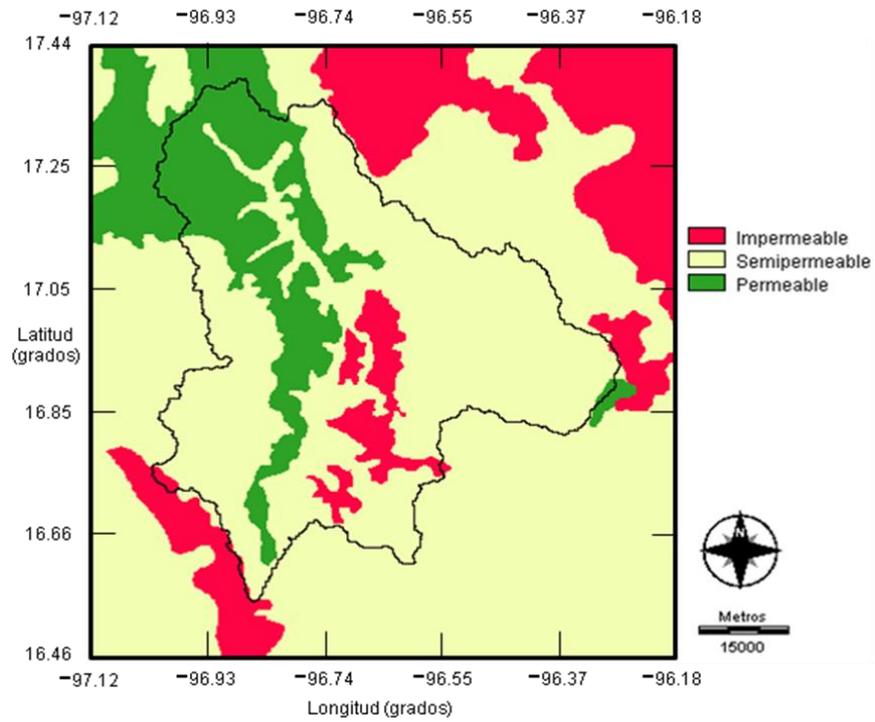


**3.19.** Imagen vectorial de edafología de la zona de estudio.

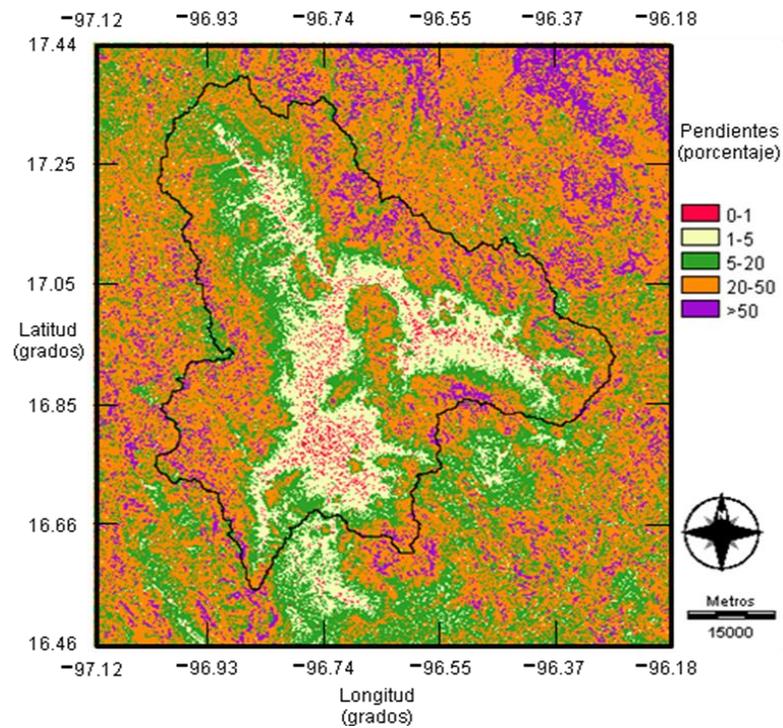
La generación de la imagen de permeabilidad requerida para el módulo de infiltración implementado en el módulo del ciclo hidrológico, se realizó en base en una clasificación dada a la edafología presente en la zona de estudio y de la textura de suelo (fina, media y gruesa), quedando la clasificación de permeabilidad de la siguiente manera: impermeable, semipermeable y permeable, tal como se observa en la figura 3.20.

### **Pendientes**

Al obtener el porcentaje de pendientes en la zona de estudio, se utilizó la imagen del MNA con una resolución espacial de 100 m., haciendo una clasificación de acuerdo a los intervalos mostrados en la tabla de Benítez, con el módulo Slope, generándose, el mapa de pendientes en porcentaje el cual se muestra en la figura 3.21.

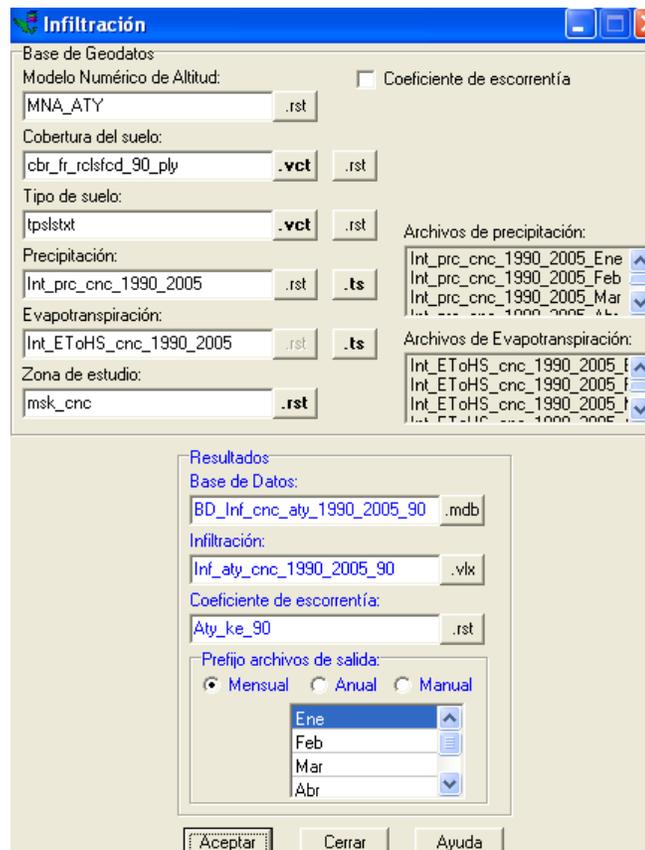


**Figura 3.20.** Imagen de permeabilidad según tipo de suelo en la zona de estudio.



**Figura 3.21.** Imagen del porcentaje de pendiente en la subcuenca de estudio.

Una vez teniendo las bases de datos de todos los parámetros de entrada, se procedió a emplear el módulo de Infiltración para estimar la infiltración generada en 1990 y 2005, para esto, se requirió del archivo del MNA del área de estudio, del de la cobertura de uso de suelo, del el tipo de suelo, del el grupo matricial (.ts) de precipitación y de la evapotranspiración, generados previamente. Los tres primeros archivos requeridos (pendiente, cobertura de suelo, tipo de suelo), se emplearon para generar las imágenes del coeficiente de escurrimiento, tomando como base la tabla de Benítez respectivamente, para los años de estudio antes mencionados. Como ya se ha señalado, éste proceso, se realizó dos veces, en la primera vez, se ocupó la imagen vectorial (.vct) de cobertura del año 1990 y la segunda, se utilizó la del año 2005. En la figura 3.22, se muestra el módulo de infiltración empleado en la estimación de la infiltración para el año de 1990.

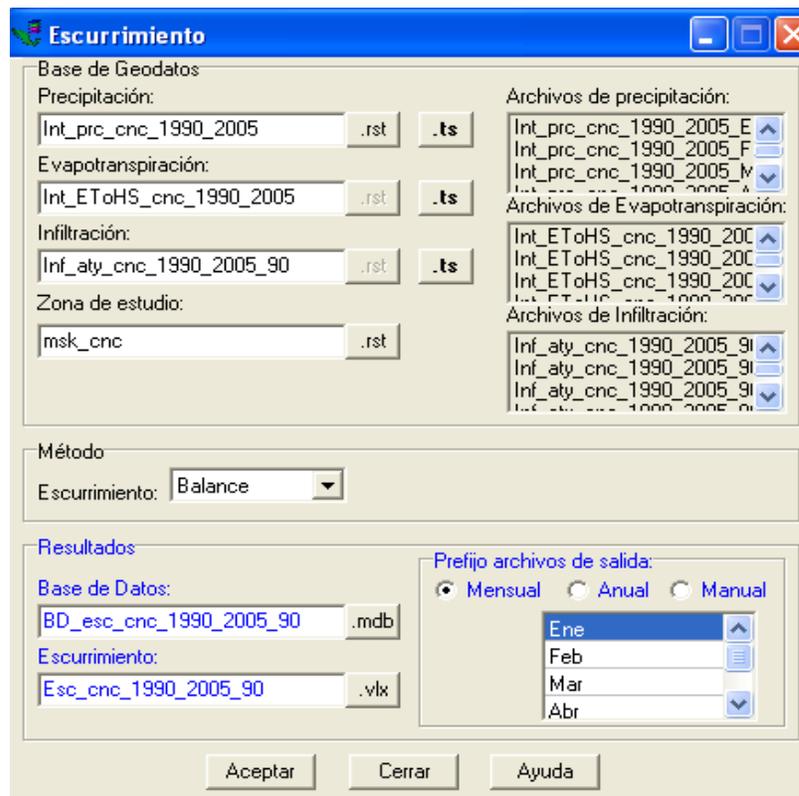


**Figura 3.22.** Módulo de estimación de la infiltración para 1990.

### 3.4.4 Escurrimiento

Finalmente, para la estimación de la lámina de escurrimiento mensual y anual, por medio de balance, se utilizaron los archivos previamente generados (el grupo matricial de precipitación, evapotranspiración e infiltración), además, del MNA.

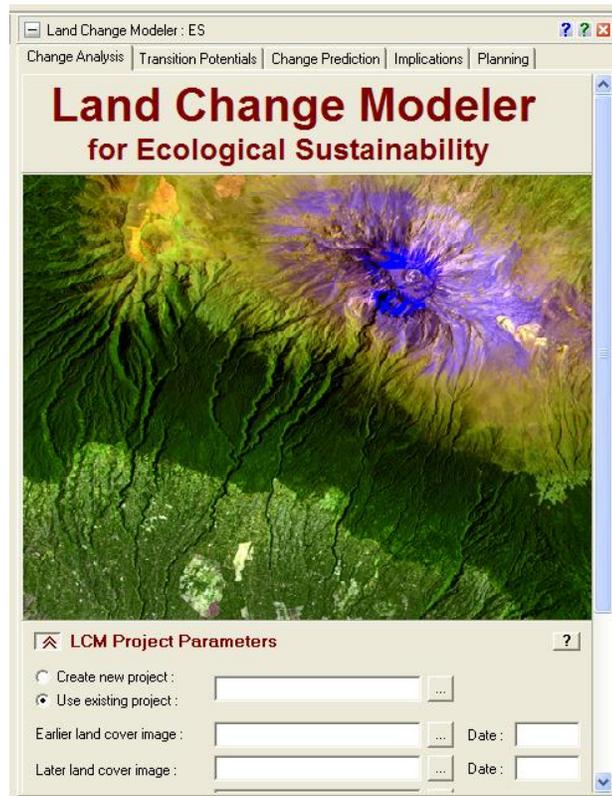
El procedimiento antes descrito, se empleó dos veces, cambiando únicamente el grupo matricial de entrada, según el año de estimación de la infiltración, con el fin de poder realizar posteriormente, el análisis del escurrimiento, debido a los cambios de uso de suelo durante el período de 15 años. En la figura 3.23, se muestra el módulo de escurrimiento empleando el grupo matricial de infiltración para el año de 1990.



3.23 Módulo para la estimación del escurrimiento hídrico.

### 3.5 ANÁLISIS DE CAMBIO EN LAS COBERTURAS DE USO DE SUELO.

Posteriormente, en el análisis del cambio de coberturas del uso de suelo correspondientes a los años de 1990 y 2005, se utilizó el módulo Land Change Modeler (Figura 3.24) implementado en Idrisi, el cual, permite realizar el análisis y la predicción de los cambios de cobertura del suelo, en este caso, fue utilizado para el análisis de los cambios de cobertura ocurridos durante el período de 15 años. Para realizar esto, fue necesario tener los mapas de cobertura de los años en estudio de 1990 y 2005, los cuales, ya se habían previamente generado en procesos anteriores y fueron, los que se utilizaron como archivos de entrada en el módulo de Land Change Modeler.



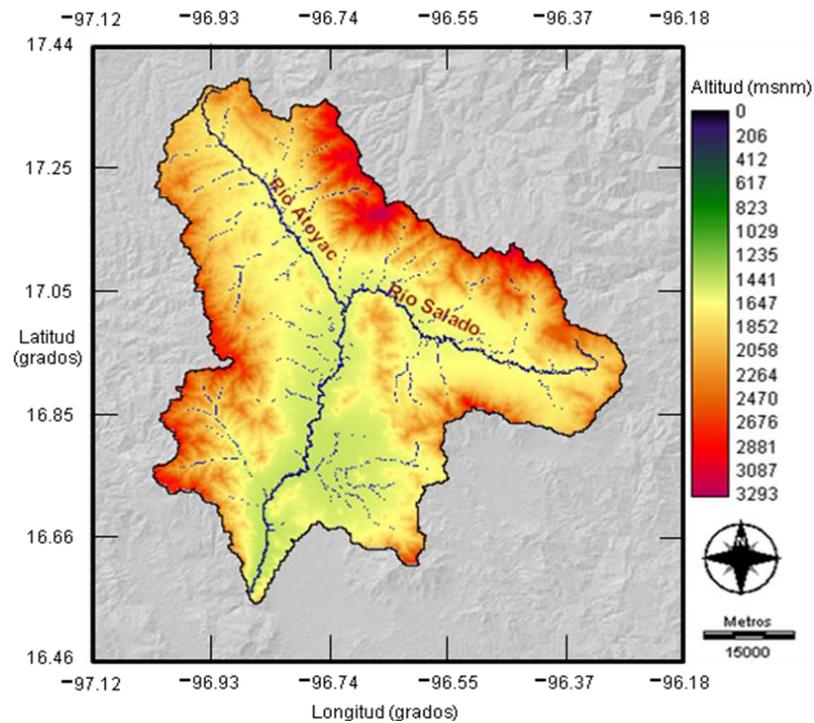
3.24 Módulo de Land Change Modeler para el análisis de coberturas del suelo.

## CAPÍTULO 4

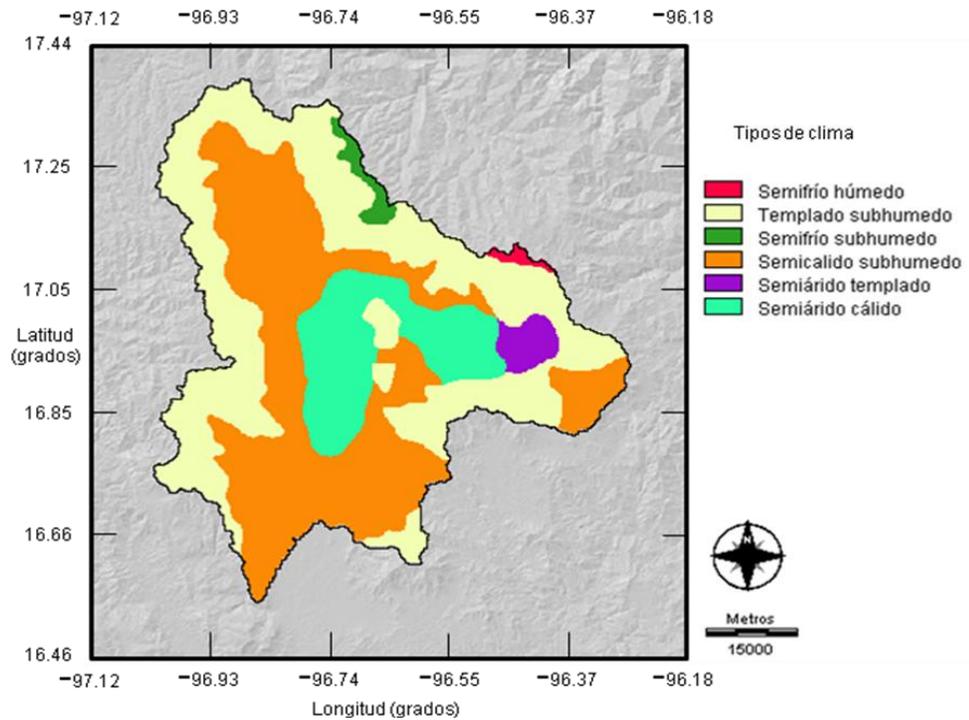
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LA SUBCUENCA

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos de los procesos realizados en el empleo del módulo del ciclo hidrológico para obtener la estimación de la esorrentía en la subcuenca Atoyac y la discusión de los mismos. Donde en un principio, el análisis se realizó a nivel de mosaico y posteriormente, a nivel de subcuenca. En la imagen del MNA de la subcuenca Atoyac, localizado en los Valles Centrales del Estado de Oaxaca, se observa que existen diferentes altitudes, donde, la altitud mínima de 1,417 msnm (metros sobre el nivel del mar) se encuentra en el sitio donde se ubica la salida de la cuenca. Mientras que, en base a las altitudes presentes en la subcuenca, es como se obtuvo la red hidrográfica presente en la ésta (Figura 4.1), que de acuerdo a la forma de la red de drenaje que presenta, se establece que es dendrítica y sus corrientes efímeras (Sánchez, 1987 y Campos, 1998) y la figura 4.2 muestra el tipo de clima CONABIO (2009).



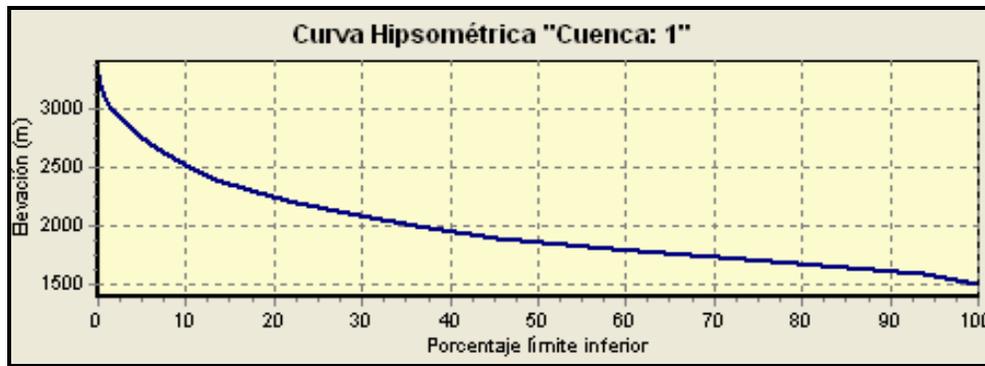
**Figura 4.1.** Imagen compuesta del MNA y la red de drenaje de la subcuenca.



**Figura 4.2.** Tipos de clima que prevalecen en la subcuenca de estudio.

En la estimación de los parámetros fisiográficos de la subcuenca Atoyac, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se muestran en la tabla 4.1. Según Campos (1998), una cuenca con un área de 2,500 a 5,000 km<sup>2</sup> se considera grande, por lo que se establece que, esta subcuenca pertenece a esta categoría, ya que su área estimada es de 3,726 km<sup>2</sup>.

Mientras que, en base al valor obtenido del coeficiente de compacidad (Kc),  $Kc = 2.2$  (tabla 4.1), se determina que la cuenca es alargada, debido a que sí, el valor de kc va de 1 a 1.25, la cuenca es circular y con forme su valor crece, se vuelve alargada (Ortiz, 1996 y Hermelin, 2005). En tanto que, la figura 4.3 muestra la grafica de la curva hipsométrica generada conjuntamente en la estimación de los parámetros fisiográficos.



**Figura 4.3.** Grafica de la curva hipsometrica de la subcuenca Atoyac.

La importancia de conocer los parámetros fisiográficos de la subcuenca es importante, porque con ellos es posible identificar las particularidades de las diversas formas del relieve y su relación con la red de drenaje, además, del comportamiento del ciclo hidrológico en la subcuenca.

**Tabla 4.1.** Parámetros fisiográficos generados en la subcuenca Atoyac.

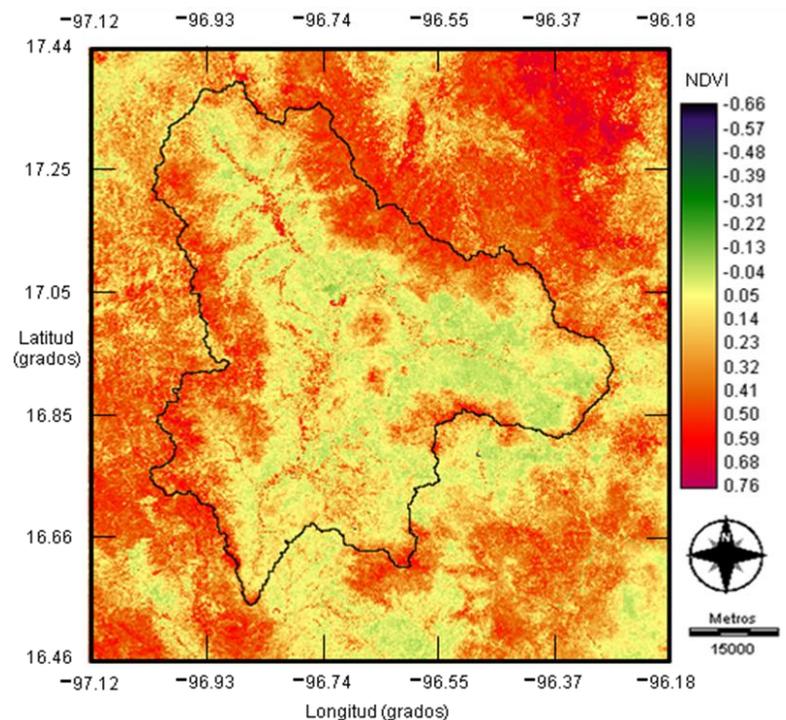
Parámetro	Nombre	Valor
A_km <sup>2</sup>	A_km <sup>2</sup> = área (km <sup>2</sup> )	3,726.63
P_km	P_km = perímetro (km)	476.6
Em_m	Em_m = elevación media (m)	1,875.54
Pm_g	Pm_g = pendiente media (m)	10.89
Pm_p	Pm_p = pendiente media (m) (%)	19.84
Kc	Kc = índice o coeficiente de compacidad	2.2
Rci	Rci = radio o relación de circularidad	0.21
Rh	Rh = curva hipsométrica	2.79
Lc_km	Lc_km = longitud del eje del río principal (km)	144.24
La_km	La_km = longitud directa del río (km)	69.81
Sh	Sh = coeficiente de sinuosidad hidráulico	0.97
Emx_m	Emx_m = elevación máxima del río principal (m)	2188
Emn_n	Emn_m = elevación mínima del río principal (m)	1,408.76
Sc	Sc = pendiente promedio del río principal	0.005
Tc_Kirpich_h	Tc_Kirpich_h = tiempo de concentración en horas	22.65
Tc_CHPW_h	Tc_CHPW_h = tiempo de concentración en horas	22.77

## 4.2 COBERTURAS DE USO SUELO

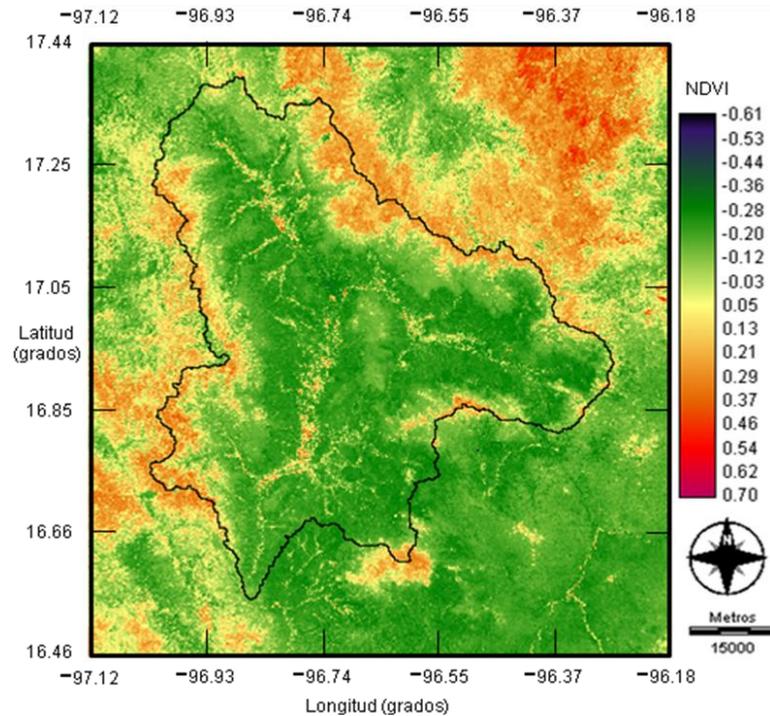
En el proceso previo a la clasificación, se estimó el NDVI a las imágenes de cobertura de suelo para los años de 1990 y 2005, los cuales se presentan en las figuras 4.4 y 4.5. Para obtener la estimación de las áreas de éstas, se realizó una clasificación de las coberturas de suelo tal como se muestra en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Análisis de la vegetación en el mosaico

NDVI	AÑOS	
	1990	2005
<b>Hectáreas (ha)</b>		
<b>Sin vegetación</b>	78,518	736,818
<b>Con vegetación</b>	981,606	323,306



**Figura 4.4.** Imagen de NDVI según cobertura del suelo de 1990.

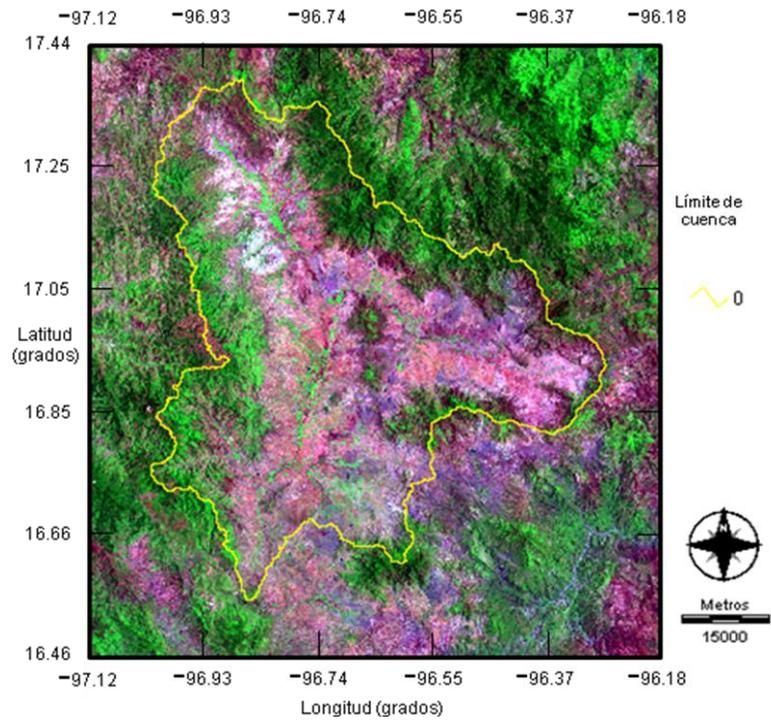


**Figura 4.5** Imagen de NDVI según cobertura del suelo de 2005.

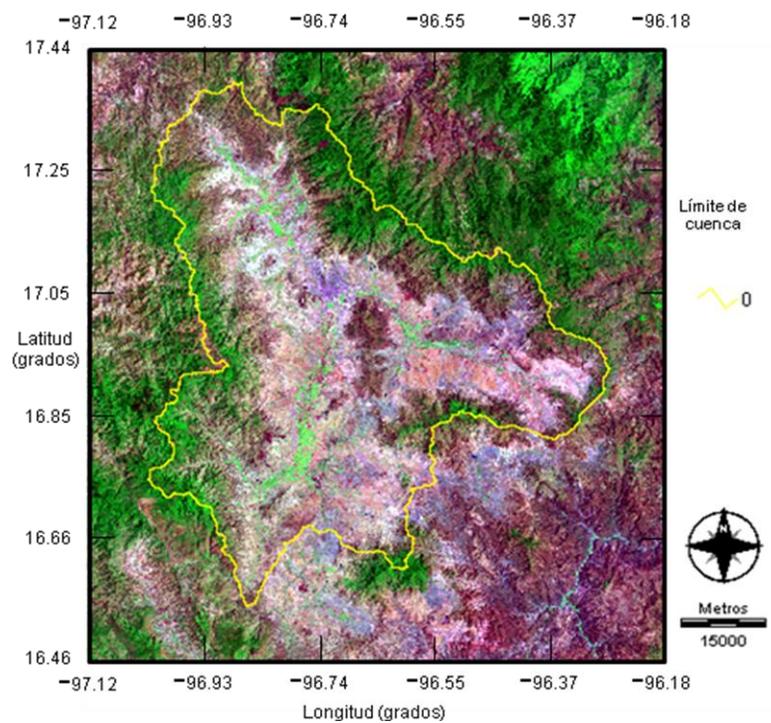
En las siguientes figuras 4.6 y 4.7, se muestran las imágenes compuestas (BGR247) en falso color, que fueron utilizadas para la digitalización de sitios de entrenamiento de las coberturas de suelo elegidas en la zona de estudio, ya que es la imagen compuesta en la que mejor se identifican los diferentes tipos de cobertura de interés. Las coberturas de suelo consideradas en la clasificación con su identificador se muestran en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Coberturas de uso de suelo de interés en el estudio.

Identificador	Cobertura de suelo
1	Bosque
2	Agricultura
3	Agua
4	Zona urbana
5	Pastizal

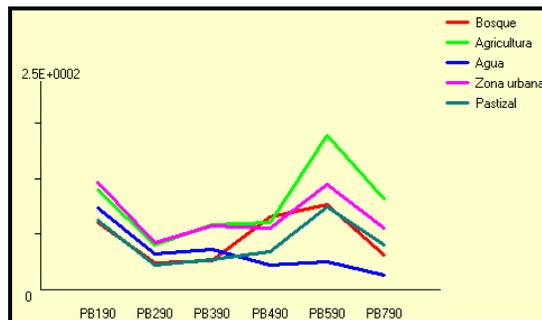


**Figura 4.6.** Imagen compuesta en falso color (BGR, 247) de 1990.

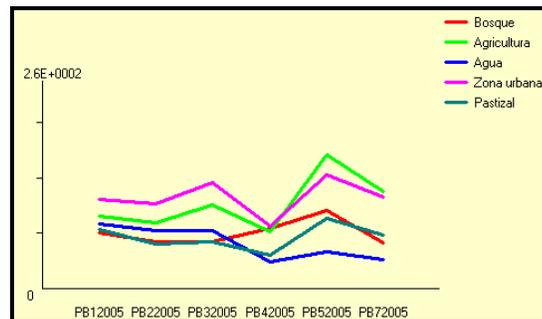


**Figura 4.7.** Imagen compuesta en falso color (BGR, 247) de 2005.

Las firmas espectrales generadas con el módulo de SIGCOMP de las coberturas de uso de suelo elegidas se observan en la figura 4.8, que indican que también se realizó la clasificación de las coberturas de uso de suelo en la zona de estudio.



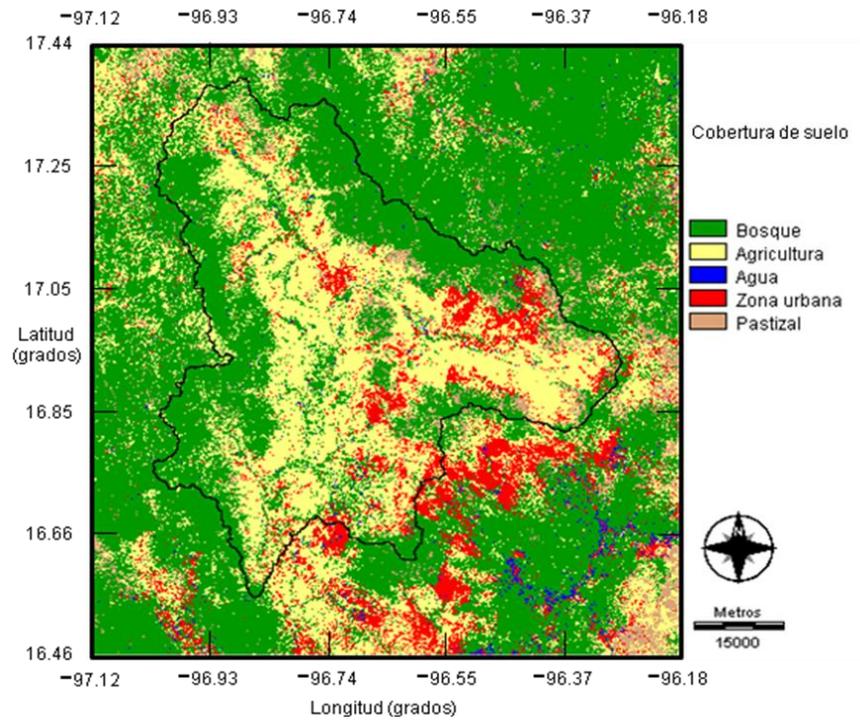
a) Sitios de entrenamiento de 1990



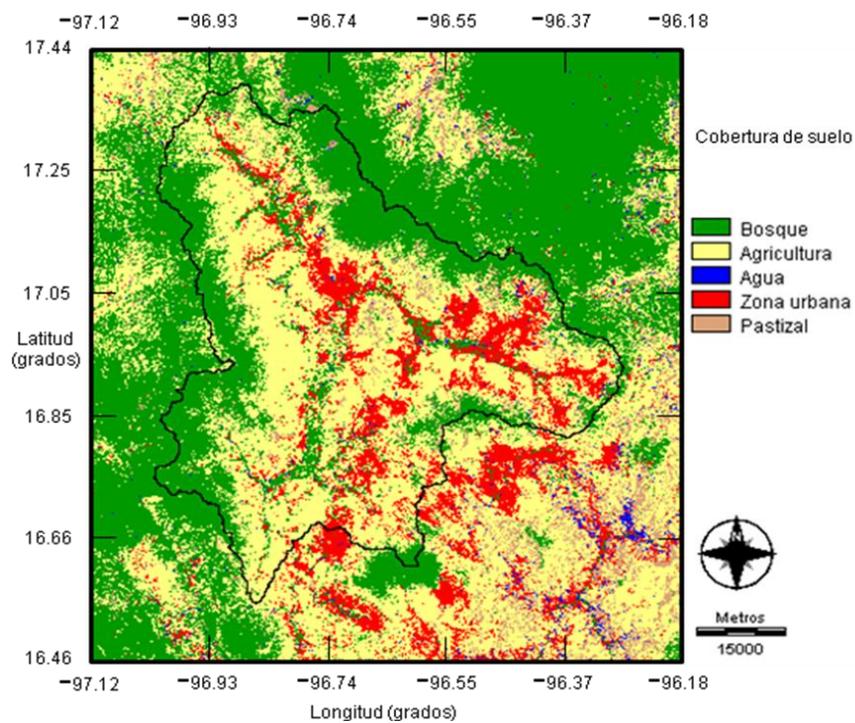
b) Sitios de entrenamiento de 2005.

**Figura 4.8.** Firmas espectrales generados con el módulo de SIGCOMP.

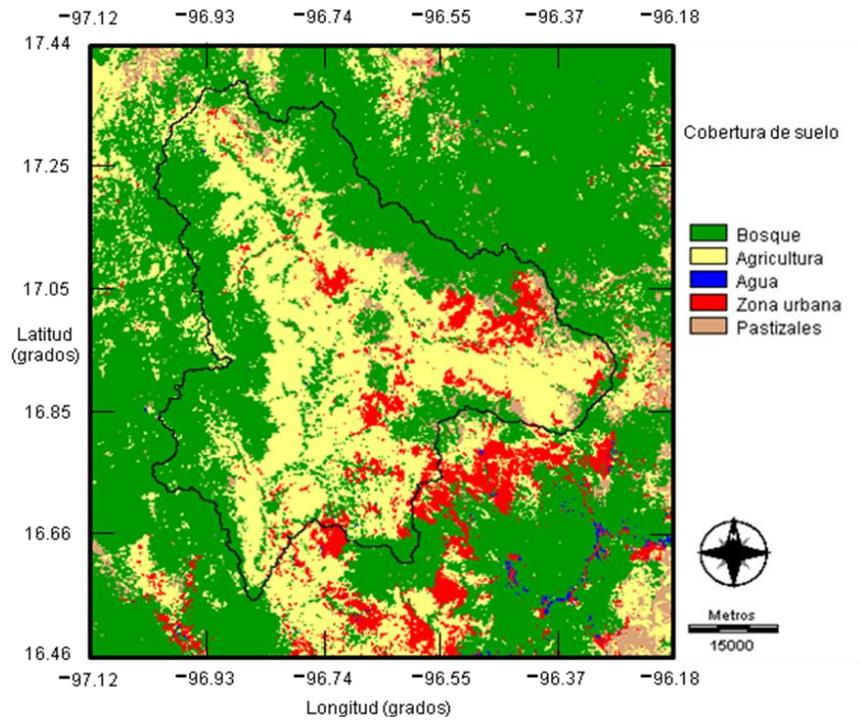
Una vez hecho el análisis anterior, ahora presenta la clasificación realizada a partir de los usos de suelo en la subcuenca, en el que se aplicó el clasificador MAXLIKE (Figuras 4.9 y 4.10), en donde, se puede observar que las coberturas no están muy bien definidas, efecto conocido como sal y pimienta, es por eso que, se aplicó un filtrado para eliminar este efecto. En las figuras 4.11 y 4.12, se muestran las imágenes de cobertura de uso de suelo posterior al filtrado, donde ahora muestran aglomerados de las coberturas de suelo más definidas.



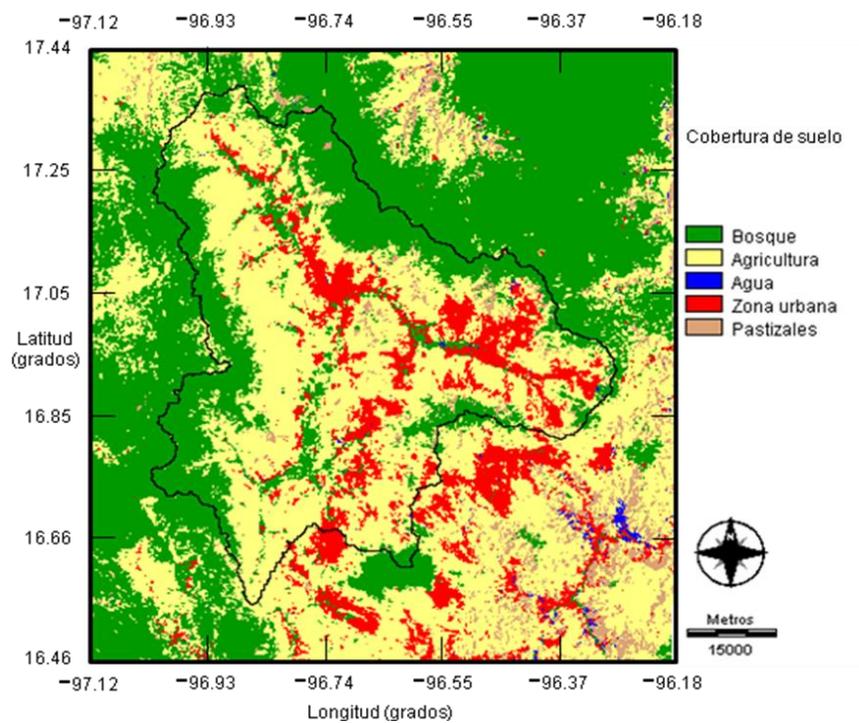
**Figura 4.9.** Imagen resultante de la clasificación con maxlike de 1990.



**Figura 4.10.** Imagen resultante de la clasificación con maxlike de 2005.



**Figura 4.11.** Imagen clasificada y filtrada de la cobertura de uso de suelo de 1990.



**Figura 4.12.** Imagen clasificada y filtrada de la cobertura de uso de suelo de 2005.

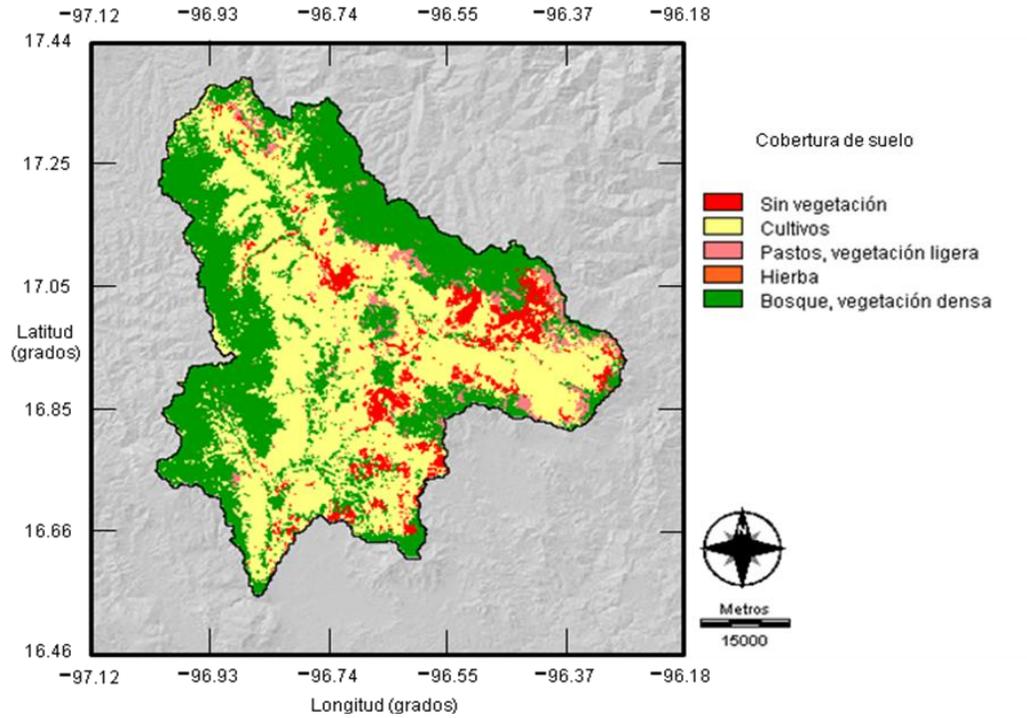
En la siguiente tabla 4.4, se presentan los resultados del análisis de las áreas que ocupaban las coberturas de suelo, en base a las imágenes clasificadas (1990 y 2005) en kilómetros cuadrados y porcentaje.

**Tabla 4.4.** Resultados del análisis de los cambios de cobertura de suelo (1990-2005).

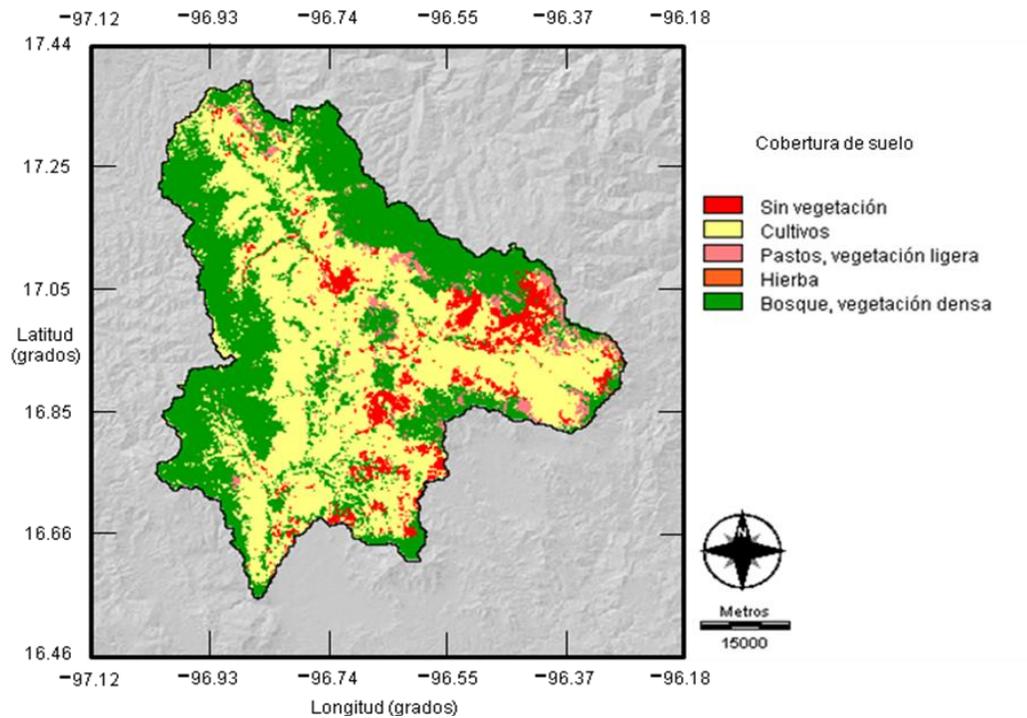
Coberturas	Año				Pérdida/Ganancia	
	1990		2005			
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(%)
<b>Bosque</b>	1526.44	40.96	1105.82	29.67	- 420.62	-27.56
<b>Agricultura</b>	1782.80	47.84	2002.86	53.74	220.06	12.34
<b>Agua</b>	2.13	0.06	4.33	0.12	2.20	103.29
<b>Zona urbana</b>	274.75	7.37	529.97	14.22	255.22	92.89
<b>Pastizal</b>	140.51	3.77	83.65	2.25	-56.86	-40.47

En términos de porcentaje, se observó que las áreas de bosque ocupaban en 1990 el 40.96% (1526.44 km<sup>2</sup>), la agricultura 47.84% (1782.80 km<sup>2</sup>), el agua 0.06% (2.13 km<sup>2</sup>), zona urbana 7.37% (277.45 km<sup>2</sup>) y los pastizales el 3.77% (140.51 km<sup>2</sup>). Mientras que para el 2005, el bosque tuvo un descenso de 11.29%, junto con áreas de pastizales de 1.52%, en tanto que, las áreas agrícolas aumentaron 5.9%, la zona urbana un 6.85% y el agua 0.06%, esta última su incremento quizá se deba más a las precipitaciones registradas que a la construcción de presas en el área de estudio.

Los resultados de clasificación de las imágenes de cobertura de suelo que serán utilizadas en el proceso de infiltración, se muestran en las figuras 4.13 y 4.14.



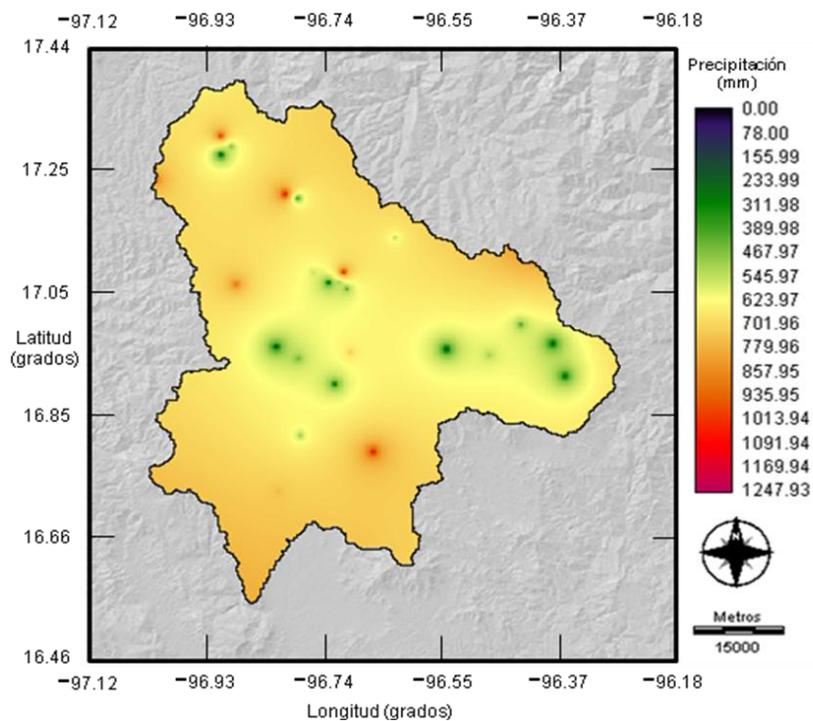
4.13. Imagen clasificada requerida en el proceso de infiltración para 1990.



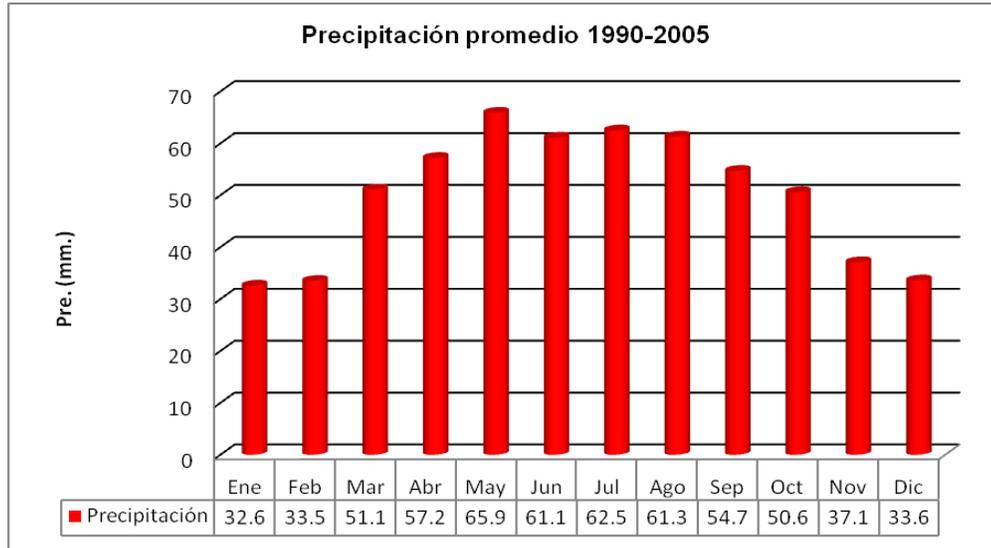
4.14. Imagen clasificada requerida en el proceso de infiltración para 2005.

### 4.3 PRECIPITACIÓN

Como resultados del empleo del módulo de precipitación, se generaron 12 archivos en formato raster (imágenes) de la precipitación promedio mensual y un archivo matricial (imagen) de la precipitación promedio anual, que representan los promedios registrados durante el período de 15 años de estudio realizado. La figura 4.15, muestra la distribución superficial de la precipitación total promedio en la subcuenca Atoyac, en tanto que, en el anexo A, se muestran las imágenes de precipitación promedio por mes. Mientras que, en la figura 4.16, se muestran los registros de las precipitaciones mensuales del promedio anual, en la que se puede observar que, el registro más alto se presentó durante el mes de mayo.



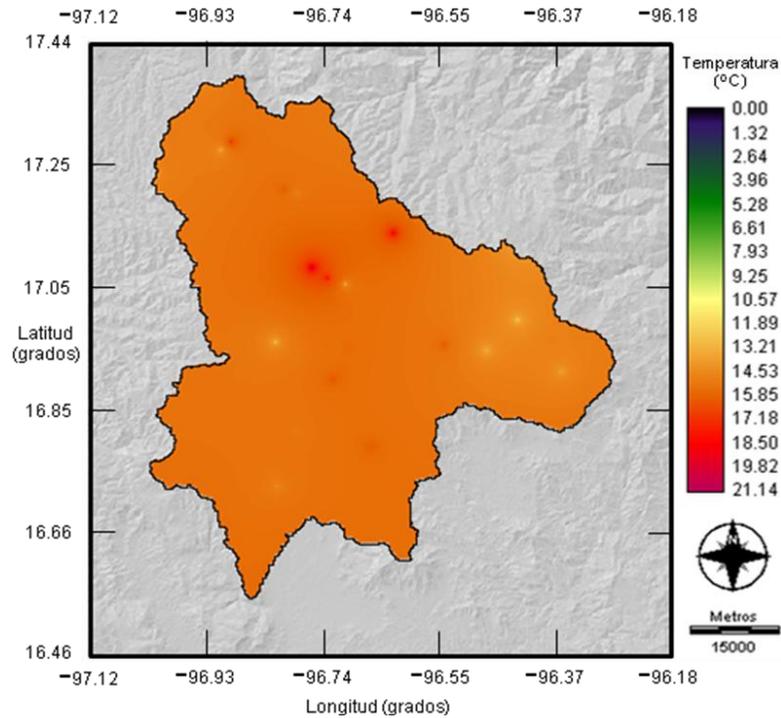
**Figura 4.15.** Imagen de distribución superficial total de la precipitación promedio del área de estudio.



**Figura 4.16.** Hietograma de precipitación promedio mensual anual del área de estudio.

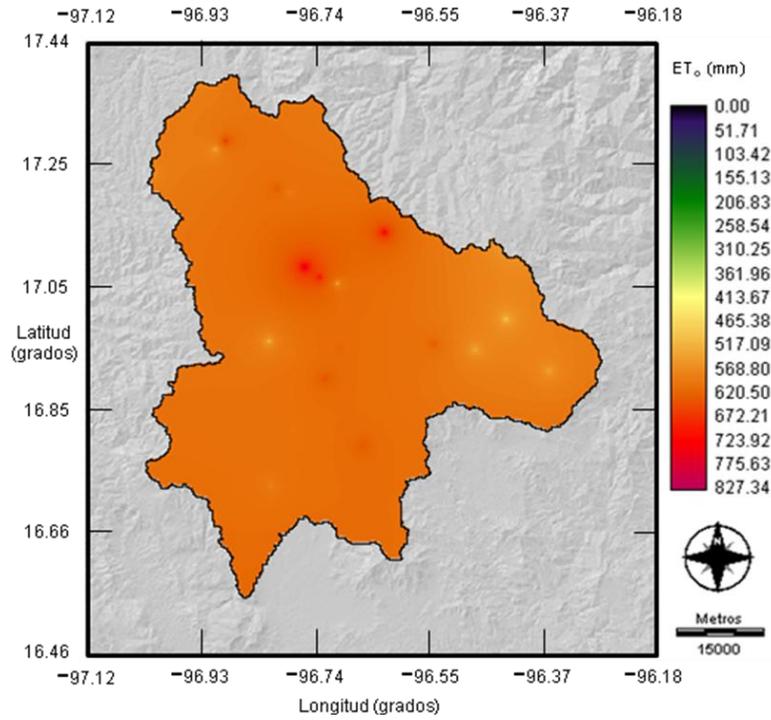
#### 4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN

El resultado de la imagen de distribución superficial anual de temperatura promedio (°C), que ha prevalecido en la zona de estudio durante el período de 15 años, se puede apreciar en la figura 4.17, mientras que, los registros mensuales se presentan en el anexo B.



**Figura 4.17.** Imagen de distribución espacial de la temperatura promedio anual.

En la estimación de la evapotranspiración, empleando el método de Hargreaves-Samani, se generó el mapa de evapotranspiración total anual en formato raster, que es la que se muestra en la figura 4.18. Además, se generaron 12 archivos matriciales de evapotranspiración mensuales, los cuales, se muestran en el anexo C. En tanto que, en la figura 4.19, se presenta el histograma de la evapotranspiración mensual anual, donde se observa que la mayor transpiración se presentó durante el mes de junio.



4.18. Imagen superficial de distribución de la evapotranspiración anual promedio.

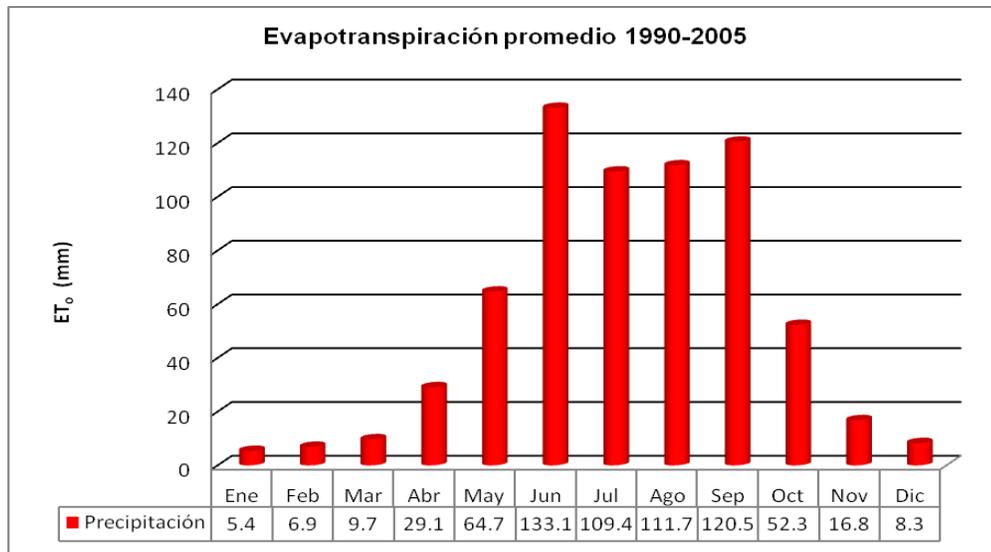
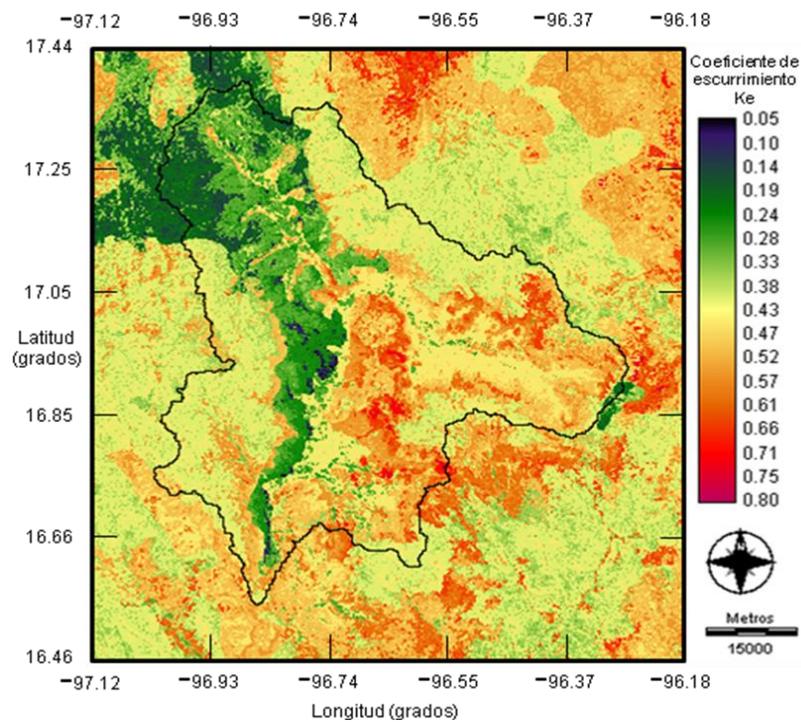


Figura 4.19. Histograma de la evapotranspiración mensual en la subcuenca.

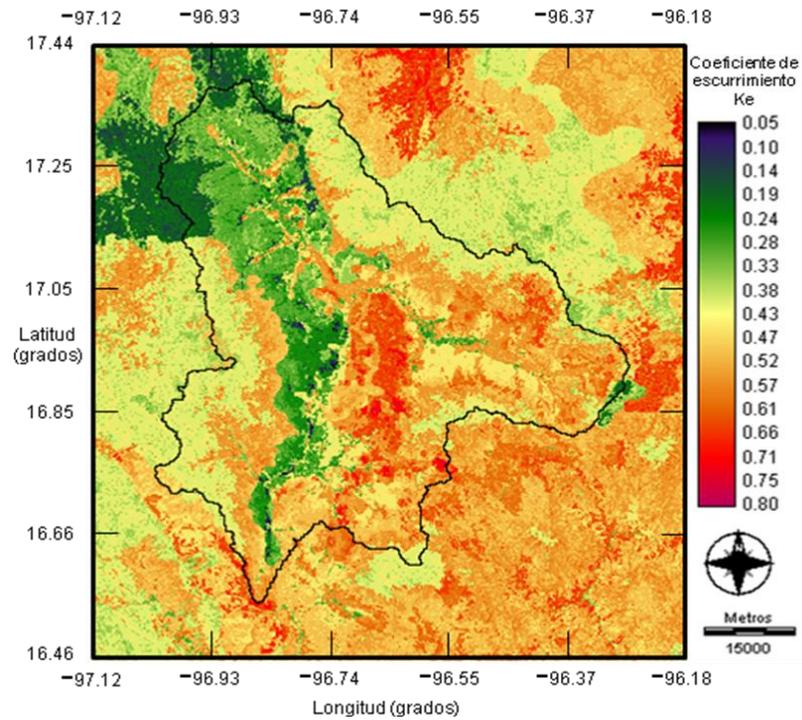
## 4.5 INFILTRACIÓN

Durante este proceso, se generaron las imágenes de coeficiente de escurrimiento de la zona de estudio para el año de 1990 y 2005, en base a las características de pendiente, cobertura del suelo y tipo de suelo (Franco, 2008), los cuales, se muestran en la figuras 4.20 y 4.21. Posteriormente, se generaron los archivos matriciales de la infiltración mensual promedio anual para el período de 15 años y los archivos de infiltración total anual de 1990 y 2005, basados en las características fisiográficas y climáticas, prevalcientes en la zona de estudio, los cuales, se observan en las figuras 4.30 y 4.31.

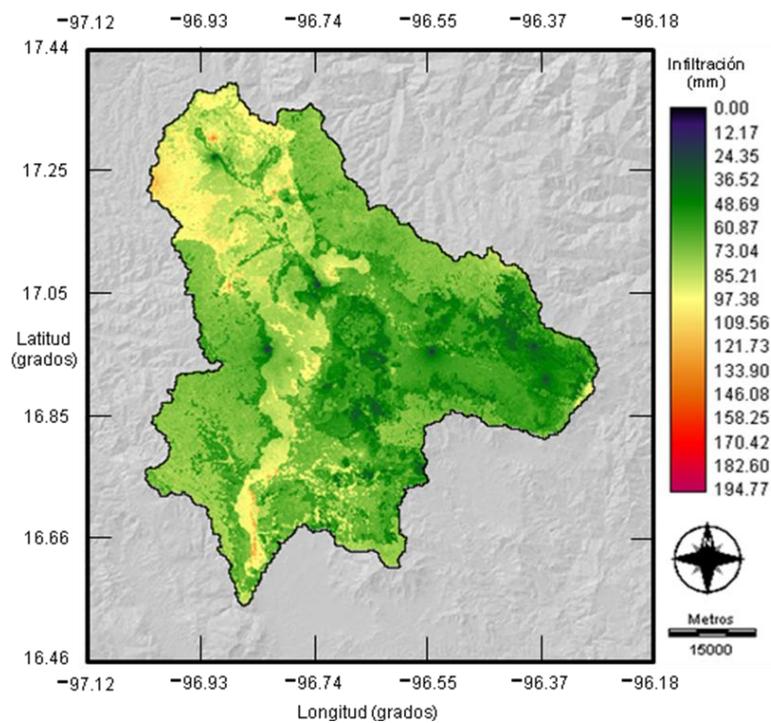
Las imágenes de infiltración resultantes de los meses de junio, julio, agosto y septiembre para 1990 y 2005, se muestran en las siguientes figuras que van de la 4.22 a la 4.29.



**Figura 4.20.** Imagen del coeficiente de escurrimiento generado para 1990.



**Figura 4.21.** Imagen del coeficiente de escurrimiento generado para 2005.



**Figura 4.22.** Imagen superficial de infiltración de junio de 1990.

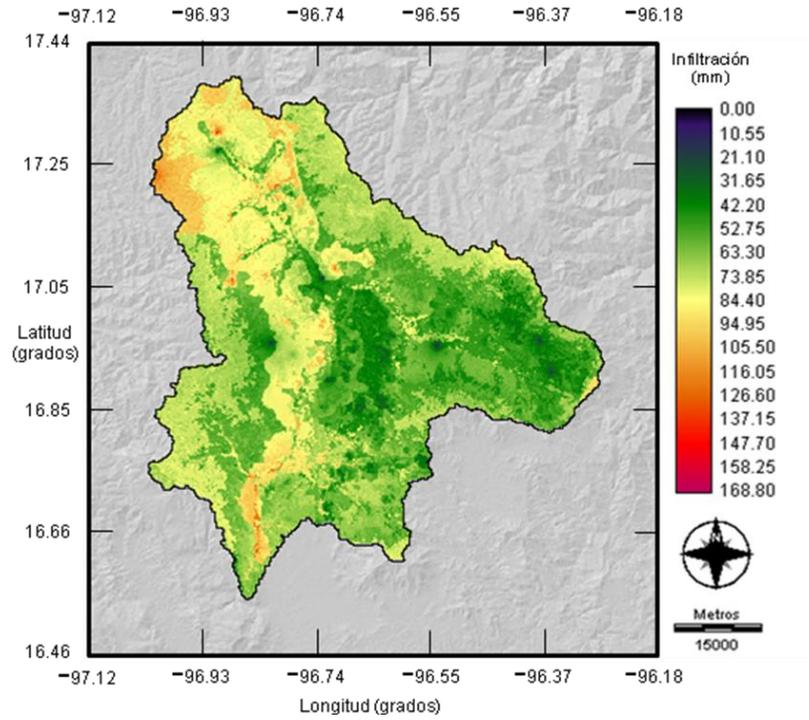


Figura 4.23. Imagen superficial de infiltración de de junio de 2005

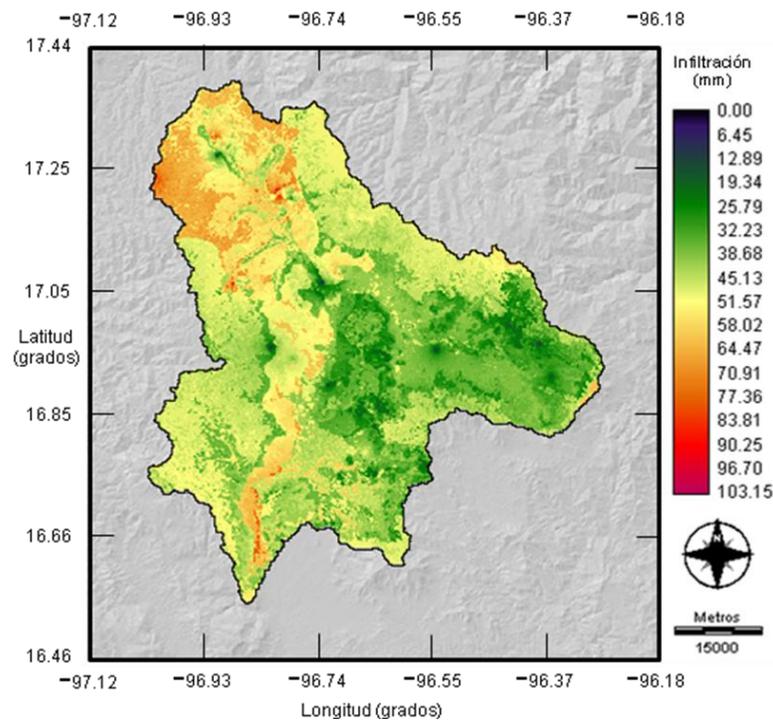
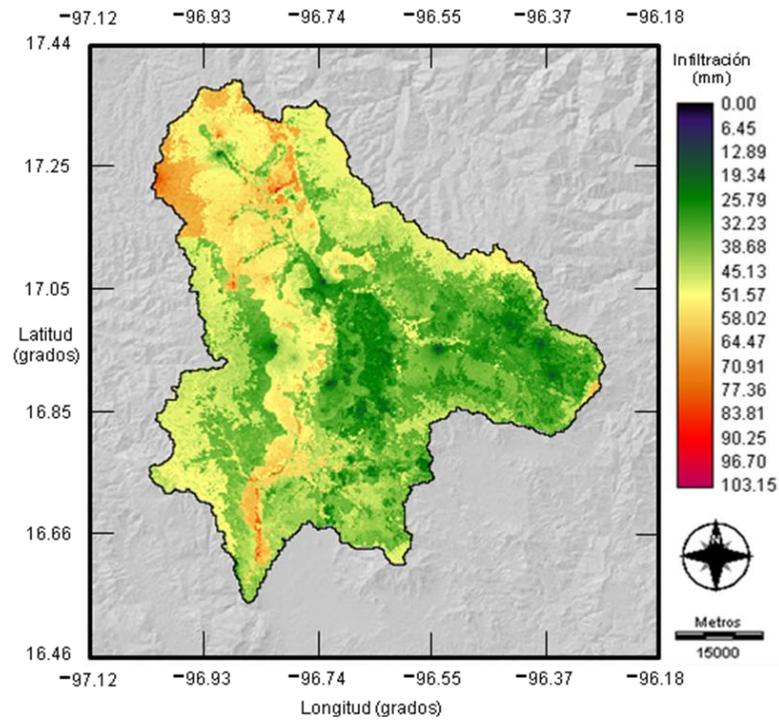
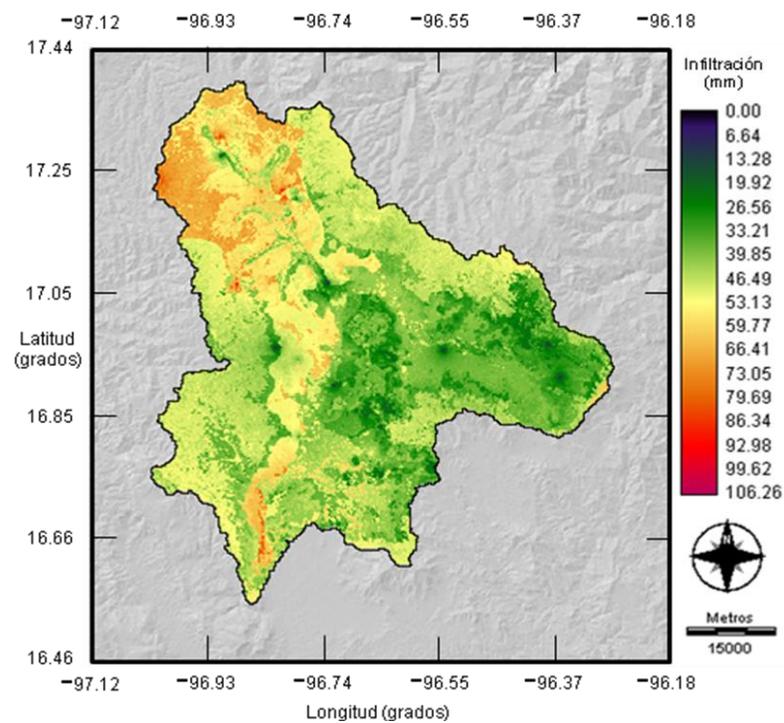


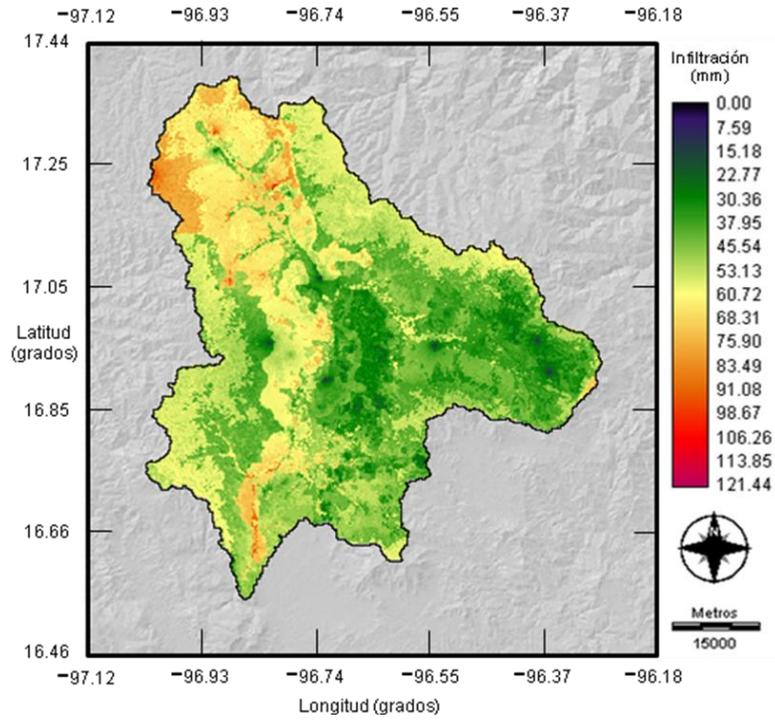
Figura 4.24. Imagen superficial de infiltración de julio de 1990



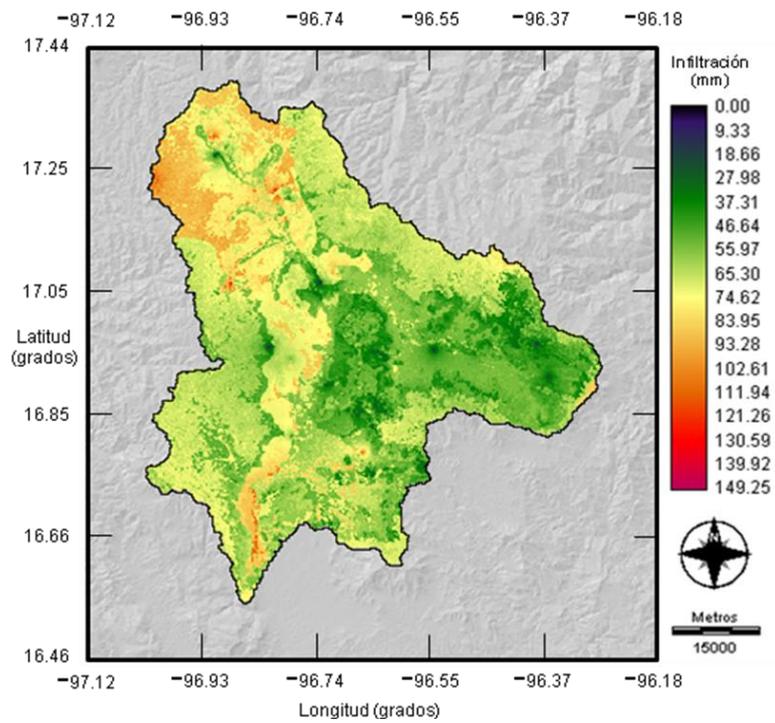
**Figura 4.25.** Imagen superficial de infiltración de julio de 2005



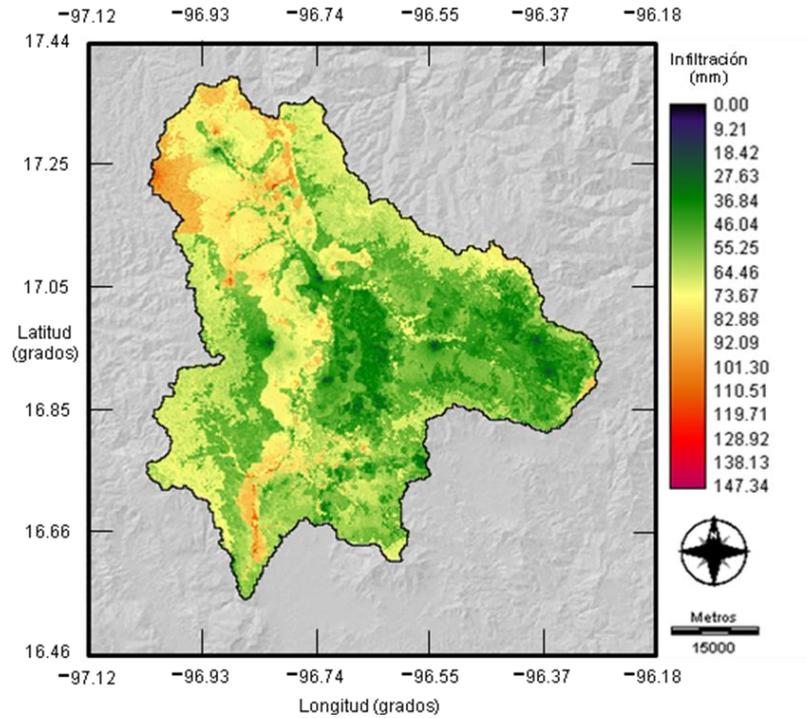
**Figura 4.26.** Imagen superficial de infiltración de agosto de 1990



**Figura 4.27.** Imagen superficial de infiltración de agosto de 2005



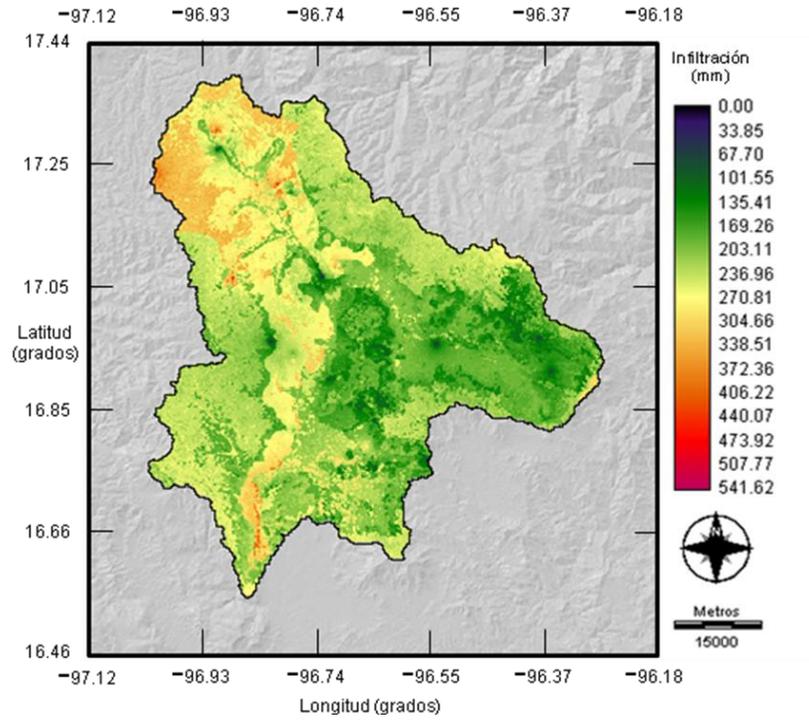
**Figura 4.28.** Imagen superficial de infiltración de septiembre de 1990



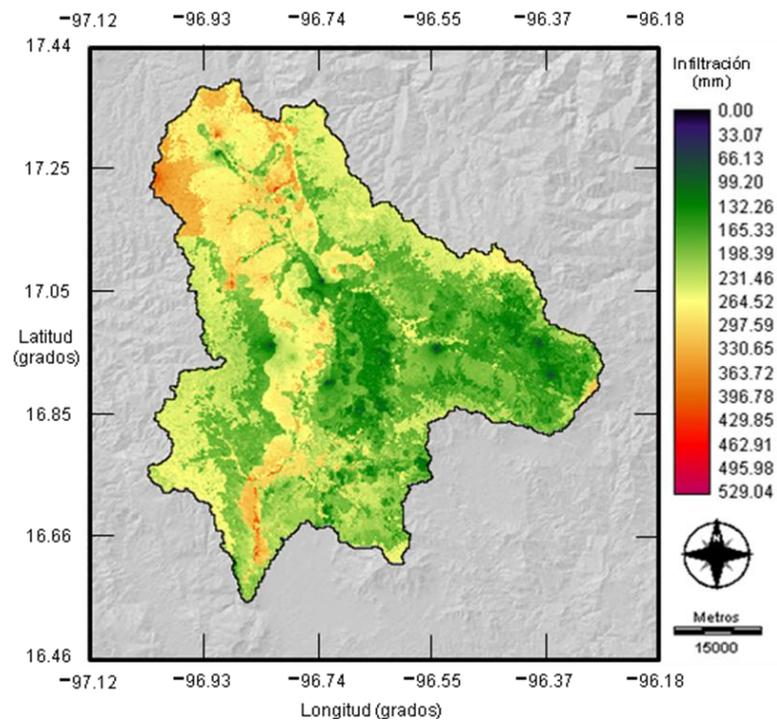
**Figura 4.29** Imagen superficial de infiltración de septiembre de 2005

Aquí cabe resaltar que, para los meses de junio y septiembre, en ambos años de estudio (1990 y 2005), es donde se presentaron las tasas más altas de infiltración, con respecto a los meses de julio y agosto. Sin lugar a dudas, quizá este comportamiento se deba más a la forma de precipitación que se presentó durante estos meses.

En tanto que, en base a las imágenes de infiltración total de 1990 y 2005 se observa que, sí ha existido un cambio en los procesos de infiltración en la zona de estudio, cambios que sin duda, son producto del resultado de las modificaciones que se han dado durante el transcurso de todo el período de 15 años en la cobertura del suelo de la zona de análisis.



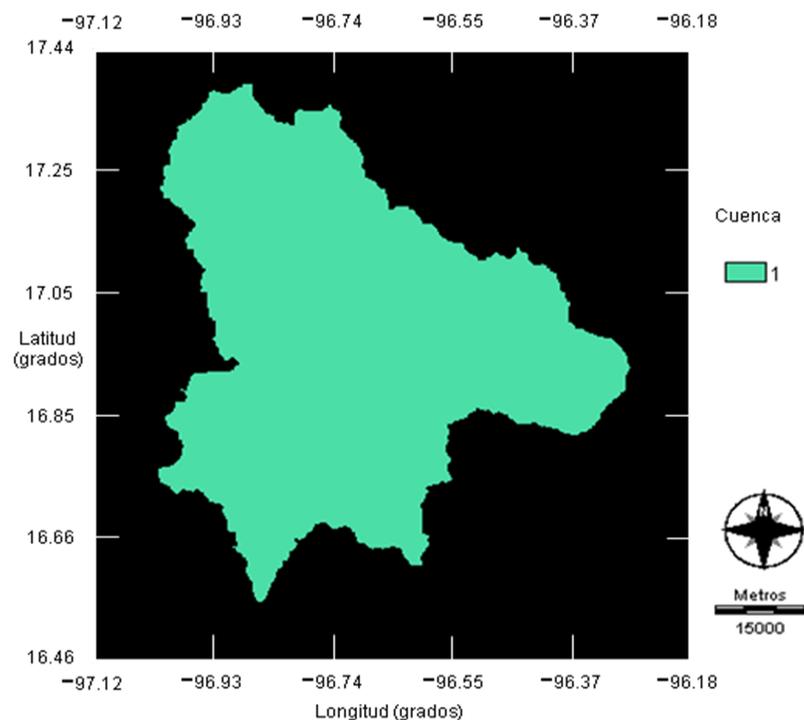
**Figura 4.30** Imagen superficial total anual de infiltración de 1990



**Figura 4.31.** Imagen superficial total anual de infiltración de 2005

#### 4.6 ESTIMACIÓN DE LA LÁMINA DE ESCURRIMIENTO

En el proceso de cálculo de la lámina de escurrimiento (mm), de forma mensual y anual, se generaron las tablas de los siguientes archivos estimados en formato .vlx de: (Esc\_1990\_2005\_90\_d.vlx) y (Esc\_1990\_2005\_05\_d.vlx), con sus respectivas bases de datos (Bd\_esc\_1990\_2005\_90\_d.mbd) y (Bd\_esc\_1990\_05\_d .mbd), los cuales están ligados con la imagen vectorial (Esc\_1990\_2005\_90\_05 d.vct) mostrada en la figura 4.32.

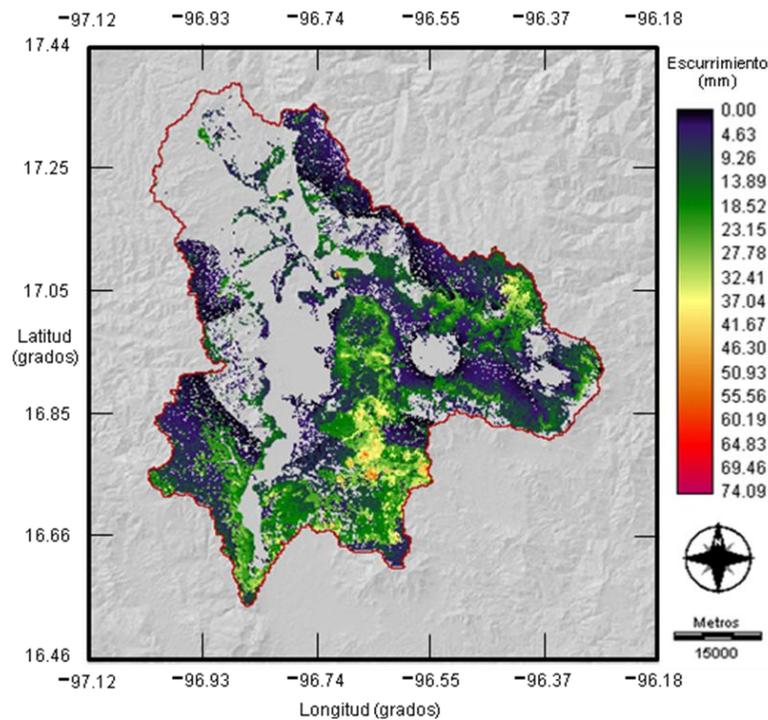


**Figura 4.32.** Imagen vectorial generada en la estimación de la lámina de escurrimiento.

Las siguientes figuras que van de la 4.33 a la 4.42, muestran la lámina de escurrimiento interanual, tanto para el año de 1990 y 2005, correspondientes a los meses junio, julio, agosto, septiembre y octubre, generadas con el empleo del módulo del ciclo del agua (Franco, 2008).

Como ya se ha señalado anteriormente, las figuras se generaron empleando el módulo de infiltración implementado dentro del módulo del ciclo del agua en el software de SIG Idrisi (Franco, 2008).

En estas imágenes, se llega a observar que realmente si ha existido una modificación del escurrimiento en la zona de estudio, con la tendencia a incrementarse en las imágenes generadas en el 2005, correspondientes a los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Estos cambios en los escurrimientos observados, se deben a los cambios de cobertura que se han dado sobre todo al crecimiento de la zona urbana de 1990 a 2005.



**Figura 4.33.** Lámina de escurrimiento superficial de Junio de 1990.

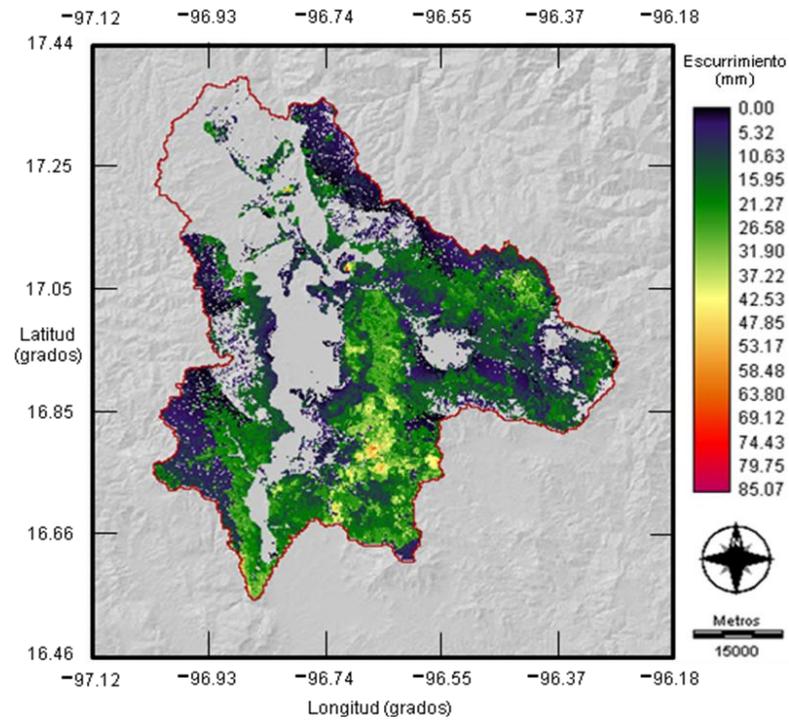


Figura 4.34. Lámina de escurrimiento superficial de Junio de 2005.

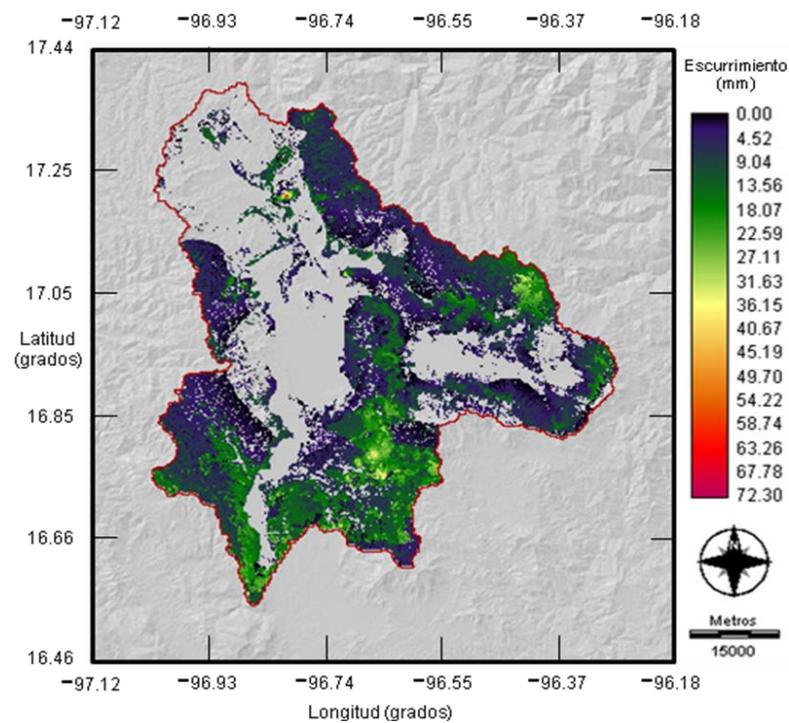
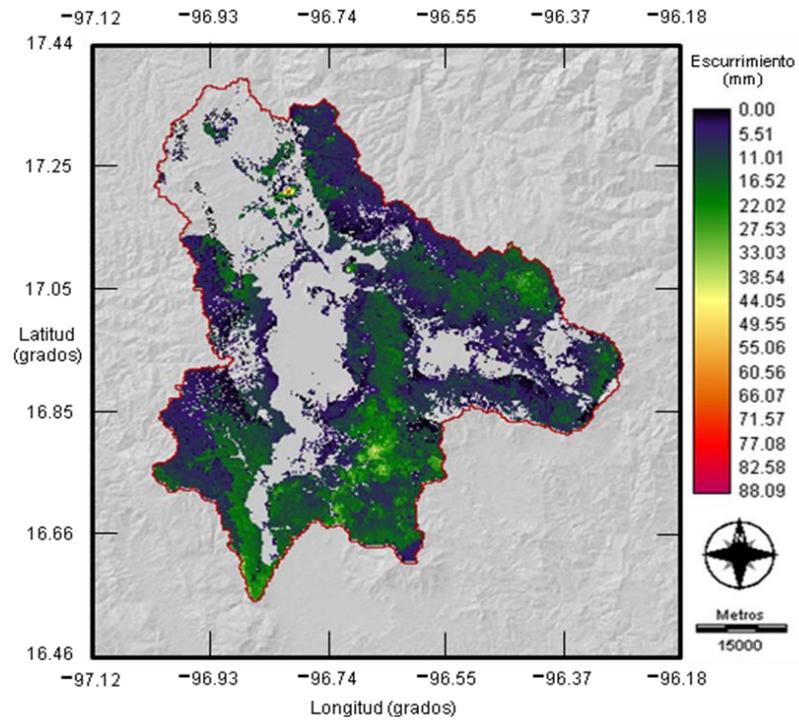
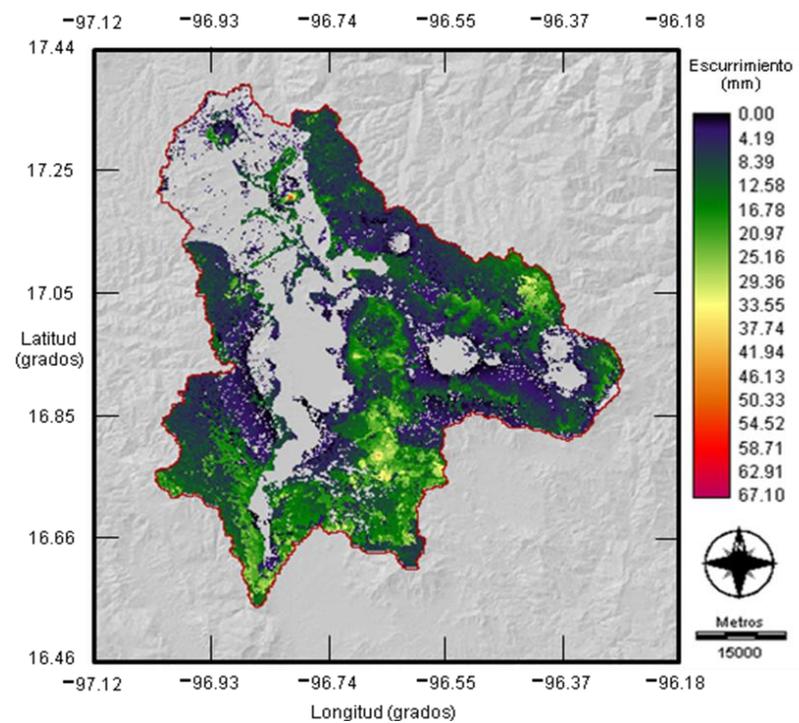


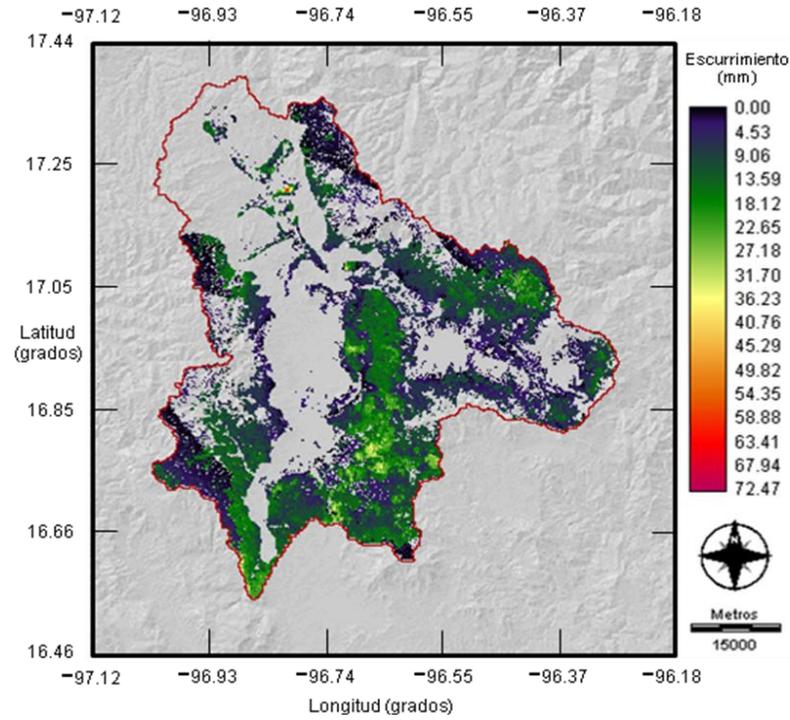
Figura 4.35. Lámina de escurrimiento superficial de Julio de 1990.



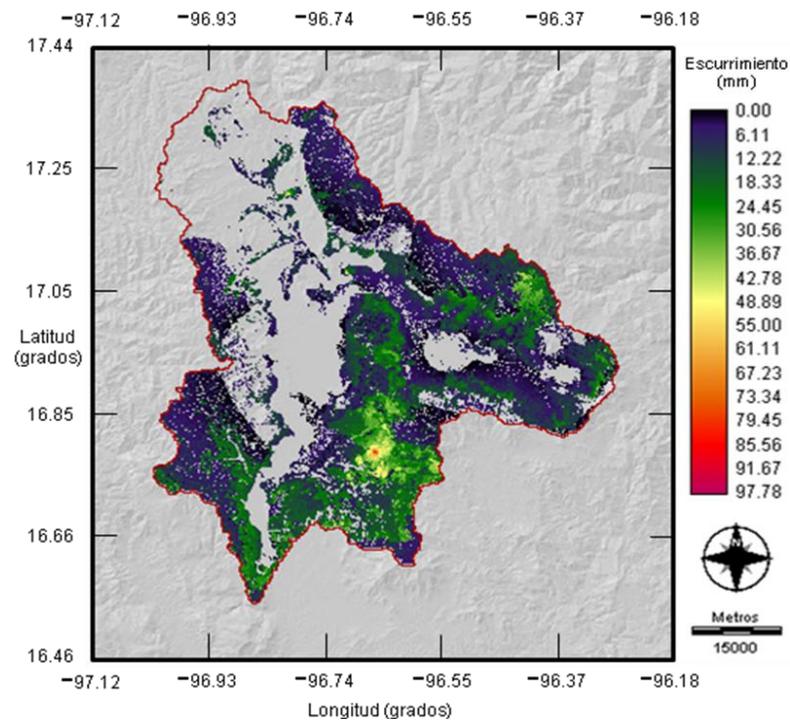
**Figura 4.36.** Lámina de escurrimiento superficial de Julio de 2005.



**Figura 4.37.** Lámina de escurrimiento superficial de agosto de 1990.



**Figura 4.38.** Lámina de escurrimiento superficial de agosto de 2005.



**Figura 4.39.** Lámina de escurrimiento superficial de septiembre de 1990.

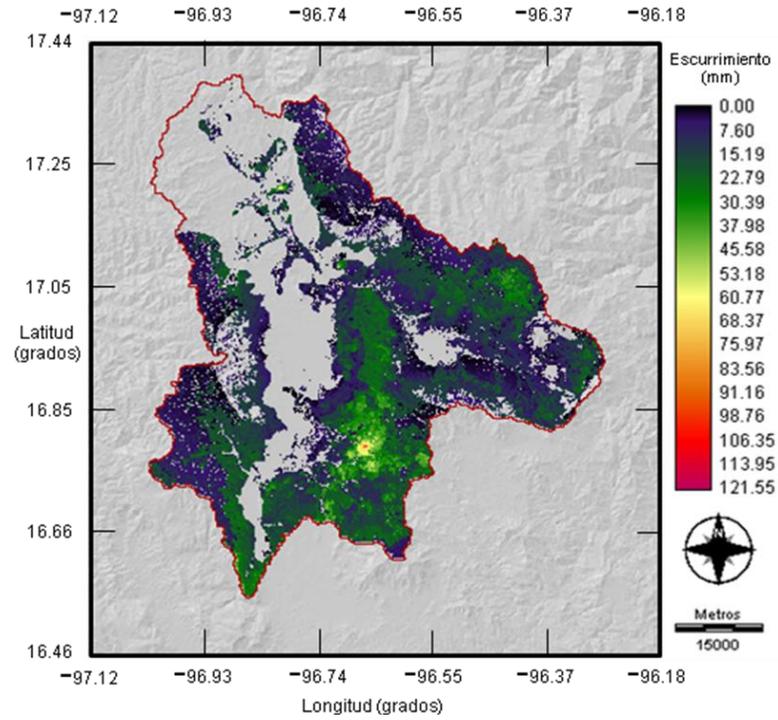


Figura 4.40. Lámina de escurrimiento superficial de septiembre de 2005.

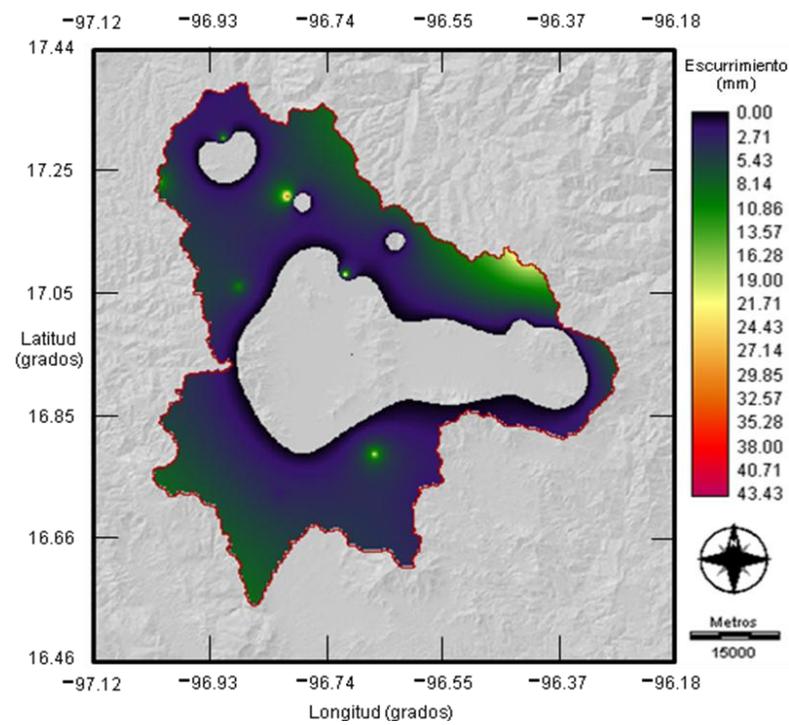
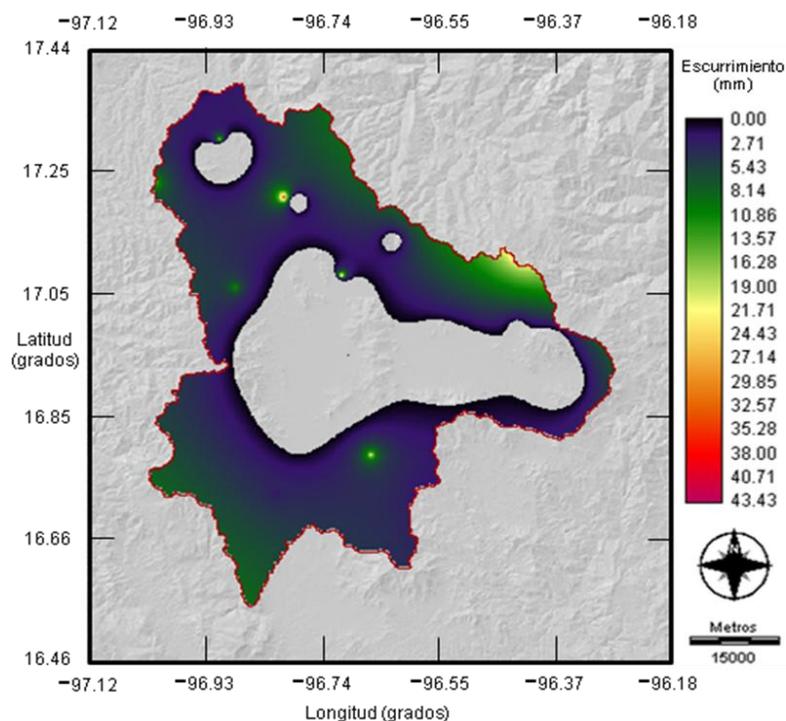


Figura 4.41. Lámina de escurrimiento superficial de octubre de 1990.



**Figura 4.42.** Lámina de escurrimiento superficial de octubre de 2005.

La 4.5 muestra el balance hídrico en forma de resumen, producto de los resultados obtenidos en los diferentes procesos realizados con el módulo del ciclo del agua de forma mensual y anual, durante el período de los 15 años de estudio realizado (1990-2005) en la subcuenca Atoyac.

**Tabla 4.5.** Resumen de resultados del balance hídrico de la subcuenca Atoyac.

Variable		Meses												Anual
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Precipitación (mm)	1990-2005	5.4	6.9	9.7	29.1	64.7	133.1	109.4	111.7	120.5	52.3	16.8	8.3	667.8
Evapotranspiración (mm)	1990-2005	32.6	33.5	51.1	57.2	65.9	61.1	62.5	61.3	54.7	50.6	37.1	33.6	601.2
Infiltración (mm)	1990	0	0	0	0	0	70.2	45	45.9	63.6	0	0	0	224.7
	2005	0	0	0	0	0	67.3	43.1	50.3	60.9	0	0	0	221.6
Escurrimiento (mm)	1990	0	0	0	0	0	1.8	1.9	4.5	2.3	1.7	0	0	12.1
	2005	0	0	0	0	0	4.7	3.8	0.1	4.9	1.7	0	0	15.1

En base al balance de los resultados estimados del escurrimiento durante el período de 15 años del estudio de la subcuenca Atoyac, se observa que hubo un incremento en promedio en la lámina de agua de 3 mm para 2005, con respecto al registrado en el año de 1990. Esto se debe a que, en el año 1990 se presentó una lámina de escurrimiento promedio de 12.1 mm, mientras que, en el 2005 fue de 15.1 mm, cambios que sin duda se deben, al cambio de coberturas de uso de suelo que se presentaron en la zona de estudio.

#### **4.7 ANÁLISIS ANUAL DEL ESCURRIMIENTO DE 1990 Y 2005**

Para realizar el análisis de los escurrimientos debido al cambio de cobertura del suelo, se tomaron 10 puntos distribuidos espacialmente en la zona de estudio, en los cuales, fue necesario transponer entre si las imágenes (1990 y 2005) creadas de: escurrimiento, coberturas de uso de suelo, clima, municipios, infiltración, precipitación, coeficiente de escurrimiento, evapotranspiración, pendiente y permeabilidad.

El análisis realizado en cada uno de los puntos (una hectárea) se aplicó el mismo procedimiento, las figuras 4.43 y 4.44 muestran la imagen de la lámina de escurrimiento del año 1990 y 2005, en las que se observan los 10 puntos elegidos para él análisis.

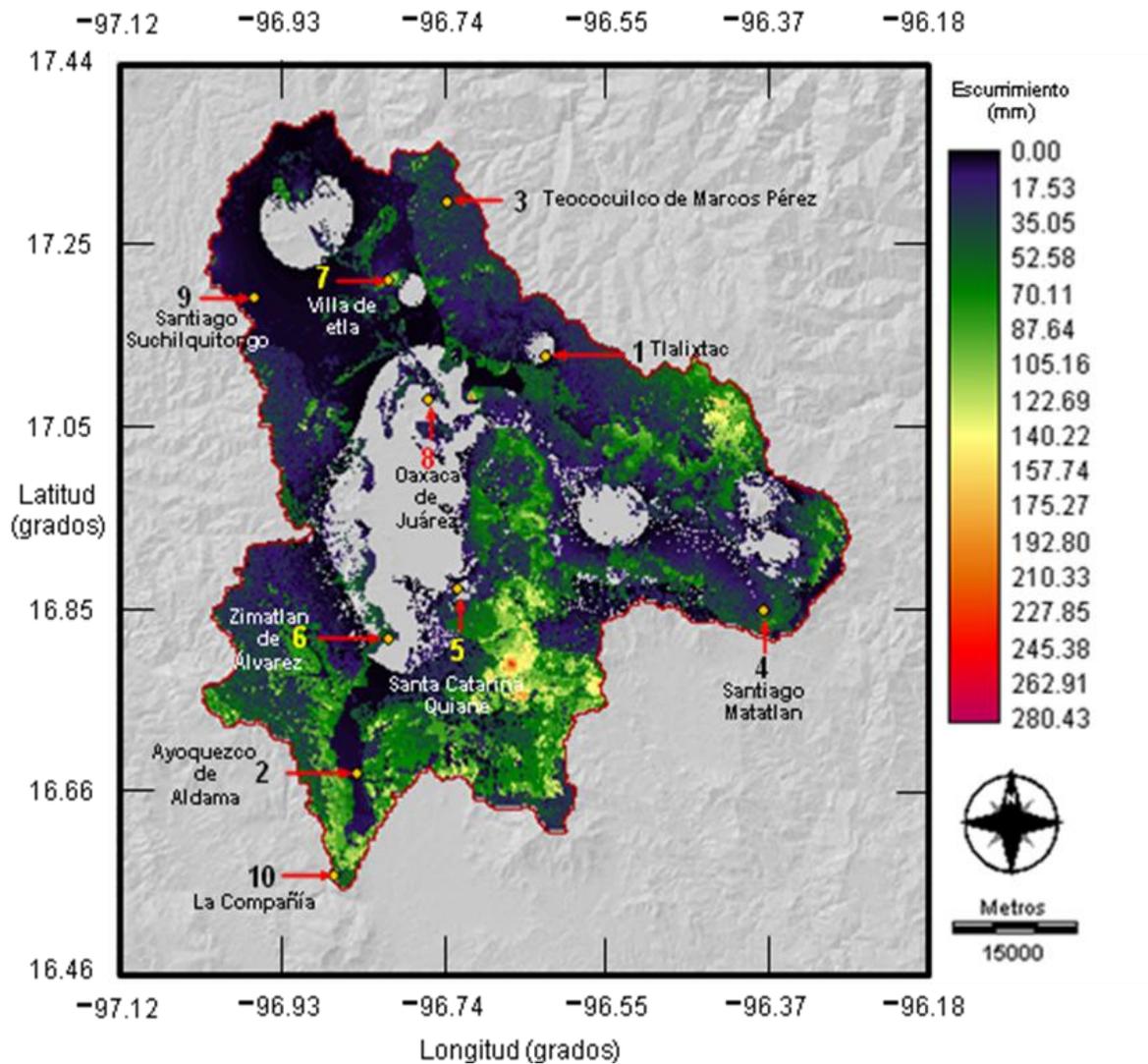


Figura 4.43. Lámina de escurrimiento anual de 1990.

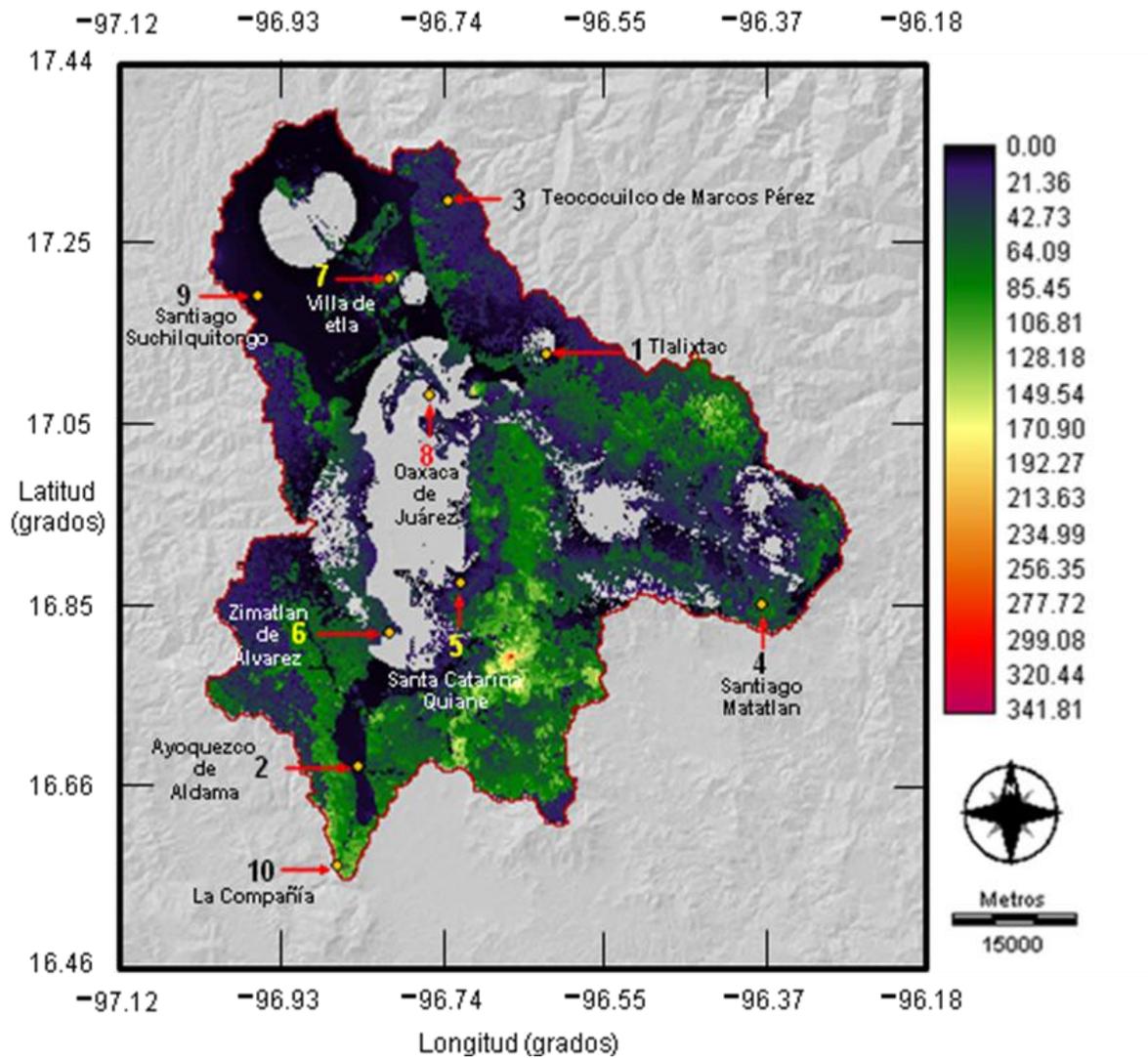


Figura 4.44. Lámina de escurrimiento anual de 2005.

Para realizar el análisis, se generaron las tablas 4.6 y 4.7, en los cuales se muestran los parámetros y sus respectivos valores en cada punto, para posteriormente poder hacer la comparación entre estos y así a su vez, realizar el análisis punto por punto. El criterio de selección de los puntos distribuidos dentro de la subcuenca se basaron en que: se visualizara el cambio de cobertura, donde se obtuvo el escurrimiento mas alto, la evapotranspiración, la infiltración y la precipitación.

**Tabla 4.6.** Características hidrológicas y edafológicas.

<b>Punto</b>	<b>Año</b>	<b>Cobertura de suelo</b>	<b>Infiltración (mm.)</b>	<b>Escurrimiento (mm.)</b>	<b>K<sub>e</sub></b>
<b>1</b>	1990	Bosque	222.91	0	0.40
	2005	Agricultura	172.06	39.40	0.55
<b>2</b>	1990	Bosque	361.69	5.49	0.15
	2005	Zona urbana	262.73	26.61	0.40
<b>3</b>	1990	Bosque	222.97	50.63	0.45
	2005	Pastizal	187.81	85.79	0.55
<b>4</b>	1990	Agricultura	200.95	18.56	0.45
	2005	Zona urbana	169.77	50.33	0.55
<b>5</b>	1990	Bosque	208.90	0	0.40
	2005	Pastizal	179.04	9.84	0.50
<b>6</b>	1990	Agricultura	183.81	27.40	0.50
	2005	Pastizal	207.87	8.06	0.45
<b>7</b>	1990	Agricultura	384.72	278.54	0.45
	2005	Zona urbana	324.43	338.83	0.55
<b>8</b>	1990	Pastizal	185.30	0	0.40
	2005	Zona urbana	144.22	0	0.50
<b>9</b>	1990	Pastizal	260.12	10.10	0.35
	2005	Bosque	309.05	4.18	0.25
<b>10</b>	1990	Bosque	225.51	97.84	0.50
	2005	Agricultura	162.49	160.86	0.65

**Tabla 4.7.** Características hidroclimáticas y edafológicas.

<b>Punto</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>ET<sub>o</sub> (mm)</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Permeabilidad</b>
<b>1</b>	649.90	640.19	20-50	Semipermeable
<b>2</b>	738.79	606.13	5-20	Permeable
<b>3</b>	708.69	595.81	>50	Semipermeable
<b>4</b>	641.08	549.12	1-5	Semipermeable
<b>5</b>	605.32	610.07	20-50	Semipermeable
<b>6</b>	641.39	602.95	5-20	Semipermeable
<b>7</b>	1208.61	635.16	1-5	Semipermeable
<b>8</b>	566.85	767.80	1-5	Semipermeable
<b>9</b>	695.42	594.37	>50	Permeable
<b>10</b>	781.39	611.53	20-50	Impermeable

1.-En el primer punto de una hectárea, ubicado dentro del municipio de Tlalixtac en la parte más alta, con clima templado subhúmedo, el cambio de cobertura de bosque a agricultura provocó un cambio en la infiltración, ya que disminuyó -50.85 mm equivalente a un -22.81% y con esto, generó un incremento en el coeficiente de escurrimiento 0.15 produciendo una lámina de escurrimiento de 39.40 mm, equivalente en volumen de agua de 3,940 litros para el año 2005 (100%).

2.-El cambio de cobertura de bosque a zona urbana en una hectárea en el municipio de Ayoquezco de Aldama con clima semicaldo subhúmedo, provocó un decremento en la infiltración de -98.96 mm (-27.37%), acompañado de un incremento de 0.25 en el coeficiente de escurrimiento y en la lámina de escurrimiento de 21.12 mm, equivalente a 2,112 litros (384.7%)

3.- Para el cambio de cobertura de Bosque a pastizal en una hectárea en el poblado de Teococuilco de Marcos Pérez que presenta un clima templado subhúmedo, generó un decremento en la infiltración de -35.16 mm (-15.77 %), trayendo consigo un aumento de

0.10 en el coeficiente de escurrimiento y un incremento en la lámina de escurrimiento de 35.16 mm (3,516 litros), representando un 69.44%.

4.- Para el cambio de cobertura de agricultura a zona urbana en una hectárea en el municipio de Santiago Matatlan con clima semicalido subhumedo, se generó un decrecimiento en la infiltración de -31.18 mm (-15.52%), un incremento de 0.1 en el coeficiente de escurrimiento y en la lámina de escurrimiento de 31.77 mm en volumen de agua de 3,177 litros (171.17%).

5.- Mientras que, durante el cambio de cobertura de bosque a pastizal en una hectárea en el municipio de Santa Catarina Quiane con clima semiárido cálido, se generó un decremento en la infiltración -29.856 mm (-14.29%), un aumento de 0.1 en el coeficiente de escurrimiento y en el escurrimiento una lámina de 9.84 mm, equivalente a 9,840 litros de agua (100%).

6.- En tanto que, el cambio de cobertura de agricultura a pastizal en el municipio de Zimatlan de Álvarez con clima semicalido subhumedo, generó un incremento de 24.06 mm en la infiltración (13.09%), con esto se deduce que, este tipo de cambio de cobertura favorece el aumento de la infiltración y por ende, una disminución del coeficiente de escurrimiento a 0.5 y de la lámina de escurrimiento de -19.34 mm, que expresado en volumen de agua representan 1,934 litros y -7.059%.

7.- Sin embargo, el cambio de cobertura de agricultura a zona urbana en la Villa de Etlá con clima semicalido subhumedo, se generó un decremento en la infiltración de -60.29 mm (-15.67%) y un aumento en el coeficiente de escurrimiento de 0.10 y en la lámina de escurrimiento 60.29 mm, expresando un volumen de 60,290 litros y un de 21.64% de incremento. Este punto, es uno de los lugares en el que presenta la más alta precipitación con 1,208.61 mm en toda la cuenca, el cual se encuentra en una parte alta donde generalmente se ubican las zona de recarga en la subcuenca, de los 10 puntos elegidos, pero también aquí, se presenta uno de los puntos más altos de escurrimiento de 1990 y 2005 de toda la subcuenca, en el que se observa que el cambio de cobertura presentado durante 2005 provocó que existiera mayor cantidad de escurrimiento que de infiltración.

8.- Además, el cambio de cobertura de pastizal a zona urbana en una hectárea en el municipio de Oaxaca de Juárez con clima semicalido subhumedo, generó un decremento

en la infiltración de 41.08 mm. (-22.18%), el coeficiente de escurrimiento incremento en 0.10 y no parece que se generó una lámina de escurrimiento, quizás debido a que en este punto, se presenta uno de los valores más alto de evapotranspiración de la subcuenca, probablemente esto se deba a que, como la evapotranspiración es más alta que la precipitación, el escurrimiento tiende a ser despreciable.

9.- El cambio de cobertura de pastizal a bosque en una hectárea ubicada en el municipio de Santiago Suchilquitongo con clima templado subhúmedo, provocó un incremento en la infiltración de 48.93 (18.81%) mm y un decremento en el coeficiente de escurrimiento de 0.10, así mismo, también un decremento en la lámina de escurrimiento de -5.92 mm, que representan 5,920 litros de agua (-58.61%).

10.- Por último, el cambio de cobertura de bosque a agricultura en una hectárea en el municipio de la Compañía (ubicado a la salida de la subcuenca), trajo un decremento en la infiltración de 63.02 mm (-27.95%) y un incremento en el coeficiente de escurrimiento de 0.15, también se incrementó la lámina de escurrimiento a 63.02 mm equivalentes en volumen a 63,020 litros (64.41%).

En general, se observa que para cualquiera de las coberturas, a mayor pendiente, mayor es el escurrimiento, así también, a mayor infiltración menor es el escurrimiento y viceversa, a menor infiltración mayor escurrimiento. Lo que permite llegar a establecer que, el tipo de cobertura presente en una zona dada influye en el aumento del escurrimiento conjuntamente la permeabilidad del terreno.

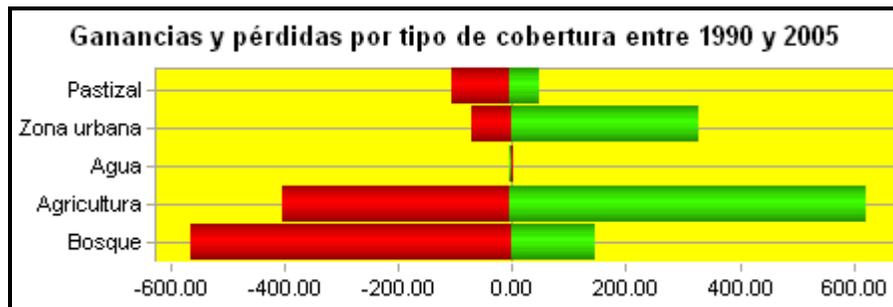
El análisis correspondiente realizado entre el punto 1 y 10 se presentan características similares, sin embargo, el escurrimiento más alto entre estos dos puntos se presentó es el punto 10, esto se puede deducir que sucede porque, se presenta una menor evapotranspiración y una mayor precipitación, además de que, la infiltración entre estos dos puntos es similar.

Entre los puntos 3 y 9, en donde el proceso es inverso (pastizal-bosque y bosque pastizal) en el cambio de cobertura pero de características similares, se presentó un escurrimiento más bajo en el punto 9, quizá esto se atribuye a que, en el punto 9 el tipo de suelo es permeable mientras que en el punto 3 es semipermeable.

Mientras que, entre el punto 4 y 7, que presentan el mismo tipo de cambio de cobertura de suelo con algunas características similares como el coeficiente de escurrimiento que es el mismo, se observa que en el punto 7 presenta mayor infiltración y escurrimiento, probablemente debido a que en este punto se presentó mayor precipitación a diferencia del punto 4.

#### 4.8 ANALISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE SUELO

Los datos de los resultados del análisis realizado debido a los cambios de coberturas de uso de suelo en la subcuenca Atoyac empleando el módulo Land Change Modeler, son relacionados con los datos que se muestran en la tabla 4.8, ya que el análisis se basó en las pérdidas y ganancias por cobertura, así mismo, se fueron generando las gráficas correspondientes a estos cambios de cobertura de uso de suelo. La figura 4.45, muestra la evaluación cuantitativa de los cambios de las ganancias y pérdidas, por cobertura de uso de suelo.



**Figura 4.45.** Relación de ganancias y pérdidas de las coberturas de suelo.

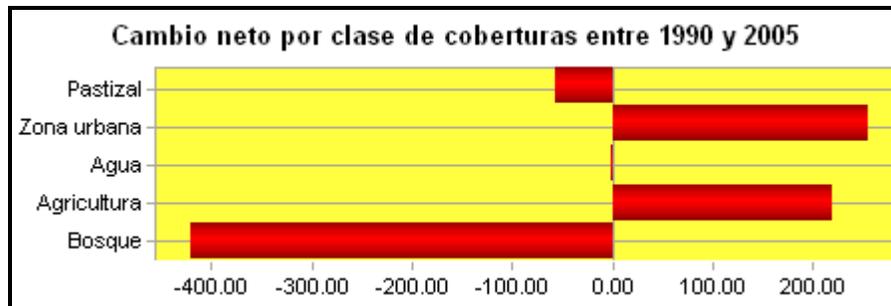
Como se puede observar en la gráfica de la figura 4.45, la cobertura con menor incremento en porcentaje fue la del agua, el cual, se puede considerar relativamente despreciable, ya que las áreas en la zona de estudio no son significativamente grandes, además, habría que considerar que, como las imágenes procesadas para el análisis de clasificación de las coberturas de suelo fueron tomadas en diferentes años (1990 y 2005).

Se puede deducir que, estos cambios más bien se deban a las precipitaciones registradas en la zona y por lo cual, se registró un incremento o decremento de los cuerpos de agua superficiales presentes en la zona.

Respecto a la zona urbana, se observa que fue la que mayor incremento presentó de 1990 a 2005 con un porcentaje de 92.89%, en tanto que, las coberturas con pérdidas fueron las de, bosque con -27.56% y pastizal con -40.57%. Aunque las cifras en porcentaje son representativas para cada tipo de cobertura, se puede ver que, en relación al área expresada en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) la cobertura que más perdió, fue la de bosque con -420.62 km<sup>2</sup> a diferencia de -56.86 km<sup>2</sup> que corresponden a los pastizales.

Mientras que, la gráfica generada de los cambios netos por categoría de la cobertura de suelo, el cual, es el resultado del análisis de la primera cobertura (bosque), en el que se muestran las ganancias y se restando las pérdidas, tal como lo muestra la figura 4.46.

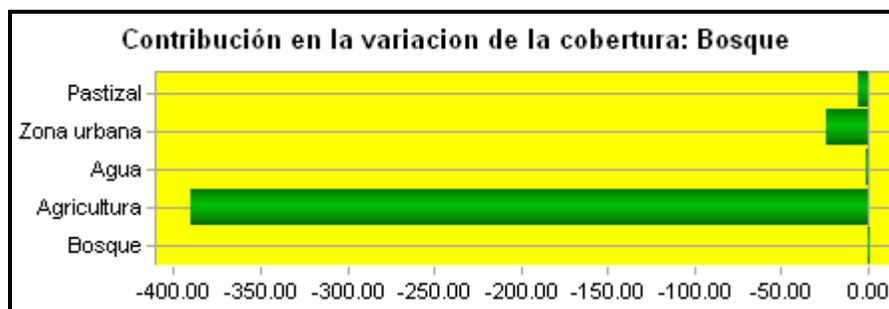
Para el análisis de los cambios netos por cada tipo de cobertura, es decir, las contribuciones y perdidas específicamente, se observan en la tabla 4.8, así como sus gráficas correspondientes en las figuras de la 4.47-4.51, en las cuales se muestran las coberturas que contribuyen al cambio neto en cada una.



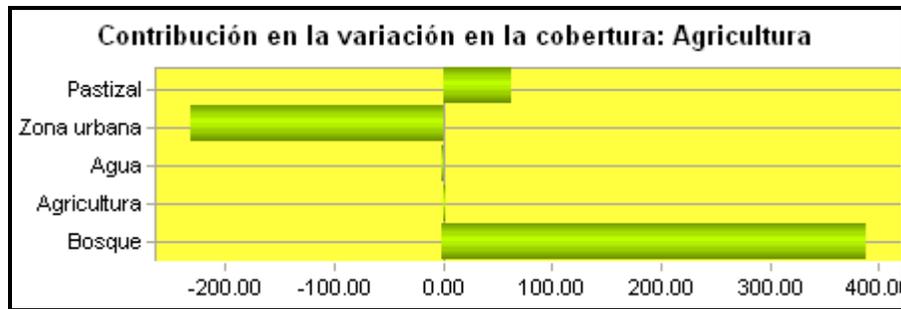
**Figura 4.46.** Grafica de cambio por clase de cobertura

**Tabla 4.8.** Análisis de contribución (+) y pérdidas (-) de coberturas de suelo.

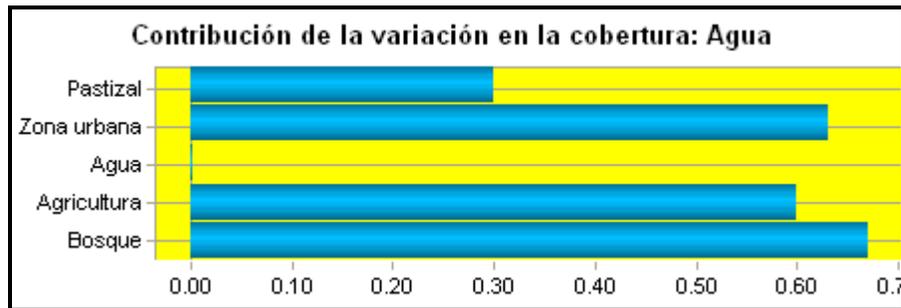
Coberturas	1990-2005	
	Coberturas	Km <sup>2</sup>
Bosque	Agricultura	-390.06
	Agua	-0.67
	Zona urbana	-23.74
Agricultura	Pastizal	-6.15
	Bosque	390.06
	Agua	-0.60
Agua	Zona urbana	231.90
	Pastizal	62.50
	Bosque	0.67
Zona urbana	Agricultura	0.60
	Zona urbana	0.63
	Pastizal	0.30
Pastizal	Bosque	23.74
	Agricultura	231.90
	Agua	-0.63
Bosque	Pastizal	0.21
	Bosque	6.15
	Agricultura	-62.50
Bosque	Agua	-0.30
	Pastizal	-0.21



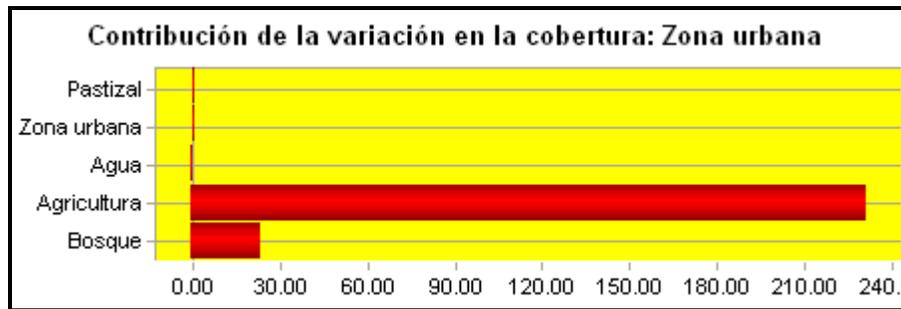
**Figura 4.47.** Análisis de variación neta presentada por la cobertura de bosque.



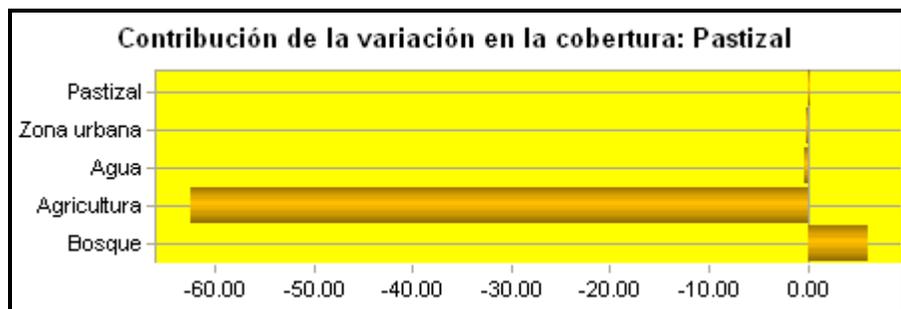
**Figura 4.48.** Análisis de variación neta presentada por la cobertura de agricultura.



**Figura 4.49.** Análisis de variación neta presentada por la cobertura de agua.



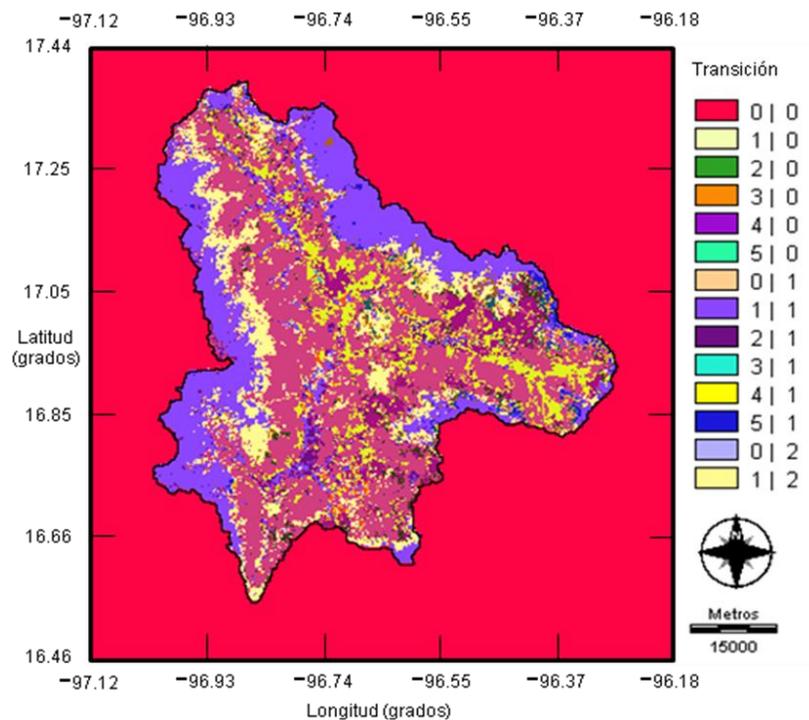
**Figura 4.50.** Análisis de variación neta presentada por la cobertura de la zona urbana.



**Figura 4.51.** Análisis de variación neta presentada por la cobertura de pastizal.

Según la gráfica de la figura 4.47, muestra que, la cobertura que contribuyó a la disminución de la cobertura de bosque fue la agricultura, así mismo, la cobertura que contribuyó a que está aumentará es despreciable. Con lo que respecta a la zona urbana (figura, 4.50), la cobertura que más contribuyó a su aumentó fue la agricultura, estos resultados tienden a ser coherentes, porque, generalmente la primera cobertura presente, es la del bosque, que posteriormente pasa a agricultura para finalmente ser utilizada como zona urbana, cabe mencionar que, esto no sucede en todos los casos, ya que depende de la zona y las características propias de la región.

Por último, se generaron las imágenes de cambios de uso de suelo que se muestran en las figuras 4.52, y 4.53.



**Figura 4.52.** Imagen de cambios de cobertura entre los años 1990 y 2005

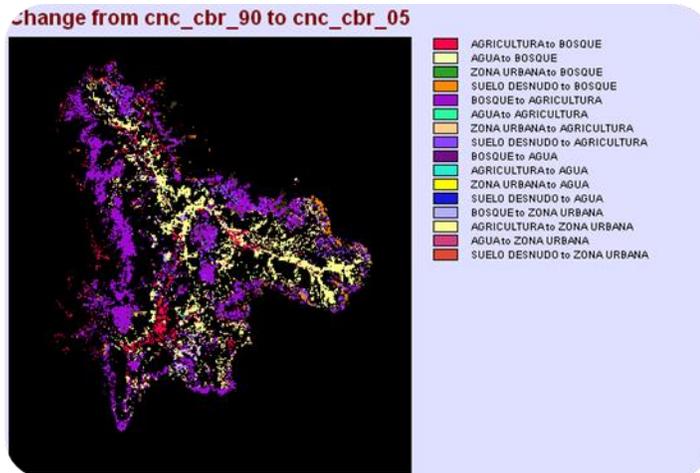


Figura 4.53. Imagen de cambios de cobertura en la Subcuenca Atoyac.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Se utilizó el software SIG (Idrisi) para evaluar el ciclo hidrológico y en particular la escorrentía hídrica de la subcuenca Atoyac debido a los cambios de cobertura del suelo durante el período 1990-2005. Se estudió la cuenca hidrográfica como unidad de análisis, para relacionar parámetros morfológicos y climatológicos facilitando el análisis de los cambios de cobertura del suelo y los efectos en la escorrentía.

Las coberturas de suelo elegidas a clasificar fueron cinco en la zona de estudio: bosque, agricultura, agua, zona urbana y pastizal, empleando del método de clasificación supervisada (máxima probabilidad), con el objeto de generar dos imágenes de cobertura de suelo, una de 1990 y otra de 2005. El resultado del análisis de estas permitieron estimar los siguientes cambios que se han presentado durante el período de estudio (15 años): el bosque pasó de ocupar un área del 40.96% a 29.67%, la zona agrícola aumentó de 47.84% a 53.74%, las áreas con cuerpos de agua se incrementaron de 0.06% a 0.12 %, la zona urbana paso de 7.37% a 14.22%, y las áreas de pastizal disminuyeron de 3.77% a 2.25%.

En base a los resultados de las coberturas de uso de suelo antes mencionados, se llega a establecer que, estos sí han influido en la variación del tirante de la lámina del escurrimiento superficial, lo que ha incidido directamente en la disminución de áreas de infiltración y en particular el crecimiento de la zona urbana, es la que más ha contribuido dentro de este rubro.

Debido a las alteraciones dadas en el escurrimiento como parte del ciclo hidrológico, se deduce que estos han incidido directamente en la recarga del acuífero, ya que, el promedio anual del tirante de la lámina de agua para 1990 era de 12.1 mm y paso a 15.1

mm para el 2005. Lo significa que cada vez se infiltra menos agua al subsuelo, debido a la alteración del ciclo hidrológico y favoreciendo aún más, el cambio climático que a su vez trae consigo eventos extremos como inundaciones y sequías.

La metodología empleada en este estudio, se considera es una herramienta importante para evaluar cambios de uso de suelo, ya que integrados con información cartográfica permite proponer alternativas de planificación y toma de decisiones en temas de índole hidrológico como, localización de zonas de recarga, ubicación de asentamientos humanos y zonas de protección de bosques, entre otras.

En conclusión los escurrimientos si se han visto afectados debido a los cambios de cobertura de suelo en la subcuenca Atoyac durante el periodo de 15 años; motivo por el cual la hipótesis planteada al principio de este trabajo es válida, y cumple para el caso estudiado.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Para obtener una mejor precisión en los resultados estimados del escurrimiento, se recomienda realizar una comparación con registros de los escurrimientos medidos en las estaciones hidrométricas a la salida de la subcuenca.

Se sugiere actualizar la información empleada, utilizando imágenes de años recientes para realizar nuevamente las predicciones realizadas para la zona de estudio.

Para estudios a mayor detalle es recomendable utilizar imágenes de satélite y cartografía de mayor resolución espacial.

Se recomienda utilizar esta herramienta de sistemas de información geográfica (SIG) como elemento para proponer alternativas de planificación territorial y toma de decisiones de forma integral, donde se involucran diversos parámetros del ciclo hidrológico y geomorfológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Antón, D. y Díaz, D. C. (2000). Sequía en un mundo de agua. Piriguazú ediciones. CIRA-UAEM. Toluca, Estado de México.
- Benítez, C., Arias, W., y Quiroz, J. (1980). Manual de Conservación de suelos y agua. Ministerio de conservación de suelos y aguas. Lima, Perú.
- Buendía Rodríguez E., Terrazas Domínguez S., Vargas Pérez E., 2002. La aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del oriente del Valle de México utilizando el satélite Landsat y Spot. Revista Chapingo. Universidad Autónoma de Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, vol.8, 13-19.
- Campos, A. (1998). Proceso del ciclo hidrológico. 3ª reimpresión. Editorial Universitaria Potosina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Carreño M.F; Esteve M.A; Martínez J; Palazón J. A; Pardo. M.T; 2008.Habitat changes in coastal wetlands associated to hydrological changes in the watershed. Journal of Eustarine coastal and shelf science. 77, 475-483.
- Castañeda C. y Dubront D., 2009. Land cover mapping of wetland areas in an agricultural landscape using SAR and Landsat imagery. Journal of Environmental Management, 90, 2270-2277.
- Centro de Recursos Idrisi (2011). Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMex. México)  
<http://idrissi.uaemex.mx/>,[idrissi.mexico@gmail.com](mailto:idrissi.mexico@gmail.com)
- Chuvieco, Salinero, Emilio, 2007. Teledetección ambiental. Tercera Editorial. Ariel S. A. Madrid, España.

- Cihlar, J.; Xiao, Q.; Chen, J.; Beaubien, J.; Fung, K y Latifovic, R., 1998. Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, pp. 2685-2704.
- CLICOM. (2010). Climating Computing Program, Base de Datos Meteorológicos México: Servicio Meteorológico Nacional.
- CONABIO (s.f.) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado el 19 de octubre de 2010, de <http://www.conabio.gob.mx>
- Gandía, Franco, Soledad; Gandia, Franco, Sonsoles; Meliá, Miralles, Joaquín, 1991. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura. Universidad de Valencia. Curso posgrado.
- Geosat, Imágenes satelitales, Servicios de información geográfica. Recuperado el 19 de mayo de 2009. <http://geo-sat.com.ar/es/content/view/18/62/>
- Hermelin, A. M. (2005). Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004. Editorial EAFIT.
- Fernández Coppel I. A. y Herrero LI. E (2001). El satélite landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite landsat. Departamento de ingeniería agrícola y forestal. Universidad de Valladolid.
- Franco, P.R. (2008). Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la disponibilidad de recursos hídricos. Tesis doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMex. México.
- Fikir Alemayehu, Nurhussen Taha, Jan Nyssen, Amanuel Zenebe, Mintesinot Behailu, Seppe Deckers y Jean Poesen, 2009. The impacts of watershed management on land use and land cover dynamics in Eastern Tigray (Ethiopia). *Journal Resources, conservation and Recycling*, 53, 192-198.

Hidrología, Cuenca hidrológica y divisoria de drenaje para un embalse, [www.planning.org/planificacion/2/4.htm](http://www.planning.org/planificacion/2/4.htm). Recuperado el 19 de mayo de 2009.

Honglin Xiao, Quihao Weng, 2006. The impact of land cover changes on land surface temperature in karst area of China. *Journal of environmental management*, 85, 245-257.

Keller Norma, Jassen Lucas L. F. and Huurneman Gerrit C, (ed.), 2004. Principles of remote sensing. ITC Educational Textbook Series; 2. Third edition, the Netherlands.

Lira, Chávez, Jorge 2002. Introducción al tratamiento digital de imágenes. Fondo de cultura económica.

Martínez, V. H. (2010). Desarrollo de una metodología hidrogeomática para estimar la contaminación difusa en aguas superficiales de una cuenca. Tesis doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMex. México.

Meaden, G.J.; Kapetsky, J.M., 1992. Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. FAO. Documento Técnico de Pesca. N° 318. Roma, FAO. <http://www.fao.org/docrep/003/T0446S/T0446S00.HTM>

Metzger, M.J., Rounsevell, M.D.A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., Schroter, D., 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture Ecosystems and Environment* 114 (1), 69–85.

NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación, 17 de abril de 2002.

- Ortiz, A. R. 1996. Glosario geohidrológico. Editorial Universitaria Potosina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. pp. 41
- Pérez Gutiérrez Carlos y Muñoz Nieto Ángel Luis, (ed.), 2002. Teledetección. Nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca, ISBN 84-607-5018-3, España.
- Prol-Ledesma R. M., Uribe-Alcántara y Díaz-Molina, 2002. Use of cartographic data and Landsat TM. imagenes to determine land use change in the vicinity of México City. Int. Journal. Remote Sensing. 23, 9, 1927-1933.
- Sánchez Vélez A. 1987. Conceptos elementales de hidrología forestal; agua y vegetación. Chapingo, Méx. Universidad Autónoma de Chapingo. 149p.
- SEMARNAT. (2005). PROY-NOM-140-SEMARNAT-2005. México D.F. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Siegal Barry S. y Gillespie Alan R. 1980. Remote sensing in geology. Jhon Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Sobrinho, J. A., ed., 2000. Teledetección, Valencia, Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Trejo C.J., 2006. Catalizadores de arcillas pilareadas con complejos mixtos de Al-La: Síntesis por irradiación de microondas, caracterización y evaluación en la obtención del TAME. SEPI-ESIQIE-IPN: Tesis de Maestría.
- Triviño P. A. y Ortiz. R. S. (2004) Metodología para la distribución de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y ríos-rambla Mediterráneos. Investigaciones Geográficas nº 35. (2004) pp.67-83
- Ziyong Sun, Rui Ma, Yanxin Wang, 2008. Using Landsat data to determine land use changes in Datong basin, China. Journal Environmental Geology, Ed. Springer, DOI. 10.1007/s00254-008-1470-2.

## ANEXOS

**ANEXO A IMÁGENES DE PRECIPITACION PROMEDIO EN LA ZONA DE ESTUDIO**

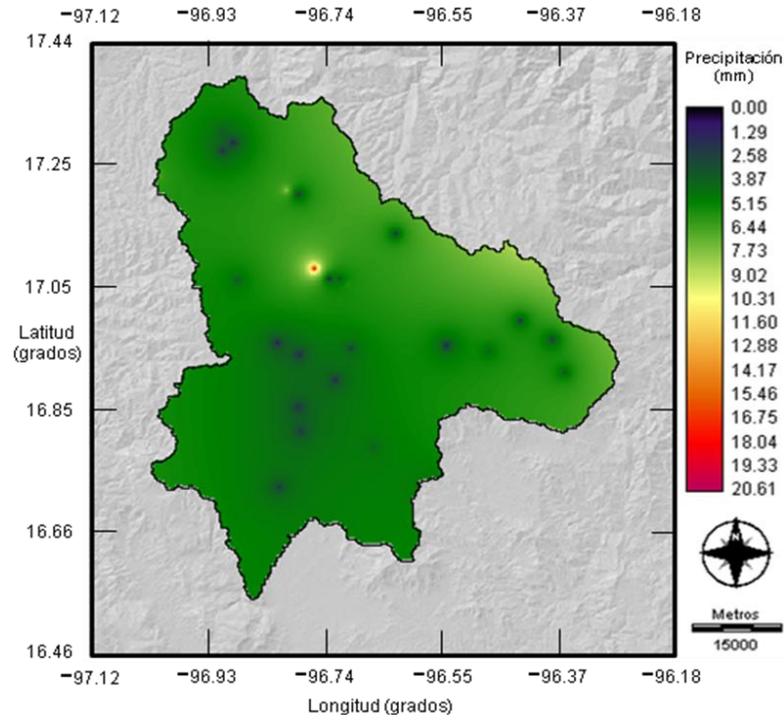


Figura a1 Imagen superficial de la precipitación del mes de enero

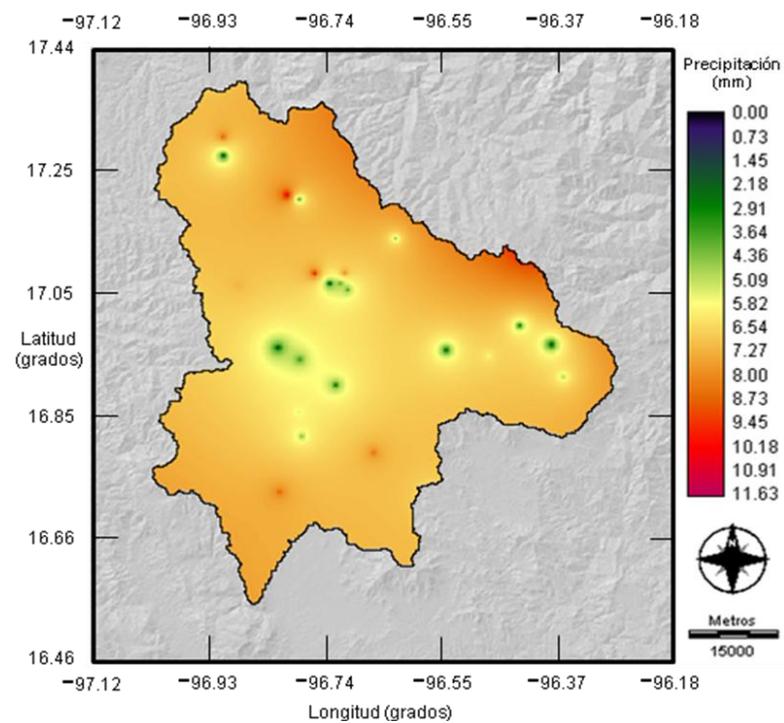


Figura a2 Imagen superficial de la precipitación del mes febrero

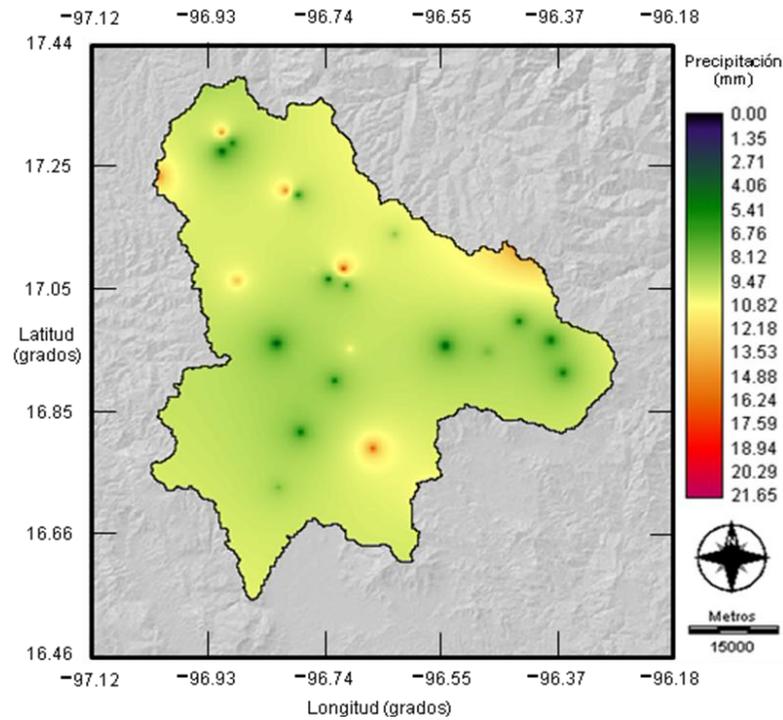


Figura a3 Imagen superficial de la precipitación promedio de marzo

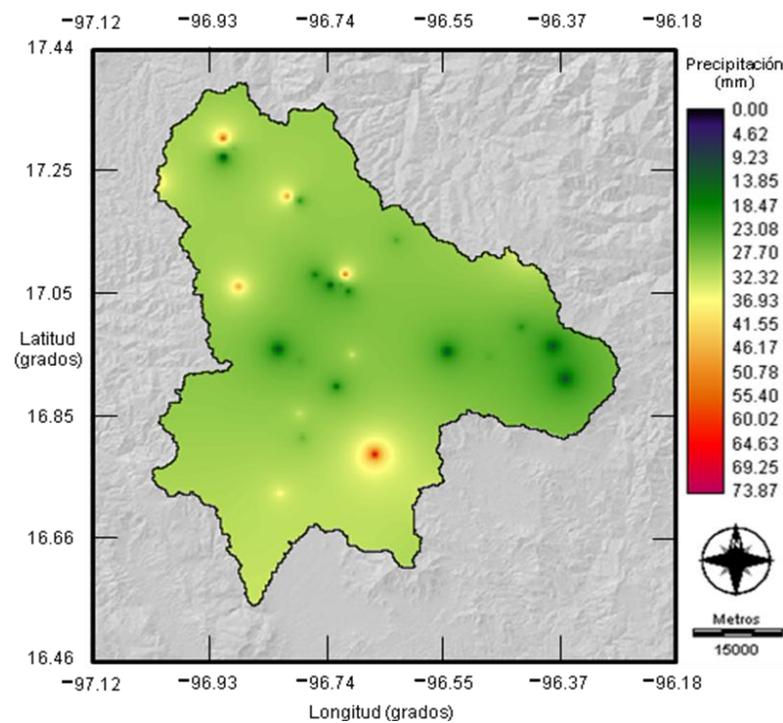


Figura a4 Imagen superficial de la precipitación del mes de abril.

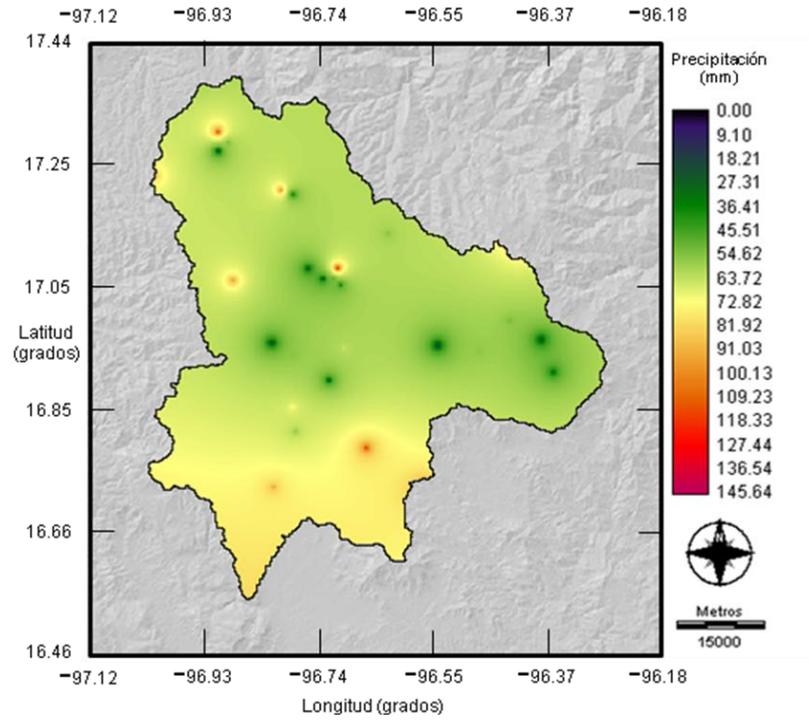


Figura a5 Imagen superficial de la precipitación del mes de mayo.

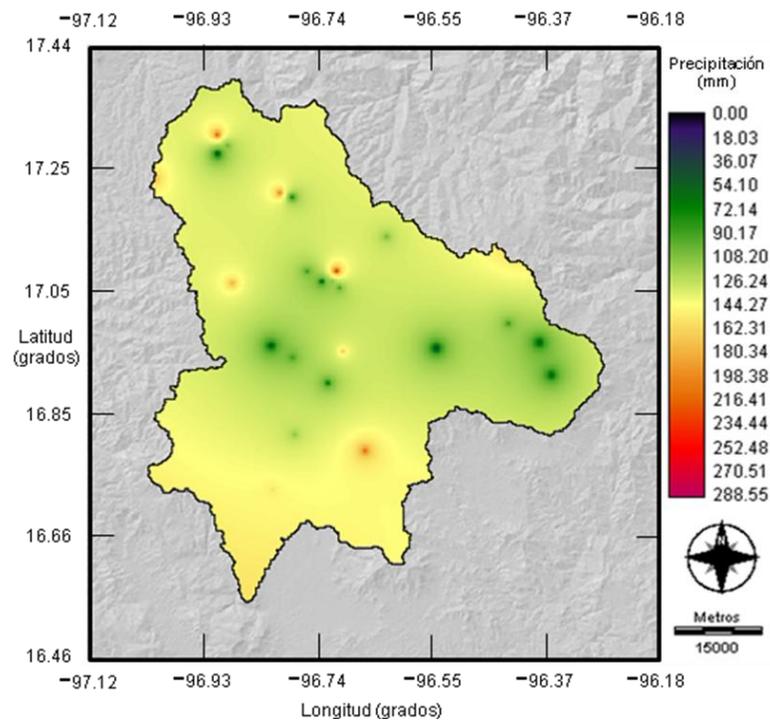


Figura a6 Imagen superficial de la precipitación del mes de junio.

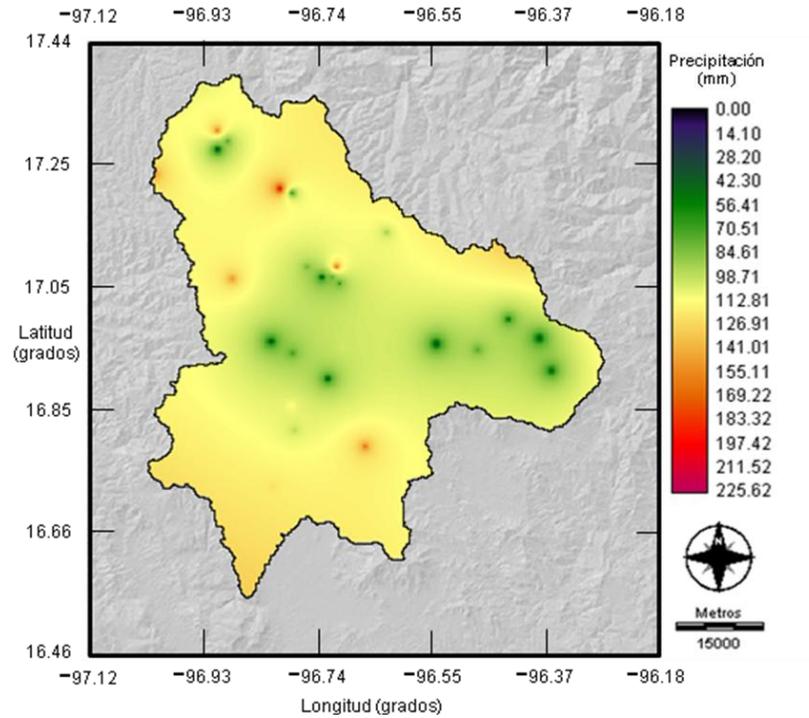


Figura a7 Imagen superficial de la precipitación del mes de julio.

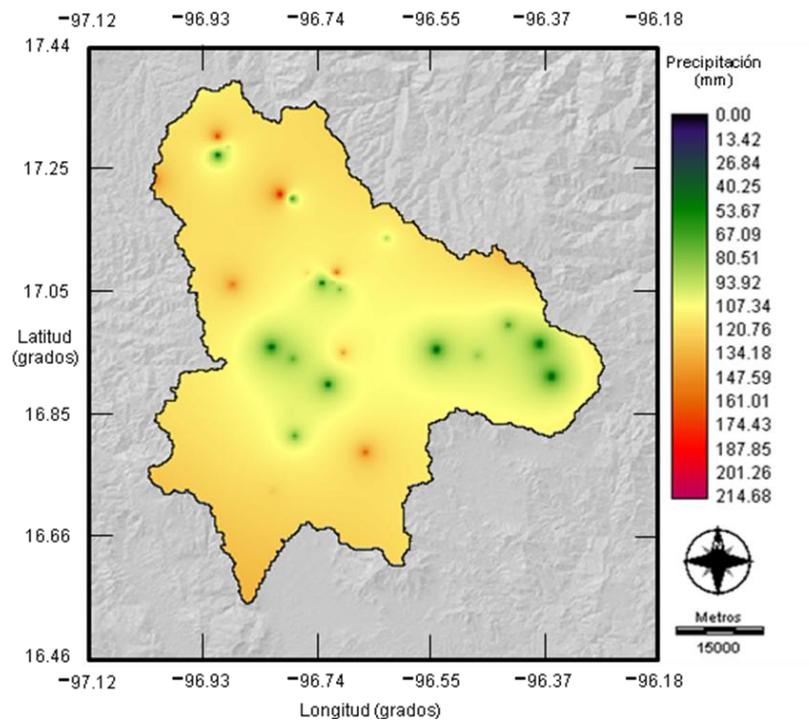


Figura a8 Imagen superficial de la precipitación del mes de agosto.

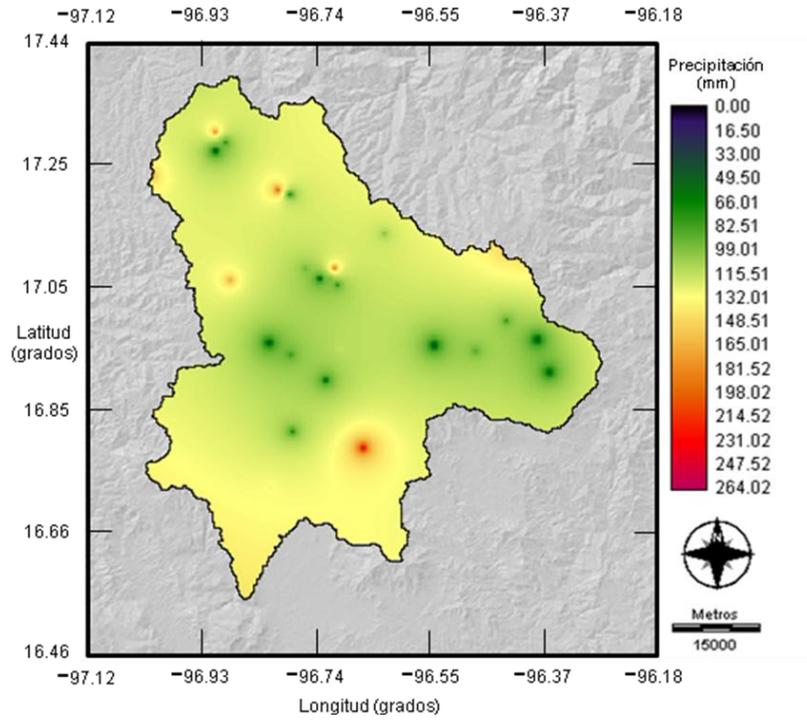


Figura a9 Imagen superficial de la precipitación del mes de septiembre

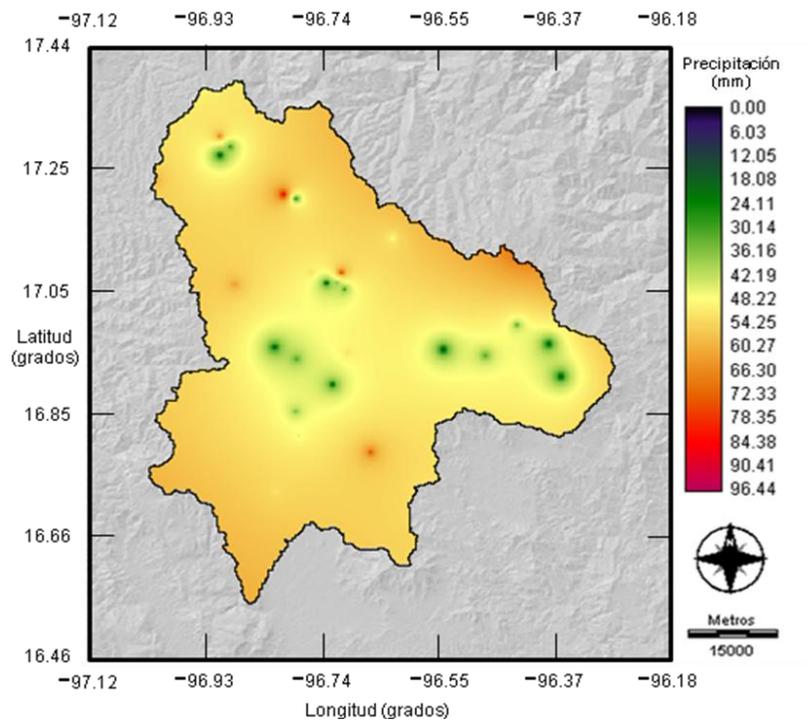


Figura a10 Imagen superficial de la precipitación del mes de octubre

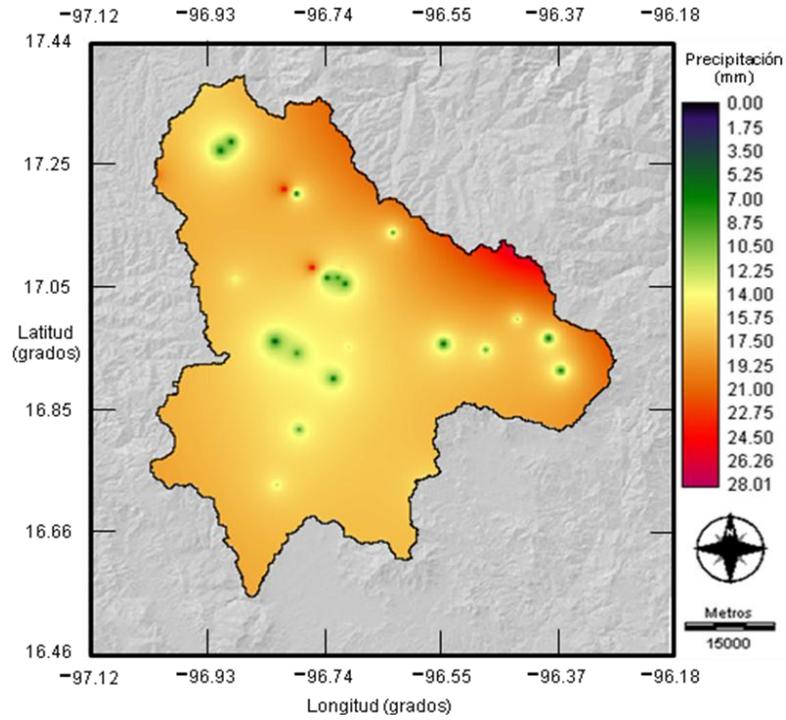


Figura a11 Imagen superficial de la precipitación del mes de noviembre

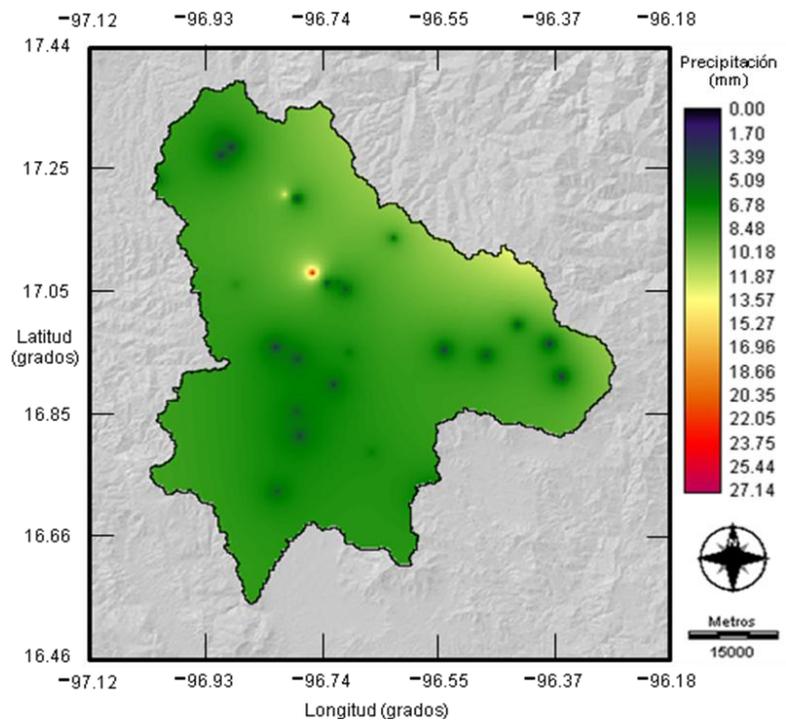


Figura a12 Imagen superficial de la precipitación del mes de Diciembre

## **ANEXO B IMÁGENES DE TEMPERATURA PROMEDIO EN LA ZONA DE ESTUDIO**

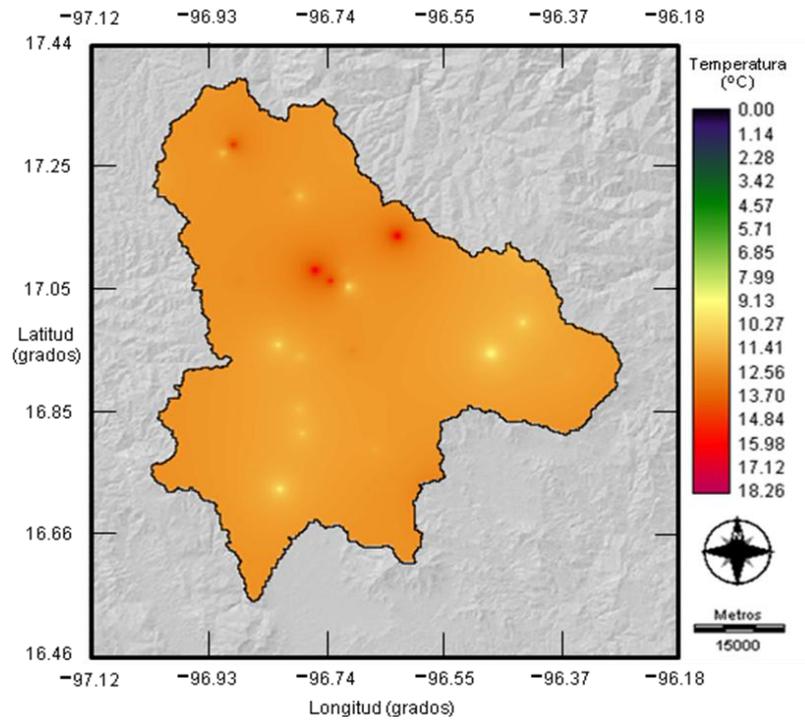


Figura b1. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de enero

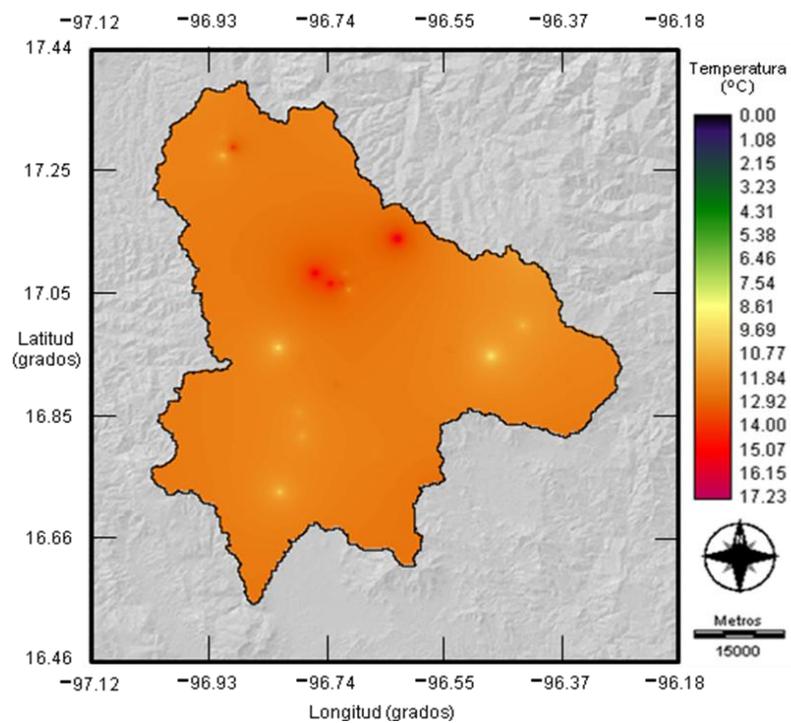


Figura b2. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de febrero

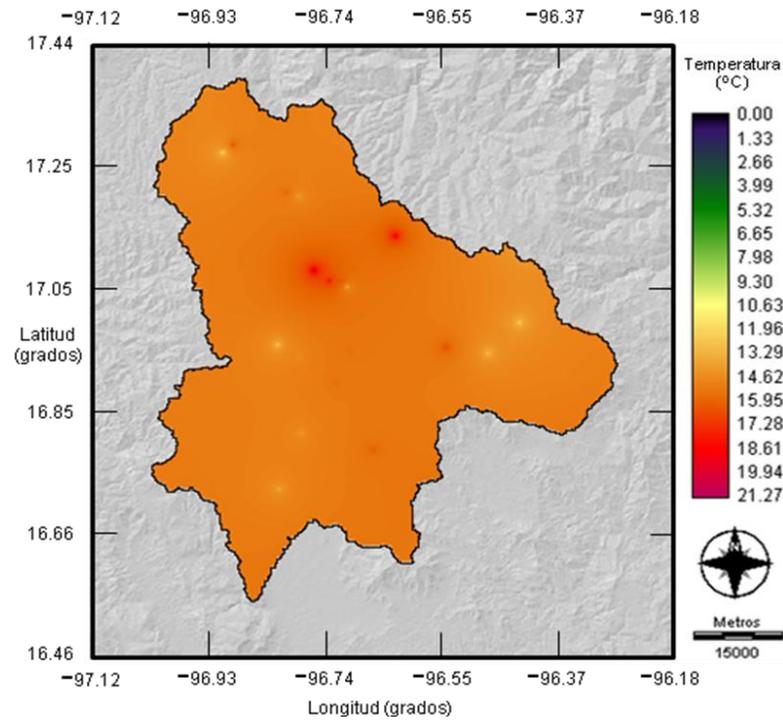


Figura b3. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de marzo

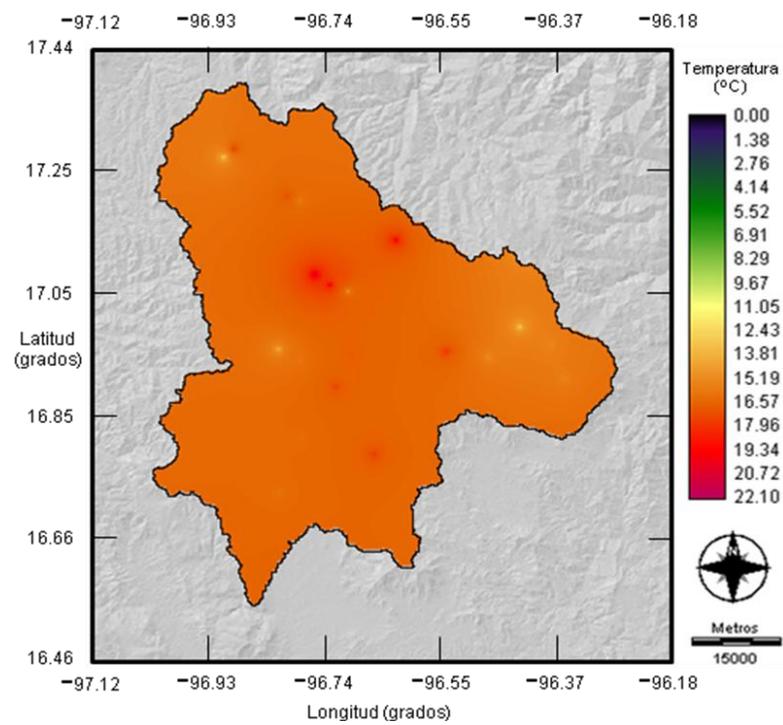


Figura b4. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de abril

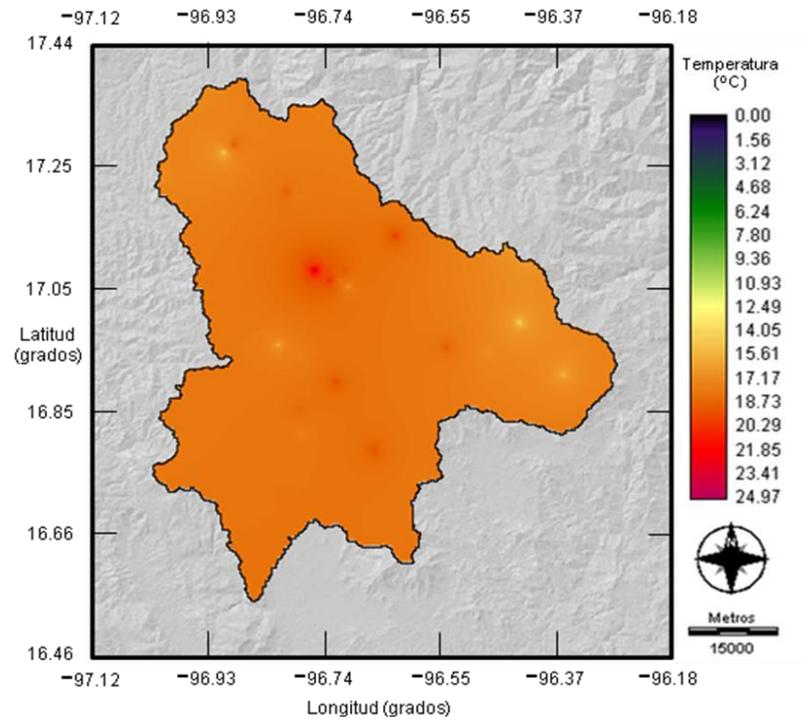


Figura b5. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de mayo

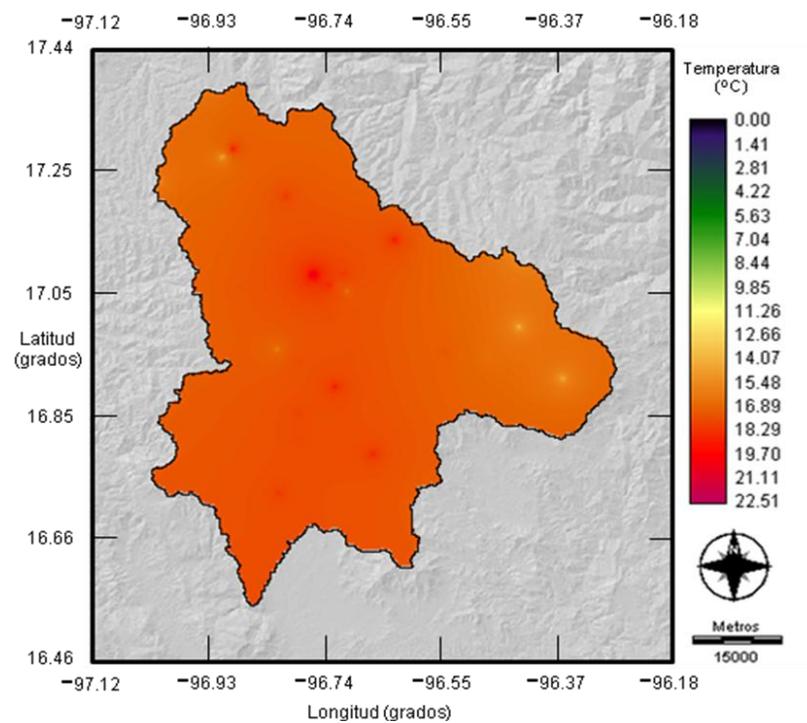


Figura b6. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de junio

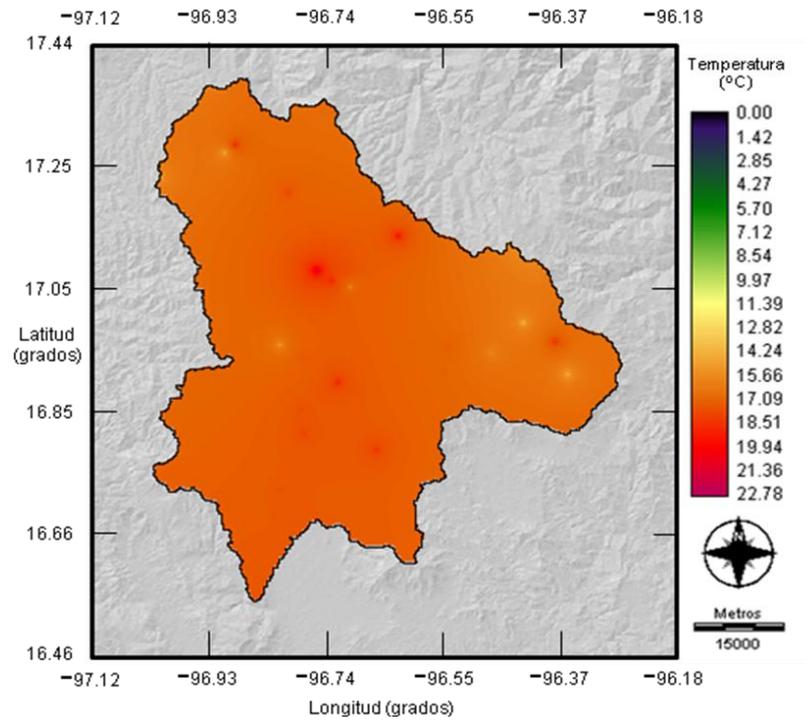


Figura b7. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de julio

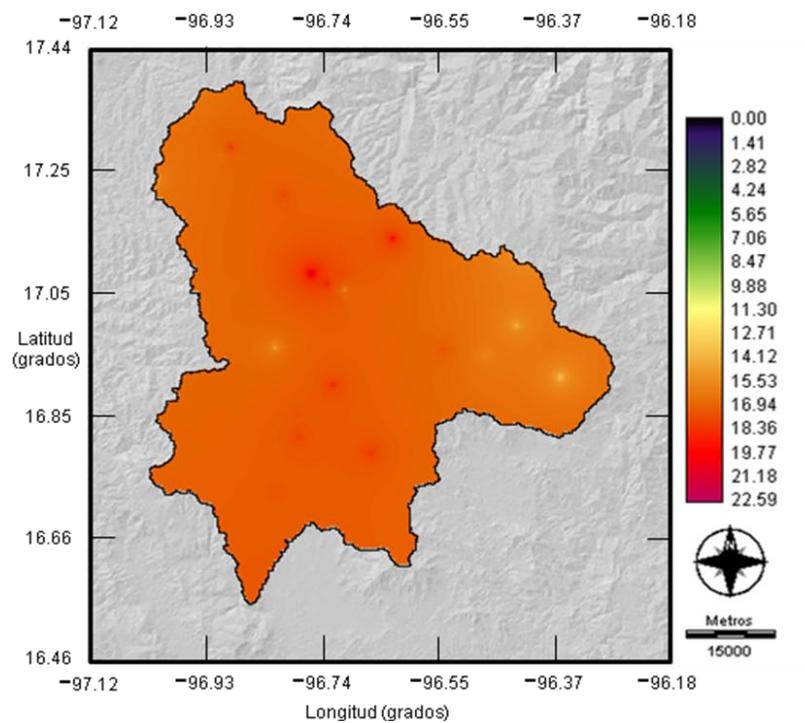


Figura b8. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de agosto

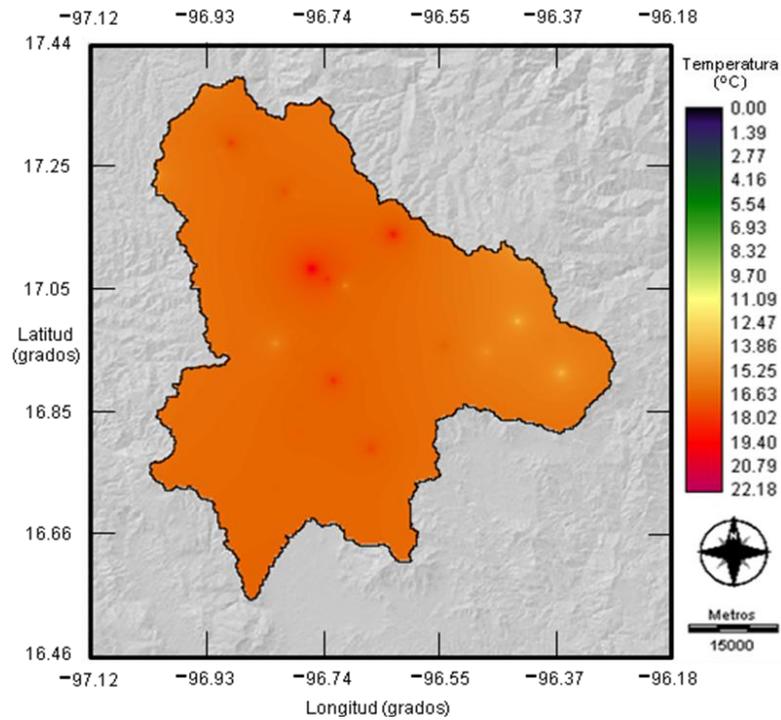


Figura b9. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de septiembre

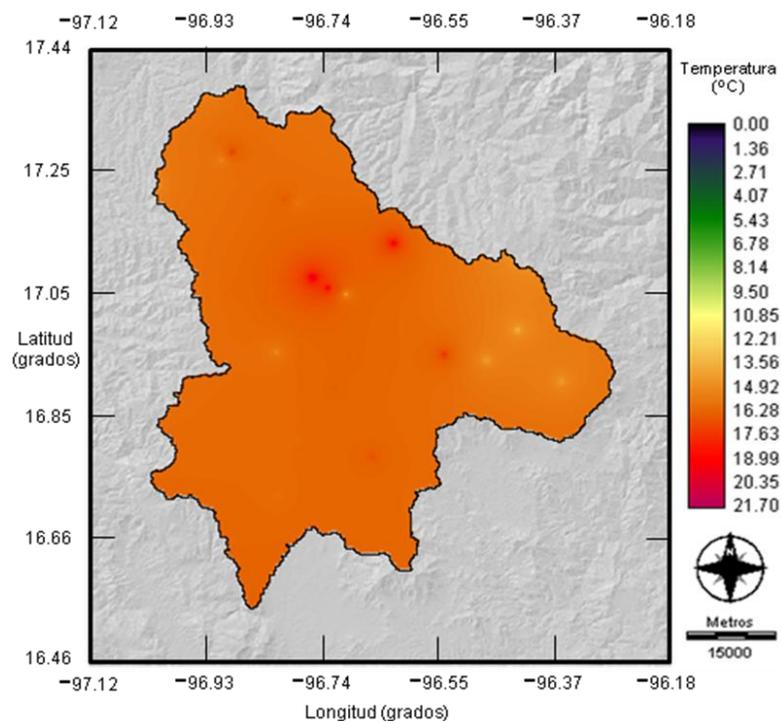


Figura b10. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de octubre

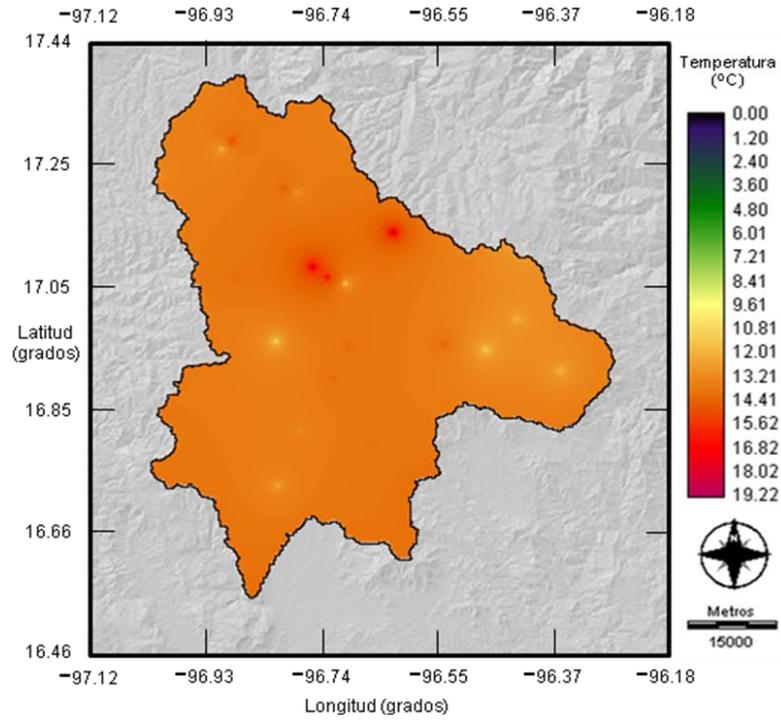


Figura b11. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de noviembre

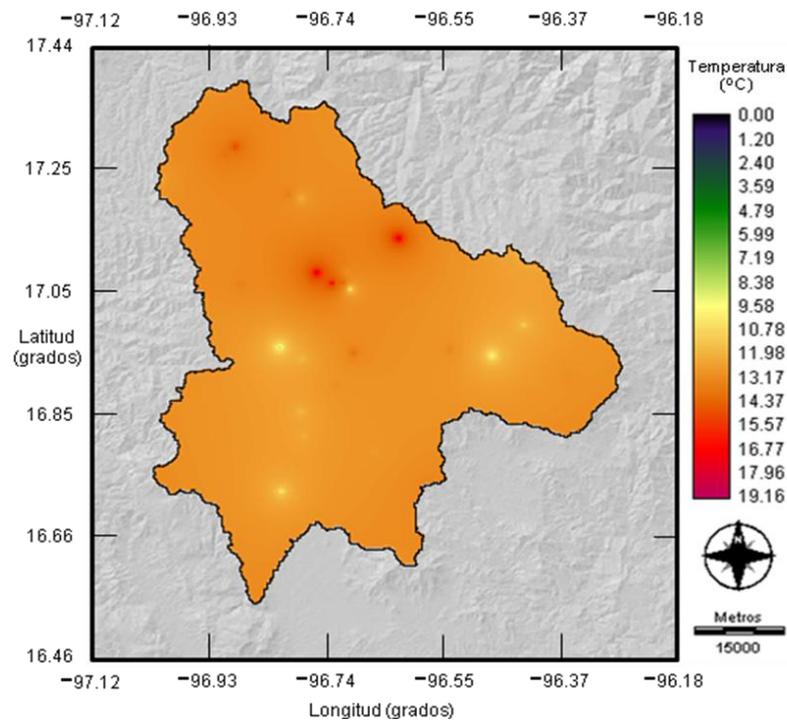


Figura b12. Distribución espacial de temperatura promedio del mes de diciembre

**ANEXO C IMÁGENES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PROMEDIO EN LA ZONA DE ESTUDIO**

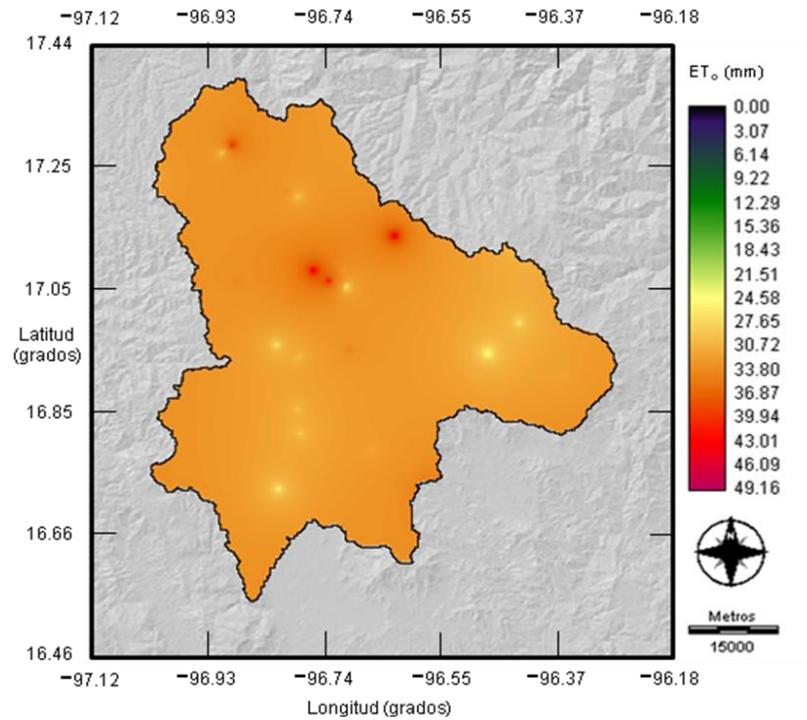


Figura c1 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de enero

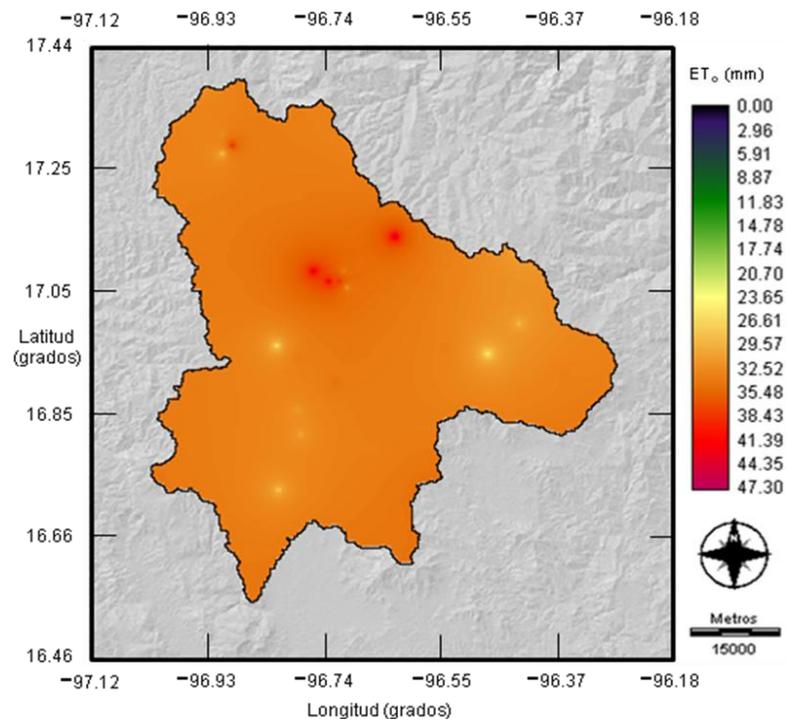


Figura c2 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de febrero

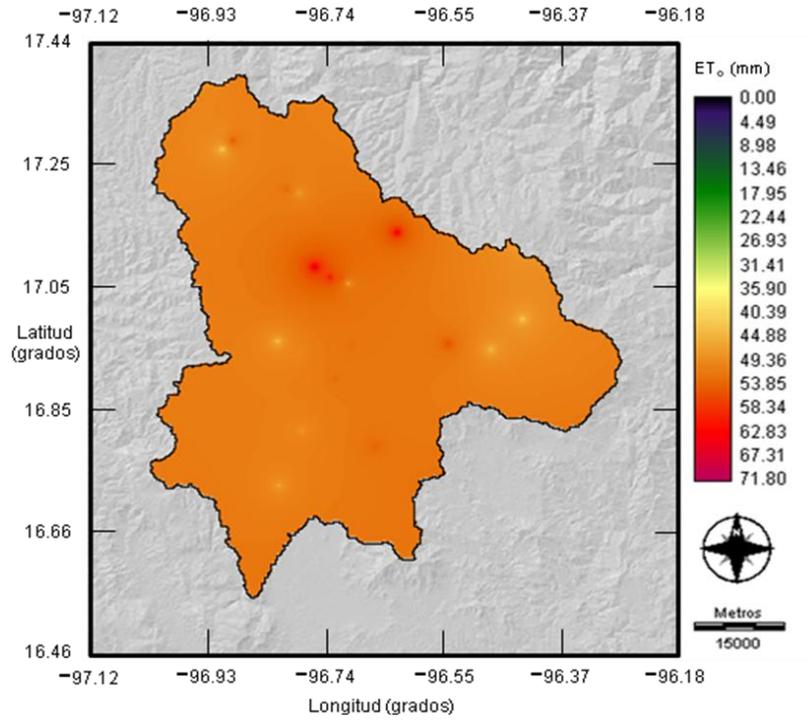


Figura c3 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de marzo

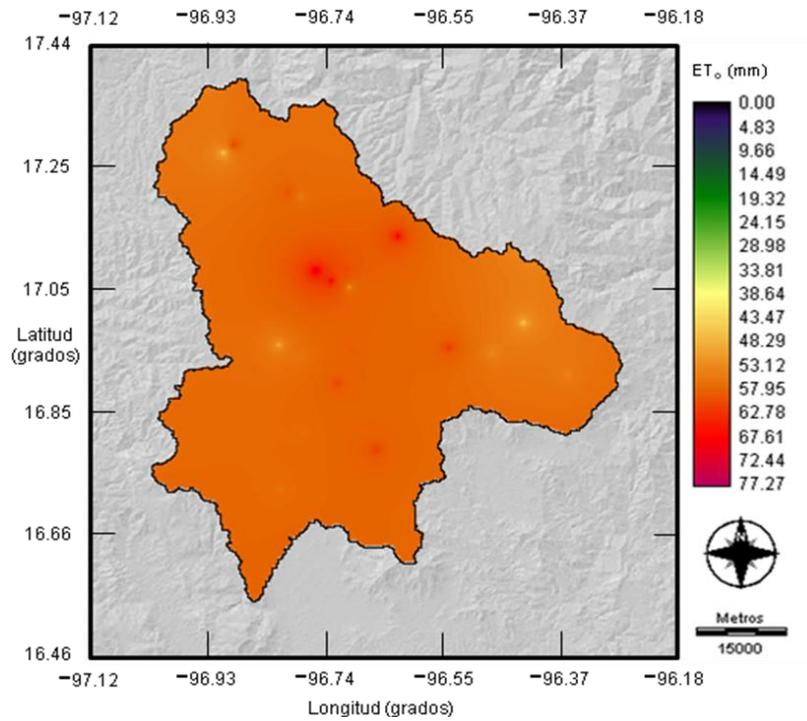


Figura c4 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de abril

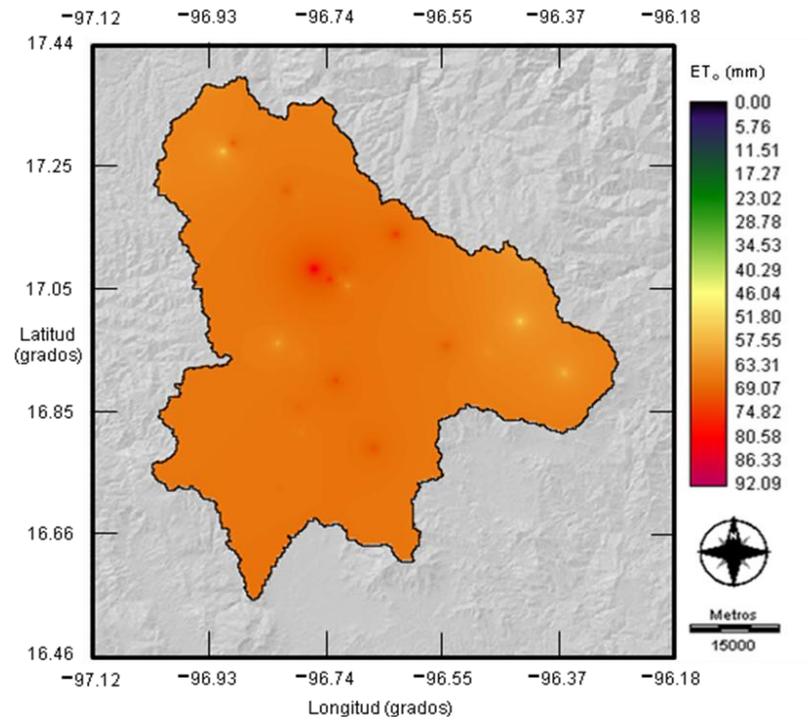


Figura c5 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de mayo

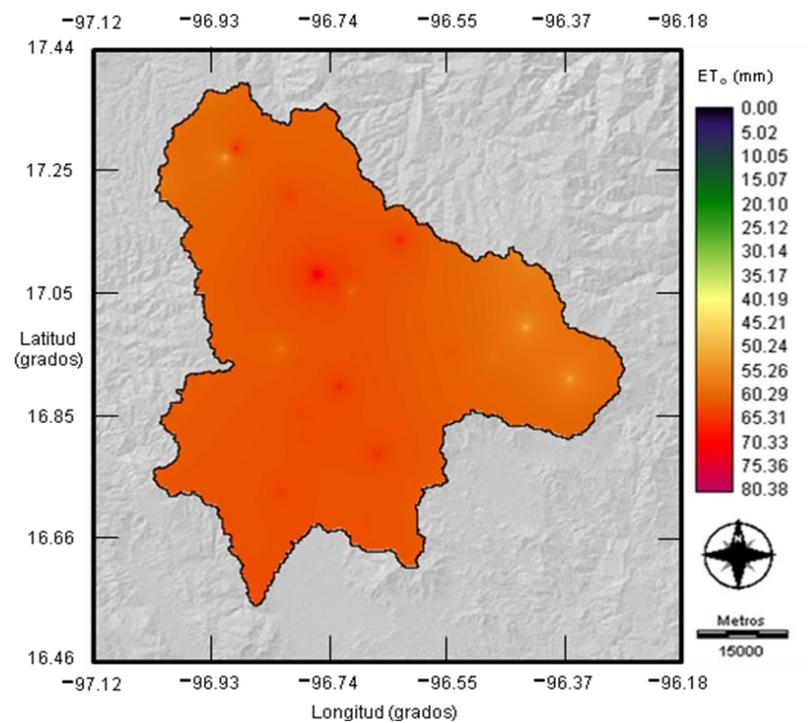


Figura c6 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de junio

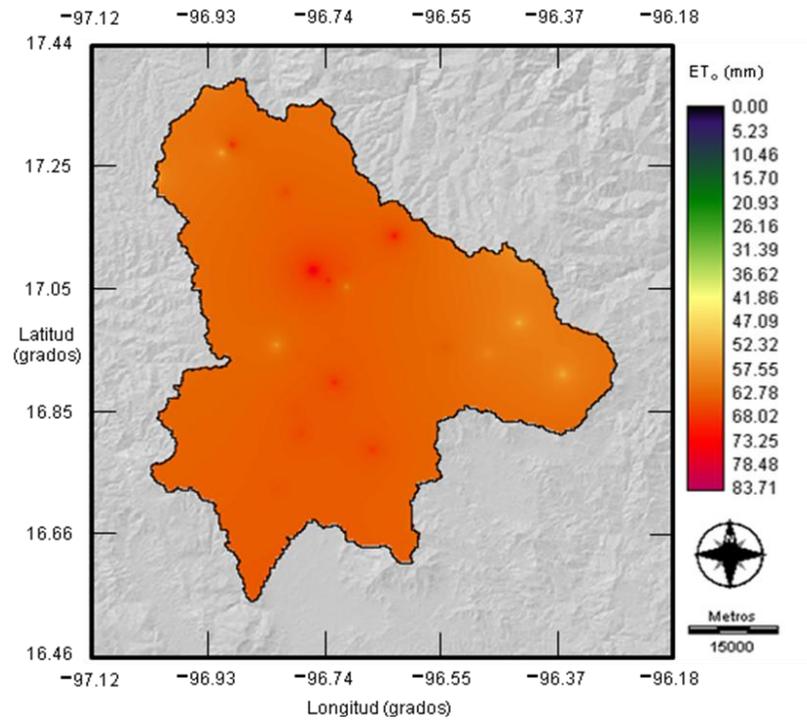


Figura c7 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de julio

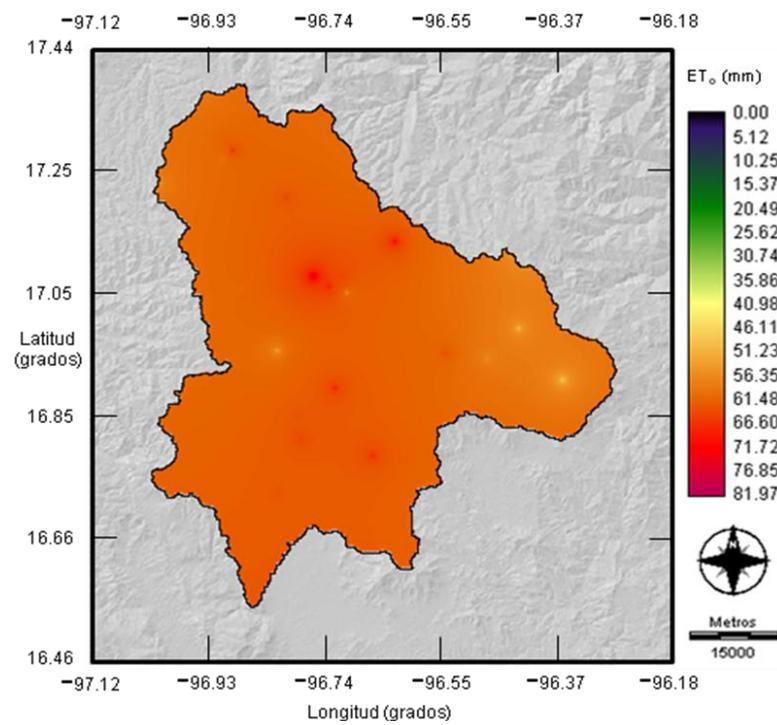


Figura c8 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de agosto

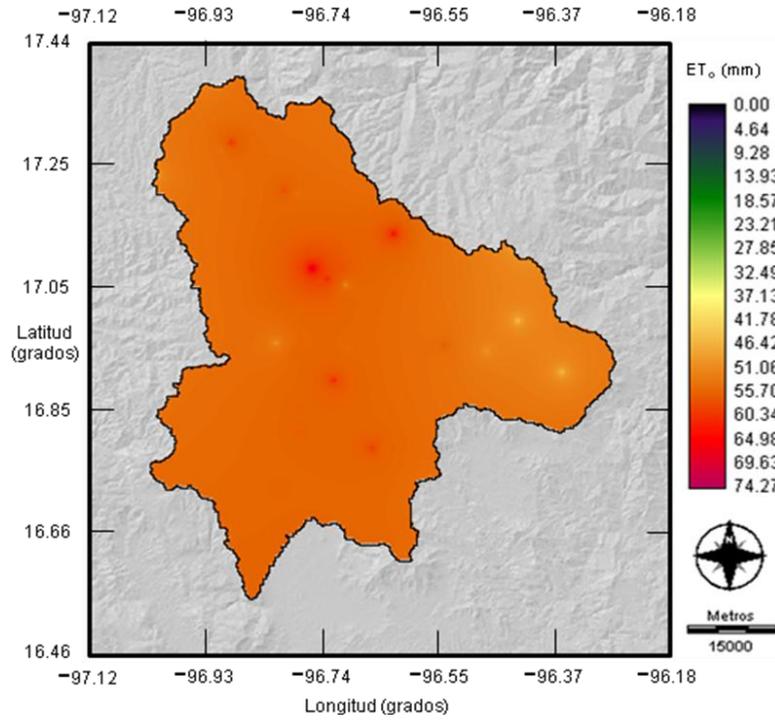


Figura c9 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de septiembre

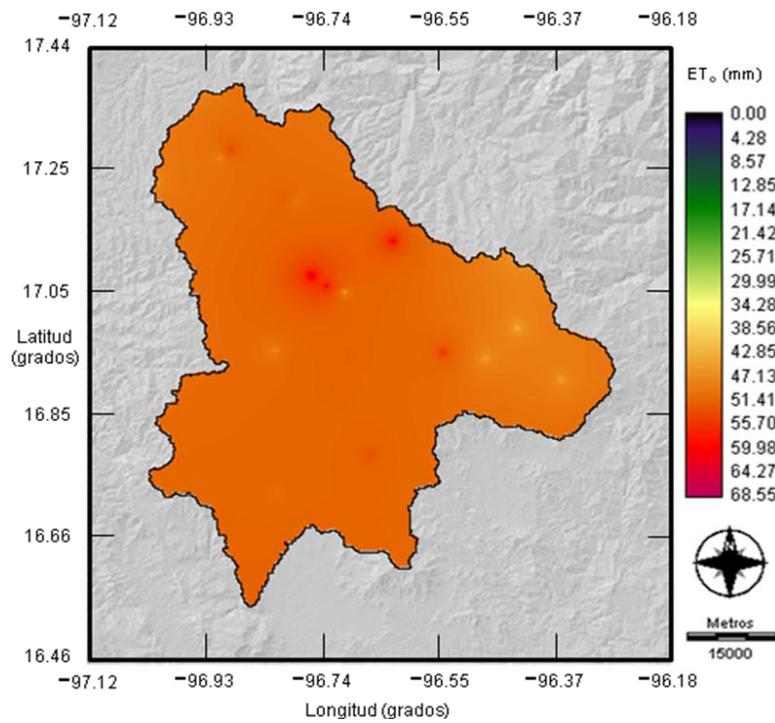


Figura c10 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de octubre

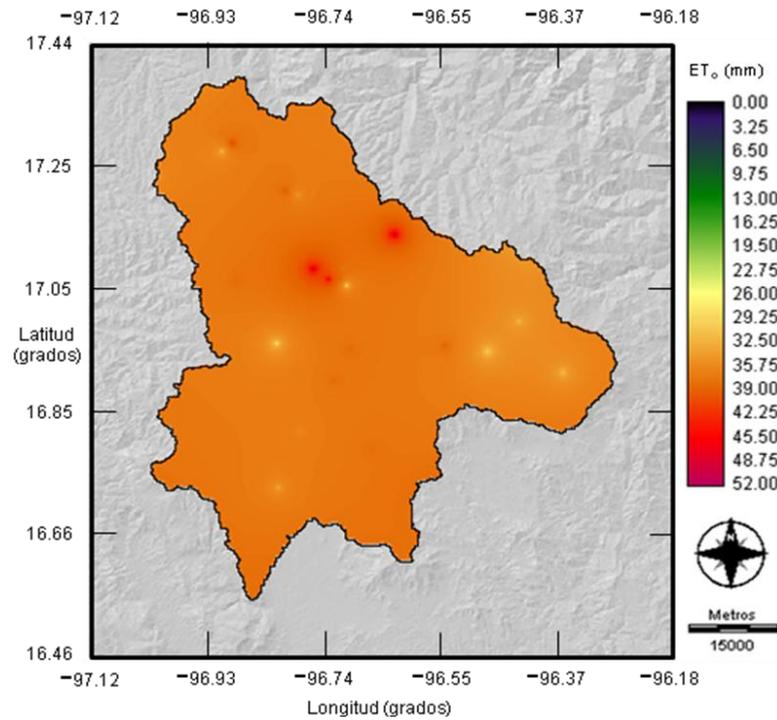


Figura c11 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de noviembre

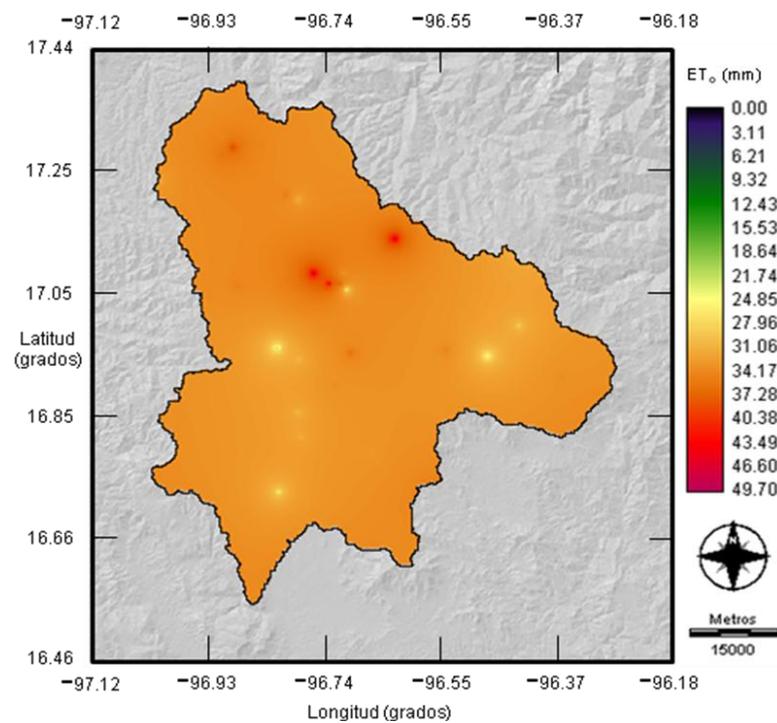


Figura c12 Imagen superficial de evapotranspiración del mes de diciembre.