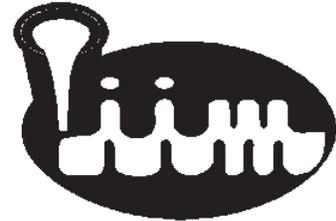


**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS**



**MAESTRIA EN GEOCIENCIAS Y
PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**REGIONALIZACIÓN HIDROLÓGICA EN LA
CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO**

**Tesis que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
Teodoro Carlón Allende**

**ASESOR:
DR. Manuel E. Mendoza Cantú**

MORELIA, MICHOACÁN, SEPTIEMBRE DE 2006

CONTENIDO

Índice general	ii-v
Índice de figuras.....	vi-xii
Índice de cuadros.....	xii-xiv
Dedicatoria.....	xv
Agradecimientos.....	xvi-xvii
RESUMEN.....	1-2
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	3-5
1.1. JUSTIFICACIÓN	5-6
1.2. ENFOQUES	6-7
1.3. PREGUNTAS CENTRALES	
1.4. OBJETIVOS	7
a. Objetivo general	7
b. Objetivo particular	7-8
1.5. ANTECEDENTES	
a. Trabajos realizados en otros países	8-10
b. Trabajos realizados en el área de estudio	10-13
1.6. CONTENIDO DE TESIS	13
2. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO	
2.1. CLIMA	14-15
2.2. GEOLOGÍA	15-17
2.3. HIDROGRAFÍA	18
2.4. SUELOS	18-20

2.5. PENDIENTE	20
2.6. DENSIDAD DE LA DISECCIÓN	21
2.7. ZONIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA	21-23
2.8. COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO	23-25
2.9. CONCLUSIONES.....	25-26
2.10. BIBLIOGRAFÍA	26-31
2.11. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS	31-32
3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LAS SUBCUENCAS DE REFERENCIA: SAN MARCOS, QUERÉNDARO Y UMÉCUARO	
3.1. INTRODUCCIÓN	33
a. Tipos de muestreo	33-35
b. Objetivo	35
c. Materiales y métodos	35-37
3.2. RESULTADOS	
a. Matriz de confusión	37-44
b. Caracterización biofísica de las subcuencas de referencia	44-69
3.3. CONCLUSIONES	70
3.4. BIBLIOGRAFÍA	71-72
3.5. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS	72
4. CARTOGRAFÍA GEOPEDOLÓGICA APLICADA AL CÁLCULO DE INFILTRACIÓN	
4.1. INTRODUCCIÓN	73-74
a. Objetivo	75

b. Materiales y método	75-79
------------------------------	-------

4.2. RESULTADOS

a. Generación de cartografía geopedológica	80-84
--------------------------------------------------	-------

b. Medición y cálculo de la capacidad de infiltración	84-99
-------------------------------------------------------------	-------

4.3. CONCLUSIONES	99-100
-------------------------	--------

4.4. BIBLIOGRAFÍA	101-102
-------------------------	---------

4.5. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS	102-103
--------------------------------------	---------

5. ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO DE LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

5.1. INTRODUCCIÓN	104
-------------------------	-----

a. Objetivo	105
-------------------	-----

b. Materiales y métodos	105-108
-------------------------------	---------

5.2. RESULTADOS

a. Descripción climática	109-111
--------------------------------	---------

b. Series de tiempo	111-117
---------------------------	---------

c. Análisis de tendencia	117-125
--------------------------------	---------

d. Medición de gastos y monitoreo de registros automatizados	126-133
--------------------------------------------------------------------	---------

5.3. CONCLUSIONES	133-135
-------------------------	---------

5.4. BIBLIOGRAFÍA	135-136
-------------------------	---------

6. CARACTERIZACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO EN BASE A UN ANÁLISIS DE CLUSTER

6.1. INTRODUCCIÓN	137
-------------------------	-----

a. Objetivo	137
-------------------	-----

b. Materiales y métodos137-141

6.2. RESULTADOS

a. Análisis de unidades de relieve142-144

b. Análisis de unidades de relieve y texturas de suelos144-147

c. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos y pendiente del terreno.....147-150

d. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno y densidad de disección150-153

e. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección, tipos de rocas153-156

f. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección, tipos de rocas y cobertura vegetal del año 1975 y 2000.....156-164

g. Análisis de agrupamiento de subcuencas para la cobertura del año 1975 y 2000.....164-168

h. Análisis de componentes principales (PCA).....169-172

6.3. CONCLUSIONES172-173

6.4. BIBLIOGRAFÍA173-174

7. CONCLUSIONES GENERALES175-178

8. RECOMENDACIONES.....178

ÍNDICE DE FIGURAS

UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

Figura 1. Ubicación de área de estudio.....	14
Figura 2. Tipos de climas presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	16
Figura 3. Mapa litológico generalizado de la cuenca del Lago de Cuitzeo	17
Figura 4. Porcentajes de las diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo	17
Figura 5. Escurrimientos y subcuencas de la cuenca del Lago de Cuitzeo	18
Figura 6. Porcentaje que cubren los diferentes tipos de suelos	19
Figura 7. Mapa generalizado de suelos de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	19
Figura 8. Mapa de pendientes de la cuenca del Lago de Cuitzeo	20
Figura 9. Densidad de disección de la cuenca del Lago de Cuitzeo	21
Figura 10. Unidades de relieve generalizadas presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	22
Figura 11. Mapa de zonificación geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	23
Figura 12. Tipos y porcentajes de cobertura vegetal y uso de suelo de la cuenca del Lago de Cuitzeo.....	24
Figura 13. Cobertura vegetal y uso de suelo generalizado	25

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LAS SUBCUENCAS DE REFERENCIA: RÍO SAN MARCOS, RÍO QUERÉNDARO Y UMÉCUARO

Figura 1. Diagrama de la metodología	36
Figura 2. Cuenca del Lago de Cuitzeo con las tres subcuencas de referencia	37
Figura 3. Tipos de rocas presentes en la subcuenca de San Marcos	44

Figura 4. Unidades de los tipos de roca presentes en la subcuenca de San Marcos	45
Figura 5. Abundancia proporcional de unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de San Marcos	46
Figura 6. Subcuenca de San Marcos, unidades geomorfológicas	47
Figura 7. Abundancia proporcional de principales tipos de suelos presentes en la subcuenca de San Marcos	48
Figura 8. Unidades de suelo de la subcuenca de San Marcos	49
Figura 9. Matorral- pastizal típico de la subcuenca de San Marcos	50
Figura 10. Agricultura de temporal	50
Figura 11. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo 2000 de la subcuenca de San Marcos	51
Figura 12. Superficies ocupadas por las clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca de San Marcos	52
Figura 13. Erosión presente en la parte noroeste de la subcuenca de San Marcos	52
Figura 14. Superficies ocupadas de tipos de geología presente en la subcuenca de Umécuaro.....	53
Figura 15. Unidades geológicas presentes en la subcuenca de Umécuaro	54
Figura 16. Unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de Umécuaro	55
Figura 17. Mapa de unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de Umécuaro.....	56
Figura 18. Mapa de tipos de suelo presentes en la subcuenca de Umécuaro.....	57
Figura 19. Tipos de suelos presentes en la subcuenca de Umécuaro.....	58
Figura 20. Unidades de vegetación de la subcuenca de Umécuaro	59
Figura 21. Agricultura de temporal con algunos matorrales	60
Figura 22. Agricultura y bosque de pino-encino al fondo	60

Figura 23. Cobertura vegetal que se presenta en la subcuenca de Umécuaro.....	61
Figura 24. Tipos litológicos en la subcuenca de Queréndaro	61
Figura 25. Unidades litológicas presentes en la subcuenca de Queréndaro	62
Figura 26. Laderas en montañas, presentes en la Subcuenca de Queréndaro	63
Figura 27. Mapa de unidades geomorfológicas de la subcuenca de Queréndaro.....	64
Figura 28. Unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de Queréndaro	65
Figura 29. Mapa de tipos de suelo presentes en la subcuenca de Queréndaro.....	66
Figura 30. Abundancia proporcional de tipo de suelos presentes en la subcuenca de Queréndaro.....	67
Figura 31. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de Queréndaro..	68
Figura 32. Bosque típico en la parte alta de la subcuenca de Queréndaro	69
Figura 33. Cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca de Queréndaro	69

CARTOGRAFÍA GEOPEDOLÓGICA APLICADA AL CÁLCULO DE INFILTRACIÓN

Figura 1. Diagrama de los pasos de la metodología para la realización de la cartografía geopedológica y las pruebas de infiltración.	78
Figura 2. Mapa geopedológico de la subcuenca de San Marcos.....	81
Figura 3. Mapa geopedológico de la subcuenca de Queréndaro	82
Figura 4. Mapa geopedológico de la subcuenca de Umécuaro	83
Figura 5. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de Umécuaro.....	87
Figura 6. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de Umécuaro.....	88
Figura 7. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de San Marcos.....	93
Figura 8. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de San Marcos.....	94
Figura 9. Graficas de velocidad de infiltración de la subcuenca de Queréndaro	97

ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO DE LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

Figura 1. Diagrama de la metodología del análisis hidrometeorológico.....	106
Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de tendencia.....	106
Figura 3. Climogramas de las estaciones de Acuitzio del Canje, Cointzio, Cuitzeo, Cuitzillo Grande, Huingo y Jesús del Monte	110
Figura 4. Climogramas de las estaciones de Morelia, Presa Malpais, San Sebastián, Santiago Undameo y Zinapécuaro	113
Figura 5. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Acuitzio del Canje, Cointzio y Cuitzeo.....	112
Figura 6. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Cuitzillo Grande, Huingo y Jesús del Monte	114
Figura 7. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Morelia, Presa Malpais y San Sebastián	115
Figura 8. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Santiago Undameo y Zinapécuaro.....	116
Figura 9. Análisis de tendencia de la temperatura media	119
Figura 10. Análisis de tendencia de la temperatura máxima	120
Figura 11. Análisis de tendencia de la temperatura mínima	121
Figura 12. Análisis de tendencia de la precipitación	123
Figura 13. Análisis de tendencia de los gastos máximos	122
Figura 14. Análisis de tendencia de los gastos medios	124
Figura 15. Análisis de tendencia de los gastos mínimos	125
Figura 16. Comportamiento del nivel de agua de la Presa de Umécuaro	127

Figura 17. Comportamiento del nivel de agua del Río San Marcos	128
Figura 18. Comportamiento del nivel de agua del Río Queréndaro	129
Figura 19. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación de Umécuaro	130
Figura 20. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación de Chiquimitio	131
Figura 21. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación de Milpillas	132
Figura 22. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación del Castillo	133

CARACTERIZACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO EN BASE A UN ANÁLISIS DE CLUSTER

Figura 1. Diagrama de metodología	138
Figura 2. Variables utilizadas para el análisis.....	139
Figura 3. Cuenca del Lago de Cuitzeo con las 52 subcuencas.....	140
Figura 4. Dendrograma del análisis de conglomeración para los atributos de unidades de relieve.....	142
Figura 5. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve.....	144
Figura 6. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve y texturas de suelo	146
Figura 7. Análisis de conglomeración de unidades de relieve y texturas suelos	147
Figura 8. Dendrograma con grupos formados con los tipos de relieve, textura de suelo y pendiente del terreno	149

Figura 9. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve y texturas de suelo y pendiente del terreno150

Figura 10. Dendrograma de las unidades de relieve, textura de suelos, pendiente del terreno y densidad de disección152

Figura 11. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve y texturas de suelo, pendiente del terreno y densidad de disección.....153

Figura 12. Dendrograma de las unidades de relieve, textura de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección y tipos de roca155

Figura 13. Grupos formados con los atributos de unidades del relieve, texturas de suelo, pendiente del terreno, densidad de disección y tipo de rocas156

Figura 14. Dendrograma del análisis de conglomeración de unidades de relieve, textura de suelo, pendiente, densidad de disección, tipos de rocas y cobertura vegetal del año 2000.....159

Figura 15. Grupos formados con los atributos de unidades del relieve, texturas de suelo, pendiente del terreno, densidad de disección, tipo de rocas y cobertura vegetal del año 2000160

Figura 16. Dendrograma del análisis de conglomeración de unidades de relieve, textura de suelo, pendiente, densidad de disección, tipos de rocas y cobertura vegetal del año 1975162

Figura 17. Grupos formados con los atributos de unidades del relieve, texturas de suelo, pendiente del terreno, densidad de disección, tipo de rocas y cobertura vegetal del año 1975163

Figura 18. Mapa de análisis de agrupamiento de cobertura vegetal y uso de suelo para el año de 1975165

Figura 19. Mapa de análisis de agrupamiento de cobertura vegetal y uso del suelo para el año 2000.....	166
Figura 20. Análisis de la cobertura vegetal para el año de 1975	167
Figura 21. Análisis de cobertura vegetal para el año 2000	168

ÍNDICE DE CUADROS

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LAS SUBCUENCAS DE REFERENCIA: RÍO SAN MARCOS, RÍO QUERÉNDARO Y UMÉCUARO

Cuadro 1. Significado de las abreviaturas utilizadas en las matrices de confusión	38
Cuadro 2. Matriz de confusión de las formas del relieve de la subcuenca de San Marcos.....	39
Cuadro 3. Matriz de confusión de las formas del relieve de la subcuenca de Umécuaro.....	40
Cuadro 4. Matriz de confusión de las formas del relieve de la subcuenca de Queréndaro.....	41
Cuadro 5. Matriz de confusión de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de San Marcos.....	42
Cuadro 6. Matriz de confusión; cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de Queréndaro	42
Cuadro 7. Matriz de confusión; cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de Umécuaro.....	43

CARTOGRAFÍA GEOPEDOLÓGICA APLICADA AL CÁLCULO DE INFILTRACIÓN

Cuadro 1. Valores estimados de la porosidad (%), según Sanders (1998), y Freeze y Cherry (1979)	74
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Cuadro 2. Porcentaje (%) de humedad de suelo presente en las muestras que se tomaron en la subcuenca de Umécuaro	84
Cuadro 3 Características biofísicas de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración en la subcuenca de Umécuaro	86
Cuadro 4. Porcentaje (%) de humedad de suelo presente en las muestras que se tomaron en la subcuenca de San Marcos	90
Cuadro 5. Características biofísicas de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración en la subcuenca de San Marcos	92
Cuadro 6. Características biofísicas de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración en la subcuenca de Queréndaro	96
Cuadro 7. Porcentaje (%) de humedad de suelo presente en las muestras que se tomaron en la subcuenca de Queréndaro	97

ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO DE LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

Cuadro 1. Estaciones con periodos de registros de datos	108
Cuadro 2. Estaciones con los tipos de clima	109

CARACTERIZACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO EN BASE A UN ANÁLISIS DE CLUSTER

Cuadro 1. Códigos dados a las subcuencas en los dendrogramas	141
Cuadro 2. Subcuencas agrupadas en el análisis de conglomeración de las unidades de relieve.....	143
Cuadro 3. Subcuencas agrupadas en el análisis de conglomeración con las variables de unidades de relieve y textura de suelos	145

Cuadro 4. Subcuencas agrupadas en el análisis de conglomeración con las variables de relieve, textura de suelos y pendiente	148
Cuadro 5. Subcuencas que se agrupa el análisis de conglomeración con las variables de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno y densidad de disección	151
Cuadro 6. Subcuencas agrupadas de acuerdo al análisis de conglomeración	154
Cuadro 7. Subcuencas agrupadas con el análisis de conglomeración con las variables relieve, texturas de suelos, pendiente, densidad de drenaje, rocas y cobertura vegetal del año 2000.....	157
Cuadro 8. Subcuencas agrupadas de acuerdo al análisis de conglomeración para el año 1975.....	160
Cuadro 9. Importancia de los grupos o regiones de acuerdo a superficie, nivel de contigüidad, número de subcuencas y % de bosque o matorral para el año 2000	164

DEDICATORIA

A mis insuperables, apreciables e inolvidables padres Delia y Santiago por su gran papel de padres, amigos y compañeros. Por su gran amor, cariño, confianza, paciencia, apoyo y consejos. Sin su apoyo nada hubiera sido posible, gracias de todo corazón y quiero decirles que los quiero mucho.

A mis encantadores hermanos, Emeli, José P, Reina, Jerónimo, Lina, Beatriz, Román, Patricia y Sergio. Aunque son varios a todos los quiero igual, ya que todos son mi aliento en cada momento para poder salir a delante. Quiero que tengan siempre en su corazón la fortaleza para luchar por sus propias convicciones.

AGRADECIMIENTOS.

Un agradecimiento muy especial a la columna fundamental para la realización de este trabajo al Dr. Manuel E. Mendoza Cantú, quien acepto ser mi asesor de tesis, y que sin duda alguna sus consejos, afecto y presión; ayudo a mi formación profesional, además de que su amistad, solidaridad, confianza, comprensión siempre se mantuvo firme.

A cada uno de los miembros de la mesa sinodal, Dra. Isabel Israde, Dr. Miguel Bravo, Dr. Eleazar Arreygue y al Dr. Alfredo Amador. Quienes me ayudaron con su asesoría y consejos para poder mejorar y culminar este trabajo.

La presente investigación se llevo a cabo gracias al auspicio del Fondo Mixto del Estado de Michoacán-CONACyT, a través del proyecto **Regionalización hidrológica y cambio de cobertura vegetal y uso del suelo dentro de la cuenca de Cuitzeo. Bases para la planeación de los recursos hídricos en cuencas pobremente aforadas, Clave: 12469**. El trabajo se desarrollo en el área de Análisis Integrado de Cuencas de la Unidad Académica Foránea del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México en el Campus de Morelia, con el apoyo del Departamento de Geología y Mineralogía de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y del Instituto de Nacional Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Los análisis de laboratorio de realizaron en la UMSNH y en el INIFAP, mientras que los análisis espaciales se realizaron en el área de Análisis Integrado de Cuencas (Instituto de Geografía-UNAM).

Agradezco al Dr. Ken Oyama, director del Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco) de la UNAM, quien proporcionó apoyo para la realización de algunas salidas de campo a través del proyecto **Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano en la Cuenca del Lago de Cuitzeo**.

Agradezco al M. en C. Antonio Navarrete, al Geógrafo Agustín Arellano y al Biol. Vicente Salinas por la asesoría puntual en modelamiento espacial y al Dr. Alejandro Velázquez por su asesoría y comentarios durante el análisis multivariado.



Un gran agradecimiento a la Biol. Yesenia por ser una gran compañera, por todos sus consejos y ayudarme a crecer como personal.

Agradezco a un gran amigo y compañero al Ing. Víctor Medina, con quien compartí varias vivencias tanto académicas como de amistad durante la maestría.

Agradezco a los dueños de los terrenos por acceder a colaborar con la investigación, al permitirnos instalar los instrumentos de medición dentro de sus tierras.

Al Instituto de Geografía (Unidad Académica Morelia), por abrirme las puertas para la realización de este trabajo.

A todas aquellas personas que tuvieron que ver directa o indirectamente con la realización de este trabajo.

RESUMEN

En la determinación de regiones hidrológicas especialmente en áreas pobremente aforadas, no existe una evaluación del efecto del cambio de la cobertura vegetal y el uso del suelo en la redelimitación de regiones. A consecuencia de esto existe el vacío en el conocimiento científico. La cuenca del Lago de Cuitzeo es una unidad natural que presenta en buena medida las condiciones de degradación en las que se encuentran las distintas regiones que conforman no sólo nuestro país, sino las condiciones de países subdesarrollados localizados en la zona intertropical.

La investigación presupone que el modelamiento hidrológico espacialmente distribuido representa la alternativa que permite entender el comportamiento hidrológico a nivel regional, con o sin datos reales de aforos, o con series sintéticas de aforos. El análisis espacial de estas bases de datos permite integrar modelos que describen y predicen el comportamiento hidrológico en cuencas con un dominio geográfico amplio y poco aforadas, debido a que los datos de PR dentro de un SIG pueden apoyar la limitada cantidad de datos hidrológicos de campo, los cuales son frecuentemente utilizados para expresar procesos hidrológicos en una manera dinámica.

Los objetivos de este trabajo fueron: Caracterizar biofísicamente a las subcuencas que conforman la cuenca del Lago de Cuitzeo a partir de la base de datos temáticos de roca, suelo, relieve y cobertura vegetal; construir un mapa geopedológico de las subcuencas de Umécuaro, Queréndaro, y Río San Marcos que describa de manera integrada las características físicas; describir las diferencias en la infiltración de las subcuencas antes mencionadas; analizar el comportamiento de las series de tiempo de los datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura y escurrimiento), y finalmente la construcción de un modelo geográfico que agrupe las distintas subcuencas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), desempeñaron un papel muy importante en la realización de este trabajo, al facilitar la recolección, organización, análisis, manipulación, almacenamiento, representación gráfica y numérica de los datos.

Las subcuencas estudiadas fueron: San Marcos, Queréndaro y Umécuaro, las cuales actuaron como cuencas piloto para posteriormente entender toda la cuenca del Lago de Cuitzeo de acuerdo a las semejanzas físicas y biológicas que se presentaron.

La presente investigación se basa en un enfoque biofísico que integró tecnologías de SIG y Percepción Remota (PR), con el doble propósito de entender el

comportamiento hidrológico y construcción de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos de áreas hidrológicas similares.

La elaboración del mapa geopedológico sirvió para estratificar el muestreo de las pruebas de infiltración, para lo cual se realizaron 24 pruebas de infiltración en cuatro tipos de suelo con diferentes texturas, en 19 tipos de relieve y en 4 tipos de cobertura vegetal y uso de suelo. El análisis de tendencia indicó que la temperatura media en las estaciones de Morelia, Santiago Undameo, Zinapécuaro y Presa Malpais tienden a aumentar de manera significativa, tanto sus valores mensuales como en el valor medio anual; mientras que Cuitzeo y Huingo tienden a reducir sus temperaturas en forma significativa. De las tres subcuencas seleccionadas a *priori* para monitorear dos se pueden considerar subcuencas de referencia, ya que la subcuenca de Umécuaro no se asemeja a otras subcuencas. El análisis estadístico permitió regionalizar la cuenca del Lago de Cuitzeo con base en atributos biofísicos del paisaje. El número de grupos varío entre 1975 y 2000; se formaron ocho en 1975 y nueve grupos en 2000.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es esencial para la existencia de cualquier tipo de vida porque juega un papel importante en muchas actividades propias de los seres humanos, de la agricultura a la industria, del abastecimiento de agua potable a los usos recreativos. Siendo el régimen de precipitaciones fundamental tanto como fuente de agua potable para la sociedad, como para el mantenimiento de muchos ecosistemas.

Para poder abordar el estudio del agua es necesario revisar cuidadosamente el ciclo hidrológico, con que incluye la circulación, almacenamiento y los procesos que conducen o afectan los movimientos del agua en la tierra (Dunne y Leopold, 1978). Así como también la parte de la intervención humana en cada uno de los procesos anteriormente mencionados, la cual puede ser directa o indirecta, local o global. El cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, específicamente en los matorrales que pasaron a formar parte de la agricultura y viceversa. La pérdida de bosque, el cambio de uso de suelo y las prácticas erróneas de agricultura, también son factores que han afectado a gran escala a los ecosistemas; actualmente nos aquejan impactos tales como: cambio climático, alteración del ciclo hidrológico, etc. (Taniguchi, 1997; Vorosmarty *et al.*, 1998; Sahagian, 2000).

Existen pocos trabajos con relación al análisis de implicaciones hidrológicas en donde se incluya los cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal que se han presentado a nivel Sub-regional (por ejemplo, Fahey y Jockson, 1997; Lorup, *et al.*, 1998; Elkaduwa y Sakthivadivel, 1998; Buchtele *et al.*, 1998; Jain *et al.*, 2000; Carlson y Traci, 2000; Fohrer, *et al.*, 2002). La mayoría de estas investigaciones se han realizado en cuencas experimentales, bien aforadas, donde es posible calibrar y validar los modelos hidrológicos espacialmente distribuidos. En cualquier caso, los resultados del análisis de los cambios pueden ser utilizados para la construcción y revisión de planes de manejo de recursos naturales.

Esta investigación trata de profundizar en el conocimiento hidrológico a nivel regional y en las implicaciones que el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo tiene en la redefinición de regiones a lo largo del tiempo, aborda también el estudio de datos hídricos históricos y actuales de una determinada cuenca o región, poder predecir en el futuro el abastecimiento de agua para el consumo humano, riego, industrial, etc.

La naturaleza integradora de conceptos geográficos, tales como región o paisaje proporciona un marco espacial para aproximarse a problemas de transformación, degradación o impacto ambiental (Hägerstrand, 1993 en Hall, 2000). Una región en un

sentido tradicional es una representación discreta del espacio geográfico. También es generalmente considerada un área conformada por un número de sub-unidades relativamente homogéneas (Hall, 2000). Por lo tanto, la regionalización es una clasificación de la superficie de la Tierra, crucial en el estudio de la geografía (Eichen, 1989).

La regionalización como herramienta de síntesis del espacio geográfico es muy antigua; sin embargo, es hasta mediados de la década de 1920, cuando se introducen nuevas consideraciones del pensamiento geográfico (véase Hartshorne, 1939); después de la segunda guerra mundial nuevos enfoques se introducen a esta herramienta de síntesis (Whittlesey, 1954; Hagget, 1977 y Paasi, 1986). En los años 90s surgen nuevas bases teóricas de regionalización territorial abandonando completamente los métodos determinísticos y descriptivos (entre otros Brunt, 1995, Magas, 2003).

En las disciplinas relacionadas al estudio del agua, el uso de la regionalización se ha incrementado recientemente como mecanismo de clasificación y cartografía de climas y precipitación, utilizando técnicas estadísticas multivariadas como el análisis de componentes principales y el análisis de conglomerados (Ayoade, 1976; Baeriswy y Rebetez, 1997; Comriel y Glenn, 1998).

Los métodos de regionalización son utilizados frecuentemente en hidrología cuando se realizan análisis de tendencia regional y análisis de frecuencia de inundaciones, con la intención de que sean útiles para los tomadores de decisiones (Renschler *et al.* 2001).

Los esfuerzos mencionados están ligados al incremento de la demanda por herramientas de manejo de cuencas a escalas tanto local como regional; resalta la necesidad de desarrollar técnicas de regionalización para la aplicación de modelos basados en procesos físicos continuos. Durante las dos décadas anteriores se han realizado esfuerzos considerables en el análisis y desarrollo de procedimientos de regionalización. Sin embargo, ninguno ha demostrado que produce resultados universalmente aceptables para este tipo de análisis (Rao y Srinivas, 2006b; Chiang *et al.*, 2002 a y b).

La regionalización hidrológica basada en las características biofísicas de las cuencas no solo permite generar un esquema de bajo costo para instalar una red de monitoreo de cuencas que carecen de un sistema de medición y registro de aforos, sino además permite establecer las bases de datos necesarias para un modelamiento hidrológico fino de la relación precipitación-escurrimiento, para eventos extremos

(sequías e inundaciones), así como entender las relaciones entre calidad y cantidad de agua en cuencas hidrográficas.

Generalmente se asume que las propiedades físicas de las cuencas de drenaje determinan el tipo y tasa de los procesos hidrológicos. Si las relaciones entre estas propiedades y su respuesta hidrológica pueden ser establecidas, el comportamiento hidrológico puede ser predicho sin la necesidad de medir directamente los procesos. Por consideraciones prácticas no es posible, y en muchos casos no es necesario, considerar todas las características físicas de las cuencas (Vandewiele *et al.* 1991). Entre las más utilizadas se encuentran la densidad de disección, pendiente media de la cuenca, uso del suelo y vegetación, así como litología y suelos (Vandewiele *et al.*, 1991; Xu, 1999; Ando, 1990; Simo, 1986). Estas fuentes de datos estandarizadas y comúnmente disponibles (o generadas exprofesamente), se analizan y visualizan en un SIG para definir unidades homogéneas espacialmente (Renschler, *et al.* 2001).

En hidrología como en muchas otras disciplinas, es importante reconocer que no es posible monitorear los datos hidrológicos en todas las cuencas que constituyen una región o unidad hidrológica superior; por lo tanto, la regionalización se convierte en una herramienta útil para agrupar unidades (subcuencas) con un nivel de similitud tal que la respuesta hidrológica a eventos de precipitación debería ser similar. En los métodos tradicionales de regionalización de una cuenca, ésta se clasifica como perteneciente a un grupo de cuencas sobre la base de su semejanza o disimilitud con otras cuencas en la región, en un espacio multidimensional de atributos que afectan su respuesta hidrológica (Rao y Srinivas, 2006b). Es decir, un grupo de cuencas con patrones similares de inundación constituyen una región homogénea y el procedimiento de identificación de regiones homogéneas; el tradicionalmente llamado regionalización (Chiang *et al.*, 2002a; Rao y Srinivas, 2006a).

1.1. JUSTIFICACIÓN.

El resultado final del uso de datos espaciales es la generación de modelos espacialmente distribuidos de precipitación, temperatura, evaporación, transpiración, escorrentía y balance hídrico, así como el cambio de este último en el transcurso del tiempo. Esta capacidad permite comprender los cambios en el movimiento del agua debido a las variaciones de los parámetros topográficos, edafológicos, geológicos, de vegetación y climáticos (McDonell, 1996). En la determinación de regiones hidrológicas, especialmente en áreas pobremente aforadas, no existe una evaluación del

efecto del cambio de la cobertura vegetal y el uso del suelo en la redelimitación de regiones como consecuencia de esto, existe un vacío en el conocimiento científico siendo esto la justificación básica de la presente investigación.

Se escogió la Cuenca del Lago de Cuitzeo porque es una unidad natural que presenta en buena medida las condiciones de degradación en las que se encuentran las distintas regiones que conforman no sólo nuestro país, sino las condiciones de países subdesarrollados localizados en la zona intertropical.

El Lago de Cuitzeo ha sido declarado zona prioritaria en México para la investigación y la conservación por el Comité Tripartita compuesto por la Dirección General de Conservación Ecológica de los Recursos, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, el Servicio Canadiense para la Vida Silvestre y la Oficina para la Coordinación de la Gestión de los Humedales de México, Sección Pacífico (Comité Tripartita 1992). Además, el Lago forma parte de la regiones hidrológicas consideradas prioritarias por la Comisión Nacional para el Estudio y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) por considerarse una región cuya alta biodiversidad está amenazada (<http://www.conabio.gob.mx/rphidrológicas/PRESENTACIÓN.html>).

Las subcuencas de Cointzio, Queréndaro y San Marcos son de las subcuencas que cuentan con la mayor cantidad de registros históricos de hidrometría y meteorología; además, son diferentes en cobertura vegetal y uso de suelo, lo que permite analizar tres tipos de comportamiento hidrológico diferente en la cuenca.

1.2. ENFOQUES

La presente investigación se basa en un enfoque geomorfológico que integró tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota (PR), con el doble propósito de entender el comportamiento hidrológico y construir modelos hidrológicos espacialmente distribuidos de forma eficiente. La investigación presupone que el modelamiento hidrológico espacialmente distribuido, representa la alternativa que permite entender el comportamiento hidrológico a nivel regional, con o sin datos reales de aforos, o con series sintéticas de aforos. El análisis espacial de estas bases de datos permite integrar modelos que describen y predicen el comportamiento hidrológico en cuencas con un dominio geográfico amplio y poco aforadas, debido a que los datos de PR dentro de un SIG pueden apoyar la limitada cantidad de datos hidrológicos de campo, los cuales son frecuente utilizados para expresar procesos hidrológicos en una manera dinámica (Bastiannssen *et al*, 1999; Baumgartner y Aplf, 1996). Lo anterior

motiva la necesidad de desarrollar métodos indirectos; sin embargo, es preciso señalar que el establecimiento de redes de estaciones hidrometeorológicas se debe de impulsar por su importancia en la generación de registros para poder validar modelos o para evaluar y predecir el manejo de cuencas (Olsson y Pilesjo, 1999; Bastiaanssen, 2000a; Bastiaanssen, 2000b).

La presente investigación propone profundizar en el entendimiento del cambio en el balance hídrico a nivel regional y utilizar un acercamiento metodológico viable que permita estimar regionalmente la distribución espacial de los parámetros de un balance hídrico con un número reducido de observaciones puntuales (temporal y espacial) de variables provenientes de estaciones climáticas.

1.3. PREGUNTAS CENTRALES

1. ¿Es posible segmentar la cuenca del Lago de Cuitzeo por subcuencas semejantes en su paisaje?
2. ¿Cuáles son las subcuencas que se asemejan más a cada una de las tres subcuencas, desde el punto de vista de paisaje de cada una de ellas?
3. ¿Existen diferencias en la precipitación anual y volumen de los escurrimientos anuales en las subcuencas de Queréndaro, Umécuaro y San Marcos?
4. ¿Existen tendencias en los escurrimientos anuales en las subcuencas de Queréndaro, Umécuaro y San Marcos?

1.4. OBJETIVOS

a. Objetivo general

- ❖ Regionalizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del Lago de Cuitzeo en función de las características biofísicas de la cuenca

b. Objetivos particulares

- ❖ Caracterizar biofísicamente a las subcuencas que conforman la cuenca del Lago de Cuitzeo a partir de la base de datos temáticos de roca, suelo, relieve y cobertura vegetal (1975 y 2000).
- ❖ Construir un mapa geopedológico de las subcuencas de Umécuaro, Queréndaro, y San Marcos que describa de manera integrada las características físicas de las subcuencas.
- ❖ Describir las diferencias en la infiltración de las subcuencas de Umécuaro, Queréndaro, y San Marcos.

- ❖ Analizar el comportamiento de las series de tiempo de los datos de precipitación, temperatura y escurrimiento de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las subcuencas de Cointzio, Queréndaro, y San Marcos.
- ❖ Construcción de un modelo geográfico que agrupe las distintas unidades de respuesta hidrológica similar dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

1.5. ANTECEDENTES

a. Trabajos realizados en otros países

Vandewiele, *et al*, (1991) en Bélgica, China y Birmania definieron modelos mensuales de precipitación y escorrentía, para su uso en ríos que forman parte de cuencas pequeñas (4,000 km²), y sin heladas considerables para los Lagos naturales o artificiales. Las series de datos de entrada correspondían a evapotranspiración regional y precipitación potencial. Su metodología reduce esencialmente al análisis de la regresión, incluyendo análisis de residuales, sensibilidad al período de la calibración y prueba de la extrapolación. Obtuvieron resultados comparables con cuatro modelos similares.

Rubiano M. J (1998) modeló escenarios de cambios en el uso de tierra utilizando un modelo empírico con el propósito de evaluar las respuestas hidrológicas en una cuenca tropical para lo cual utilizó un modelo espacialmente distribuido basado en procesos físicos. Los escenarios fueron generados a partir de un modelamiento con autómatas celulares para simular el cambio en áreas deforestadas, considerando la cercanía a las carreteras y a áreas que fueron previamente deforestadas. Estos escenarios fueron utilizados como parte de la información requerida por el modelo hidrológico, con el fin de identificar el impacto potencial que los patrones de cambio de uso de tierra tienen en el escurrimiento, infiltración y evaporación. Se concluyó que el enfoque de modelos basados en autómatas celulares tiene un potencial alto para generar patrones de uso/cobertura de la tierra, dependiendo de las restricciones físicas o socio-económicas. Además de que la aplicación de los diferentes escenarios de uso de tierra en un modelo hidrológico dio una idea aproximada de perturbaciones ocasionadas sobre el balance hidrológico en las cuencas andinas.

Xu (1999) investigó la utilidad de un modelo conceptual del balance hídrico para simular el flujo de los ríos en cuencas que cubren una amplia variedad de áreas climáticas y fisiográficas. Su propuesta es un modelo del balance hídrico con 6 parámetros que fue aplicado a 26 estaciones que se encuentran en una cuenca de la

parte central de Suecia. El modelo fue calibrado en un grupo de cuencas y los valores de los parámetros calibrados se relacionaron con los índices físicos de la cuenca. Las relaciones fueron probadas por los registros observados y simulados comparando la escorrentía a partir de 4 cuencas que no se incluyeron en el análisis de regresión. Para probar la utilidad física del modelo en un sistema con más variabilidad de condiciones, el modelo fue modificado excluyendo los efectos de la nieve. Los resultados y la misma técnica fueron validados en 24 cuencas del Norte de Bélgica.

Zhang et al. (2002) Observaron que los modelos de balance hídrico pueden ser constituidos a cualquier nivel de complejidad; modelaron el balance hídrico en el Norte de la Planicie de China reconocieron que si aplicaban trabajos experimentales en campo se puede obtener un entendimiento más preciso y relativo de los componentes del ciclo hidrológico.

Chiang et al, (2002a) propusieron un esquema de regionalización para clasificar cuencas en sitios aforados. El esquema utilizó 16 parámetros del escurrimiento estimados por un modelo de series de tiempo y clasificó 94 cuencas en 6 regiones utilizando un análisis de conglomeración y análisis de componentes principales, este último para interpretar las diferencias y semejanzas regionales. Las regiones clasificadas parecen estar separadas por límites fisiográficos. Cada cúmulo representa una región hidrológica. La pertenencia regional está identificada por las variables de cuenca, tales como elevación, área forestal, pendiente del canal, y precipitación basada en los cálculos de los valores de las variables canónicas discriminativas. Esto enfatiza la importancia de la regionalización hidrológica y de la identificación de las características específicas de cada región.

Speelman (2003) identificó y evaluó los métodos estadísticos aplicados a la relación precipitación-escurrimiento en la determinación de las características del flujo de las cuencas; este estudio se llevó a cabo en Zimbabwe, África. Desarrolló las relaciones entre las cuencas y las características del flujo, por medio de la regresión múltiple y redes neuronales y analizó la redundancia para investigar las respuestas hidrológicas multidimensionales; realizó un análisis de conglomeración para saber de los comportamientos hidrológicos similares dentro de la misma cuenca.

b. Trabajos realizados en el área de estudio

Chávez (1994) mencionó que el impacto ambiental más fuerte al Lago de Cuitzeo se asocia con las descargas de aguas residuales, las cuales llevan altos contenidos de

materia orgánica, algunos tóxicos industriales, que van a contaminar primeramente las áreas de riego del Valle de Morelia-Queréndaro, y posteriormente al Lago, induciendo la hipertroficación de sus aguas, que en algunas ocasiones han producido una mortandad de peces y otros organismos acuáticos; esta contaminación induce la proliferación de malezas acuáticas, lo que a su vez aumenta la evapotranspiración, que se traduce en una mayor pérdida de agua del Lago en un desequilibrio del balance hídrico.

Alvarado *et al*, (1994) analizaron la hipertroficación en el vaso oeste del Lago de Cuitzeo en el periodo 1979-1981. Comparan la composición y abundancia fitoplanctónica y analizaron la influencia que tuvo la hipertroficación; en la disminución de la profundidad y el volumen de agua, el incremento en la carga interna de nutrientes y la bioturbidez sobre la comunidad fitoplanctónica. Los autores mencionan que el Lago ha sufrido un marcado desequilibrio de descenso del nivel en los años treinta; Cuitzeo llegó a secarse en 1941 y en 1962, y en la última década el Lago se recuperó un poco; sin embargo, en la década de 1970 y principios de 1980 el Lago continuó descendiendo drásticamente.

Romero *et al*, (2001) analizaron la relación entre el ambiente y el uso del suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo; identificaron cinco ambientes para la actividad agropecuaria forestal. Mencionan que en las llanuras se practica la actividad agrícola de riego intensiva y semi-intensiva, y en las sierras altas la actividad forestal extensiva con problemas de degradación de bosques y suelos.

López *et al*, (2001) describieron y cuantificaron patrones de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en un periodo de 35 años, dentro de la proximidad de la ciudad de Morelia de rápido crecimiento en México. Para lo cual se usaron fotografías aéreas rectificadas y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El cambio de cobertura vegetal y uso de suelo (CCVUS) fue proyectado para los próximos 20 años usando el método de Markov y análisis de regresión. Los autores exploran las relaciones entre el crecimiento urbano y el cambio del paisaje, y entre crecimiento urbano y crecimiento poblacional. Concluyen en su análisis de las matrices de Markov que el CCVUS mas alto se presenta en la Ciudad de Morelia.

Mendoza *et al*. (2002a). Documentaron los diferentes enfoques en el análisis espacial de la distribución del agua superficial a una escala regional, y especialmente en áreas donde existe escasez de datos hidrometeorológicos. El análisis lo realizaron por medio de la integración de métodos indirectos, tales como percepción remota (PR), sistemas de información geográfica (SIG) y unidades geomorfológicas. El resultado de la

integración de estos métodos les permitió definir cuatro grupos: 1) modelamiento hidrológico y SIG, 2) PR y modelos hidrológicos, 3) modelamiento hidrológico, PR y SIG, y 4) integración del conocimiento geomorfológico, PR y la aplicación de SIG al modelamiento hidrológico.

López *et al.*, (2004) analizaron el cambio de cobertura vegetal y uso de terreno en la ciudad de Morelia y sus alrededores en un periodo que comprende los años 1975 y 2000. Observaron que los cultivos de riego y de temporal han reducido drásticamente sus áreas de cobertura, los primeros para transformarse en asentamientos humanos y lotes baldíos; y los cultivos de temporal han sido abandonados y actualmente se encuentran con procesos de sucesión vegetal importantes. También pudieron detectar que la deforestación afecta al 12% de la zona de estudio, donde se ven reducidos principalmente los bosques cerrados. Los asentamientos humanos en la región han tenido un crecimiento del 313% siendo la ciudad de Morelia el asentamiento de más rápido crecimiento (600% de 1960 a 1997). La delimitación espacial y análisis de la cobertura y el uso del terreno fue realizada con ayuda de (PR) y (SIG), sobre una base cartográfica escala 1:50 000.

Mendoza *et al.*, (2004) evaluaron el efecto del (CCVUS) a escala regional como es en una cuenca poco aforada para los años 1975 y 2000 el caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo. El efecto hidrológico del CCVUS a este nivel se analizó utilizando modelos hidrológicos espacialmente distribuidos (MHED). Los autores mencionan que los MHED se constituyen a partir de la integración de: 1) modelos hidrológicos empíricos, 2) análisis de documentos aeroespaciales y 3) tecnologías de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG). Se demostró que los cambios en los componentes del balance hídrico regional fueron relativamente pequeños. El análisis del cambio de los componentes del balance hídrico a nivel de formas de relieve confirmó que las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca mejoraron levemente. Sin embargo, las planicies y las formas transicionales presentaron un incremento en los valores de escurrimiento, lo cual se explica por el incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos y agricultura, que se asocia principalmente a esas formas de relieve. Por último se observó que en ambos años en las formas de relieve de las zonas bajas de la cuenca existe fuerte presión sobre el recurso hídrico lo cual repercute en el deterioro del Lago de Cuitzeo principalmente por la contaminación y reducción del suministro de agua.

Mendoza *et al*, (2004a) mediante un inventario y análisis espacial de la erosión de la cuenca del Lago de Cuitzeo delimitaron la distribución de la erosión en cárcavas para los años 1975 y 2000. La evaluación se llevo a cabo a nivel de subcuenca y municipio. Demostraron que la erosión en cárcavas ocupó en 1975 una superficie de 8.8 km² (0.22%) de la cuenca, y se incremento a 15.3 km² (0.38%) en 2000. Se observó que la erosión es un problema localizado en tres subcuencas de los alrededores de la Ciudad de Morelia (Arroyo Colorado, Atécuaro y San Lucas Pío) que pertenecen a dos municipios (Huiramba y Morelia), la erosión se localiza preferentemente sobre depósitos superficiales (41%), ignimbritas (13%), volcanes monogenéticos (10%) y conos andesíticos (9%), Los suelos en los que se desarrolla la erosión por cárcavas son los Acrisoles (55%), Vertisoles (13%), Luvisoles (11%) y Planosoles (9%). Por último se realizó una estimación potencial de la superficie susceptible de la cuenca a ser erosionada en cárcavas, a partir de los datos del inventario y uso intensivo de herramientas de SIG y conocimiento geomorfológico.

Mendoza *et al*, (2006) llevaron a cabo un estudio sobre los cambios en el área que ocupa la superficie de agua del Lago de Cuitzeo durante el periodo de 1974-2001. La investigación se basó en el uso de técnicas de PR y SIG. En este trabajo se interpretaron imágenes de satélite de alta resolución, con intención de analizar el periodo 1974-2000; e información de imágenes de satélite de baja resolución para el periodo 1997-2001. El análisis a largo plazo (1974-2000) indicó que hubo cambios temporales en la superficie ocupada por el Lago de Cuitzeo y que estos cambios están relacionados a fluctuaciones en las precipitaciones y temperaturas ocurridos en el año inmediato anterior. El monitoreo a corto plazo (1997-2001) demostró que la superficie del Lago de Cuitzeo está disminuyendo. Los autores concluyeron que la desecación anual es recurrente, particularmente en la parte Oeste del Lago. Los resultados sugieren que este comportamiento era probablemente debido a un periodo de sequía en la cuenca que comenzó a mediados de 90s. Se construyeron modelos de regresión constituidos con la información a largo plazo y se mostró que las fluctuaciones del nivel del Lago pueden ser estimadas a partir de la precipitación media anual y de temperatura media anual de años anteriores.

Reyes (2005) realizó un trabajo en las subcuencas de San Marcos, Queréndaro y Umécuaro. Elaboró el diseño y construcción de la estructuras de protección de equipos automáticos hidrometeorológicos para el monitoreo y levantamiento de datos. Adicionalmente se configuró los equipos de monitoreo en las subcuencas mencionadas.

1.6. CONTENIDO DE TESIS

La tesis se divide en siete capítulos donde se analizan y describen cuestiones de dinámica hidrológica y climática en la cuenca del Lago de Cuitzeo, a partir de datos hidrometeorológicos y biofísicos, que a su vez se integraron y se definen sus interrelaciones.

En el capítulo dos se presenta una descripción de las características biofísicas de la cuenca del Lago de Cuitzeo. En el capítulo tres se lleva a cabo una revisión de las bases de datos cartográficos y el diseño de muestreo para la verificación de cartografía en campo. En el capítulo cuatro se elabora un mapa geopedológico para las subcuencas de San Marcos, Umécuaro y Queréndaro, mediante la integración de los mapas de tipos de rocas, relieve y suelos; posteriormente, se describe el mecanismo para la determinación de la capacidad de infiltración en campo para las subcuencas de San Marcos, Umécuaro y Queréndaro; enseguida se describe la forma en que se analizaron los datos y se realizaron las curvas de velocidad de infiltración. En el capítulo cinco se analizan los datos de las estaciones meteorológicas de la cuenca del Lago de Cuitzeo y de las estaciones hidrometeorológicas de las subcuencas de Queréndaro, San Marcos y Umécuaro. En el capítulo seis se realizó una caracterización y regionalización de la cuenca del Lago de Cuitzeo por medio de un análisis de multivariado utilizando datos biofísicos. En el capítulo siete se presentan las conclusiones generales. Finalmente, en el capítulo ocho se presentan las recomendaciones.

2. UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

La investigación se realizó dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo que presenta un área aproximada de 4000 km², específicamente se trabajó en tres subcuencas consideradas de referencia dentro de esta área debido a que no se pudieron monitorear varias subcuencas, se seleccionaron las siguientes subcuencas: San Marcos, con una superficie de 123 km², Umécuaro con una superficie de 80 km², y Queréndaro que tiene un área de 134 km² (Figura 1). La superficie total estudiada para las subcuencas de referencia es de 337 km².

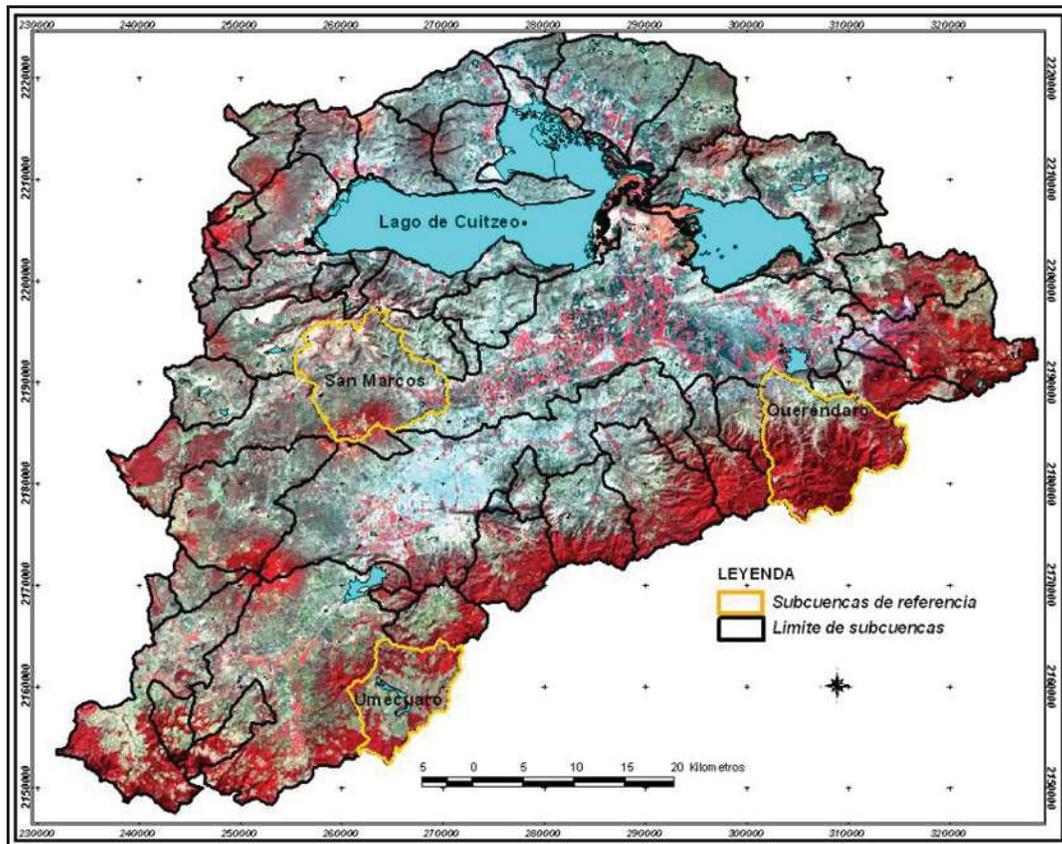


Figura 1. Ubicación del área de estudio

2.1. CLIMA

El clima predominante en la cuenca corresponde al templado con lluvias en verano, aunque la cuenca se encuentra principalmente en una zona transicional entre tres tipos de climas, la parte SE y SO presenta un clima templado húmedo, mientras que en la parte centro y NE y NO tenemos un clima templado seco. La precipitación media anual en la cuenca es de 841.9mm, pero es muy variable (Desv. Est.= 190.41 mm,

C.V.= 22.6). La temperatura media anual es de 17.3°C (Desv. Est. = 1.4°C, C. V. = 8). El análisis de series de tiempo indicó tres periodos relativamente secos, de 1940 a 1960, de 1980 a 1990 y de 1995 a 2000 (Mendoza 2002).

Los tipos de clima que se encuentran presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo corresponde a cuatro, de los cuales el más representativo es el C(w1) que cubre el 38% de la cuenca; se encuentra presente en la parte centro de la cuenca de EO, del centro al NO. El clima de tipo C(wo) cubre 36% y se encuentra presente en la parte NO de la cuenca; el clima tipo C(w2) cubre 23% de la cuenca y se encuentra presente en la parte con mayor altitud de la cuenca, parte sur y SO (Figura 2).

2.2. GEOLOGÍA

La cuenca del Lago de Cuitzeo, junto con la depresión de Chapala conforma la depresión lacustre Cuitzeo-Chapala, la cual se caracteriza por su geometría y estilo de fallamiento (Garduño *et al.*, 1999). El borde sur de la depresión de Cuitzeo se ubica en el Estado de Michoacán y al norte en Guanajuato. Todos los elementos en la cuenca están delimitados por fallas NE-SO y E-O que conforman semigrabens basculados hacia el sur (Ferrai, *et al.*, 1994; Israde, *et al.*, 2002).

Los principales tipos litológicos presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo son: 983 km² (24%) se encuentra cubierto por depósitos superficiales, los cuales abundan en la parte norte y sur del Lago de Cuitzeo y en la parte SO de la cuenca existe la presencia de estos materiales. Los conos de lava 447 km² (12%) los cuales se encuentran en la parte NO y SO. Las ignimbritas cubren una superficie de 353 km² (9%), estas rocas se encuentran presentes en la parte NO, N y NO de la cuenca, conos andesíticos 332 Km² (9%), volcanes monogenéticos 301 km² (8%), basaltos y dacitas 294 km² (8%) (Figuras 3 y 4).

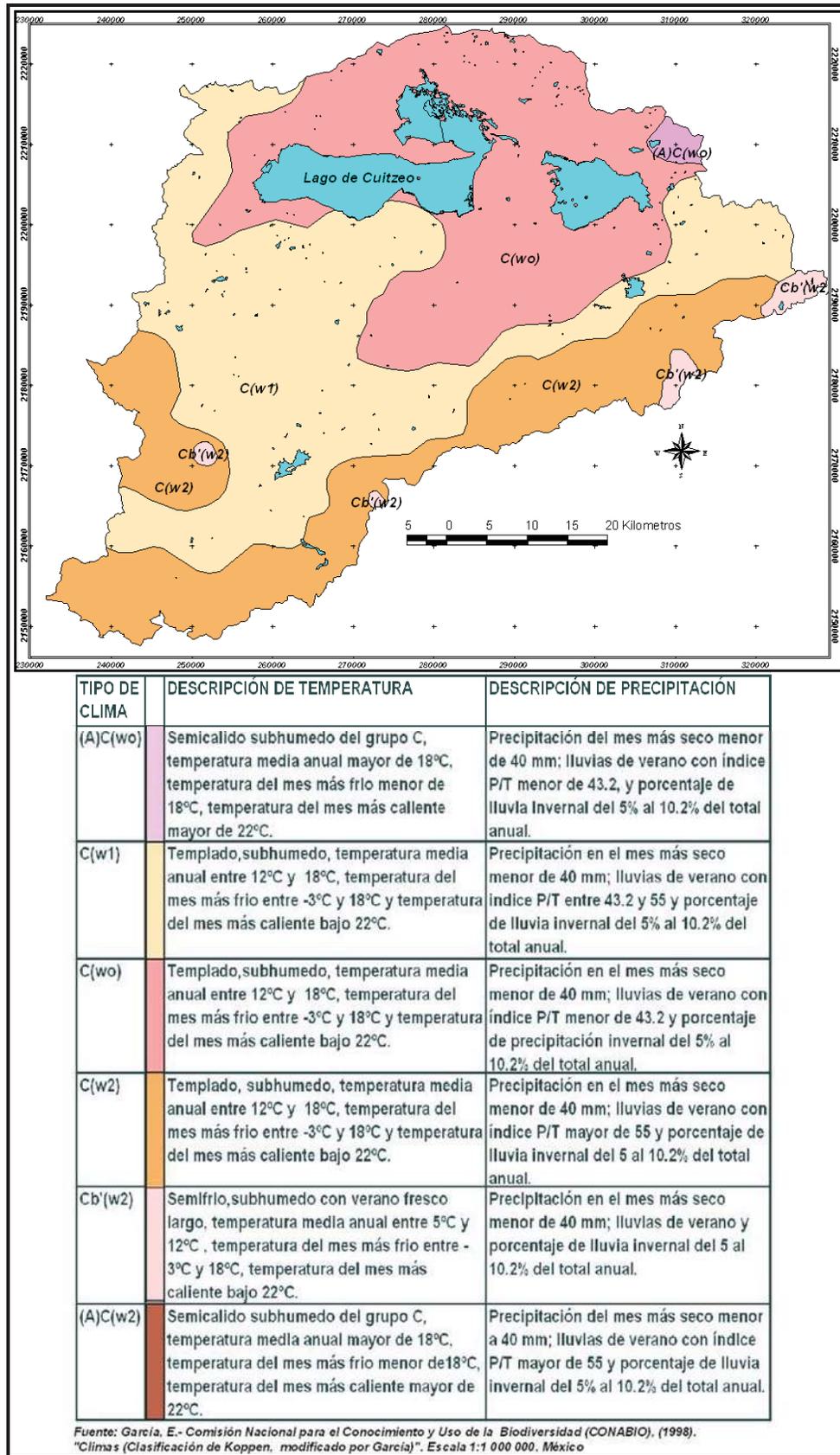


Figura 2. Tipos de climas presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

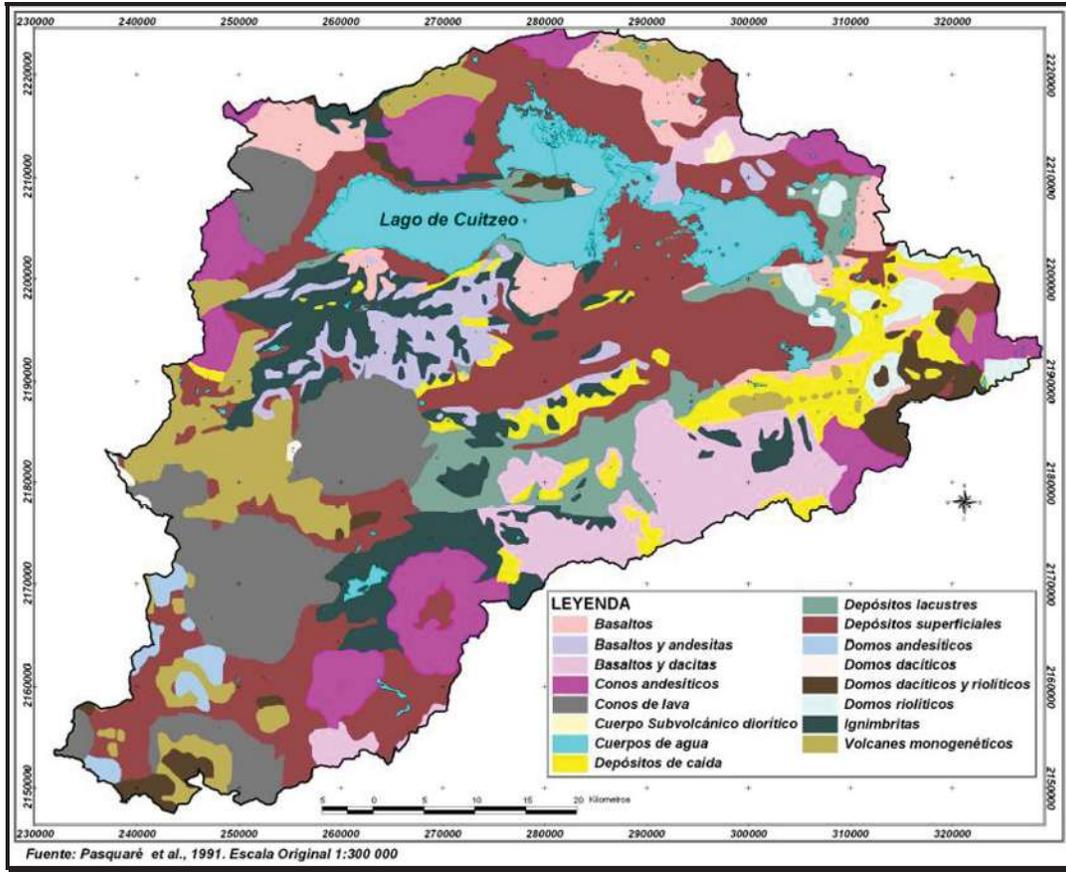


Figura 3. Mapa litológico generalizado de la cuenca del Lago de Cuitzeo

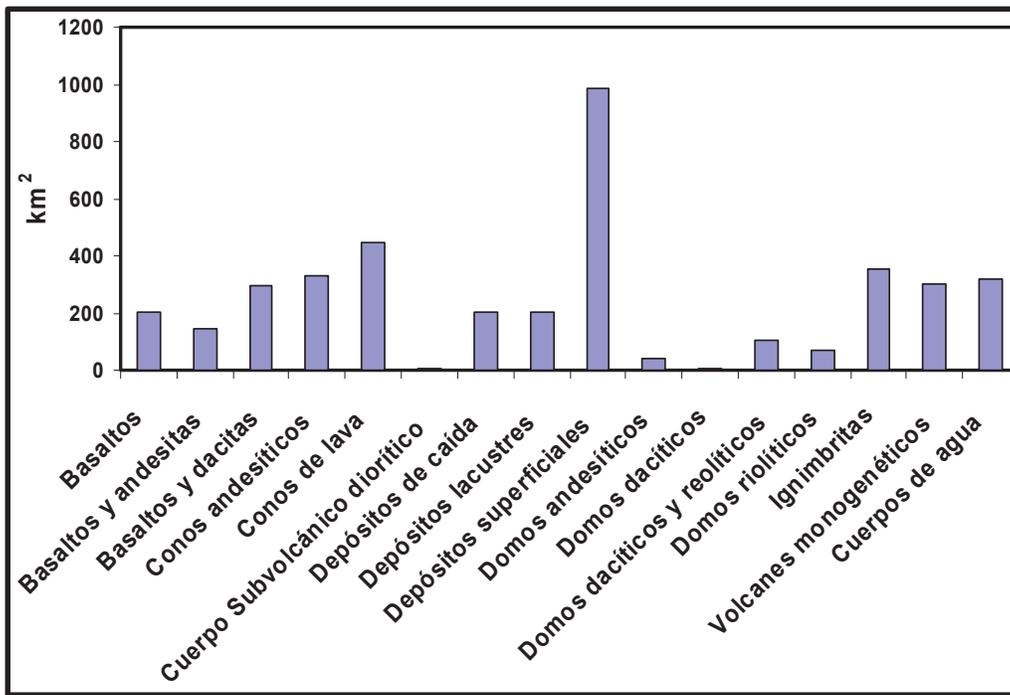


Figura 4. Porcentajes de las diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo

2.3. HIDROGRAFÍA

El patrón de drenaje en la porción elevada de la cuenca es de dendrítico a subdendrítico; la mayor densidad de escurrimiento se localiza hacia la porción mas alta de la cuenca, al sur de la misma; en la porción centro se desarrolla un patrón de drenaje escaso, la corriente principal que drena en la cuenca es el Río Grande de Morelia que fluye de SO a NE, el cual cuando llega a la parte plana de la cuenca se rectifica dando lugar a una serie de canales de riego y drenaje; en este sector el drenaje se encuentra muy alterado por la actividad agrícola de riego. La parte norte de la cuenca presenta un drenaje poco desarrollado (Figura 5).

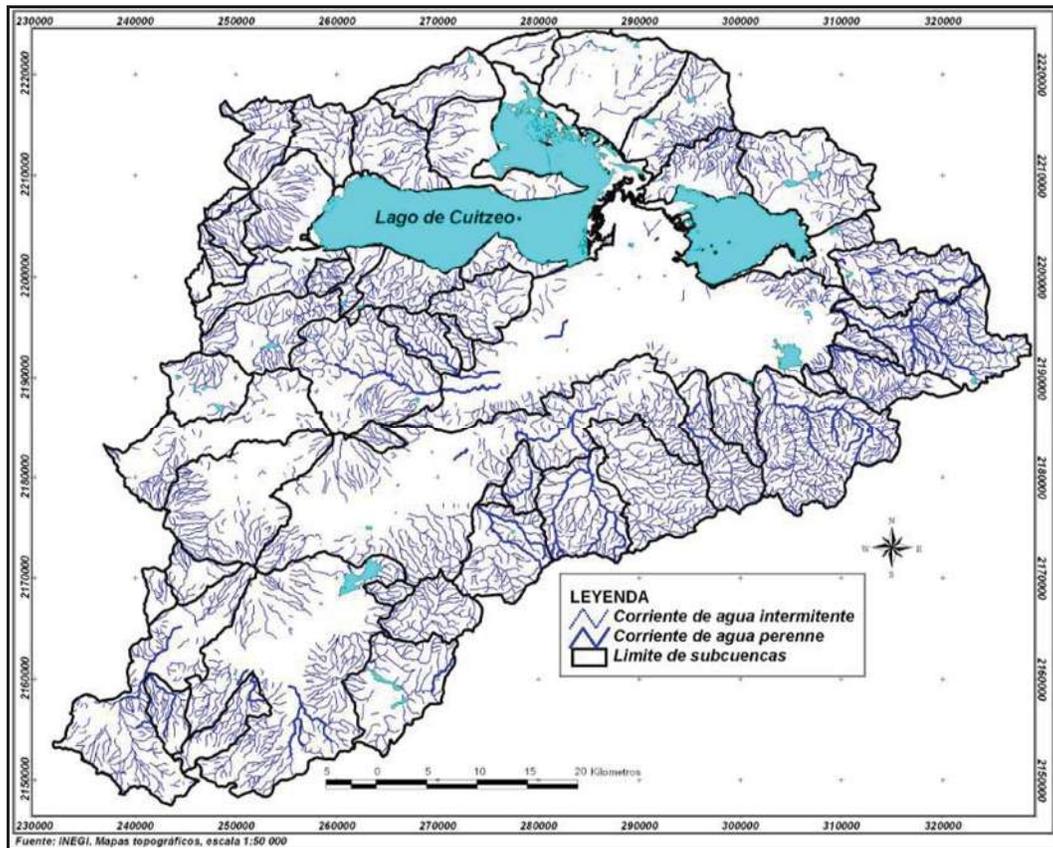


Figura 5. Escurrimientos y subcuencas de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

2.4. SUELOS

En la cuenca se presentan 11 diferentes tipos de suelos (Figura 6 y 7). Los suelos principales fueron los Vertisoles que cubren un área de 1355 km² (34%); Luvisoles, 694 km² (17%); Andosoles 462 km² (12%), Acrisoles, 412 km² (10%), y Phaeozems, 401 km² 10% cada uno. Los otros tipos de suelo cubren un área muy pequeña de la cuenca (Figuras 6 y 7).

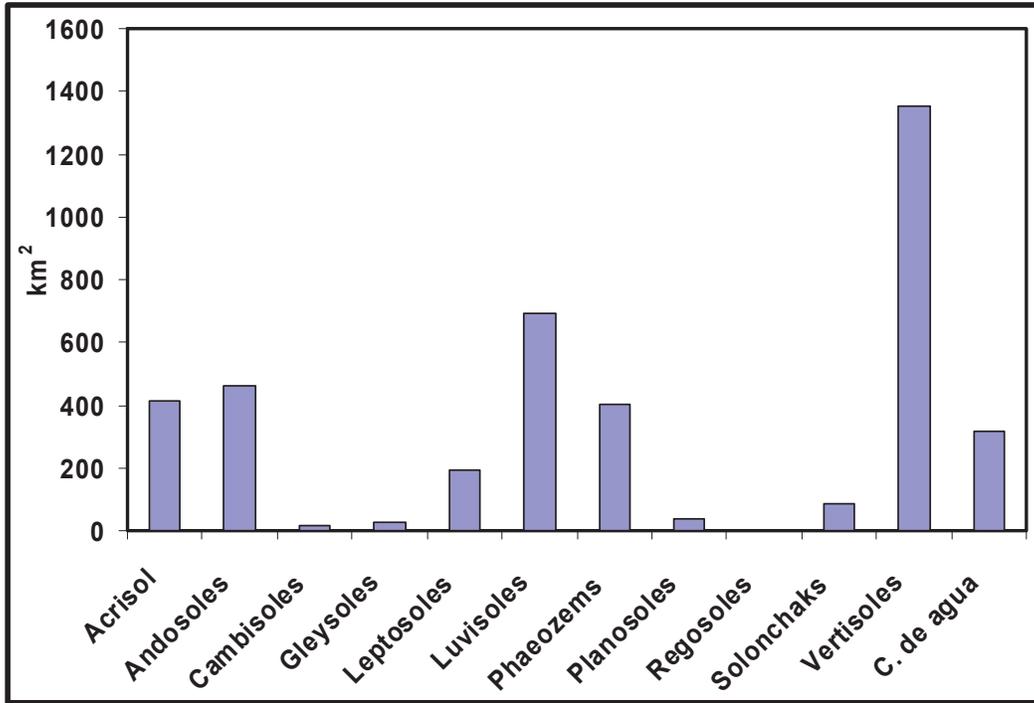


Figura 6. Porcentaje que cubren los diferentes tipos de suelos

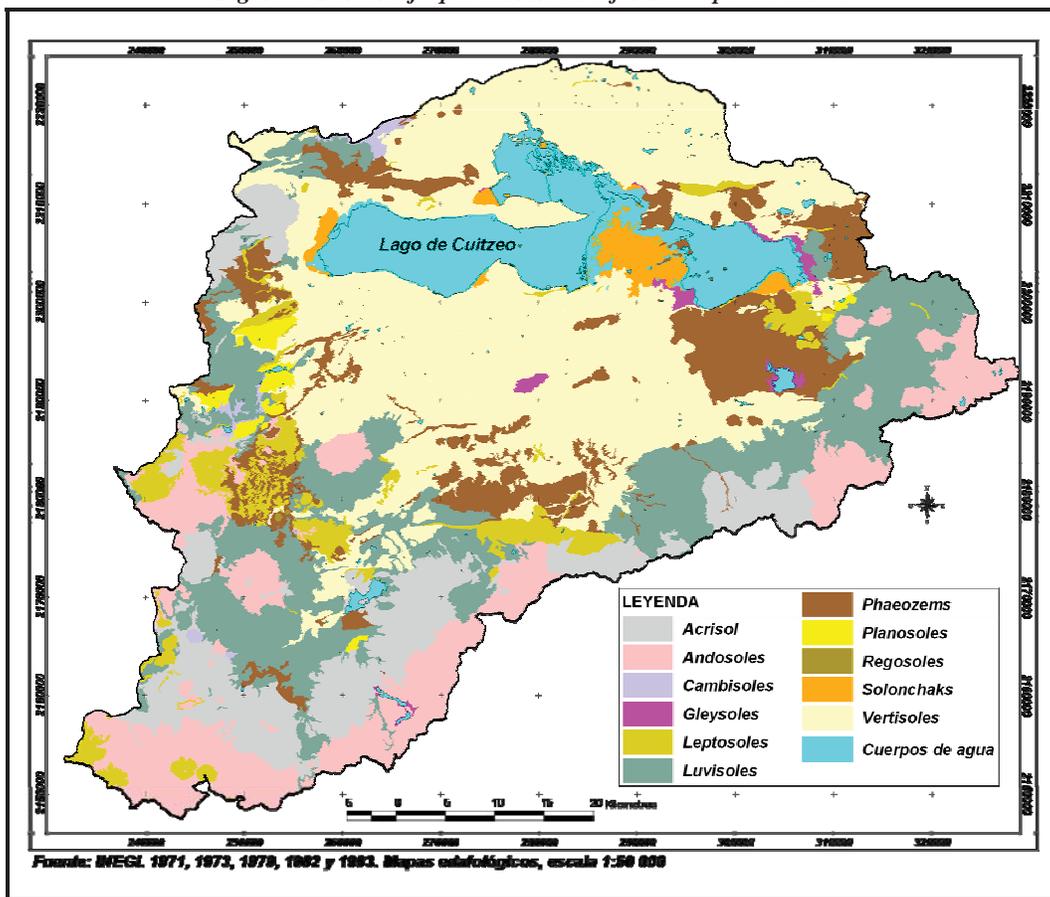


Figura 7. Mapa generalizado de suelos de la cuenca del Lago de Cuitzeo

Los suelos más importantes por el área fueron los Vertisoles, se encuentran en la parte centro y norte de la cuenca que es donde se desarrolla fuertemente la agricultura. Los Luvisoles se encuentran en la parte SO de la cuenca y en la parte centro-oeste de la cuenca, estos suelos se encuentran en la parte de cambio de cobertura de matorral a bosque. Las texturas predominantes son las finas. Las fases físicas predominantes son la pedregosa y la lítica, debido al carácter geológico (INEGI., 1971, 1973, 1979, 1982 y 1983).

2.5. PENDIENTE

En este trabajo se elaboró un mapa de clases de pendiente; se clasificó en cuatro clases (Figura 8), la pendiente que más predomina es de 3-10° (35%), la cual se presenta básicamente en toda la cuenca. La clase de 0-3° cubre el 31% de la cuenca y se presenta en la parte centro de la cuenca, principalmente en la planicie. La clase de 10-25° cubre el 27% de la cuenca las pendientes mas fuertes se encuentran principalmente en la parte SE y E de la cuenca (Figura 8).

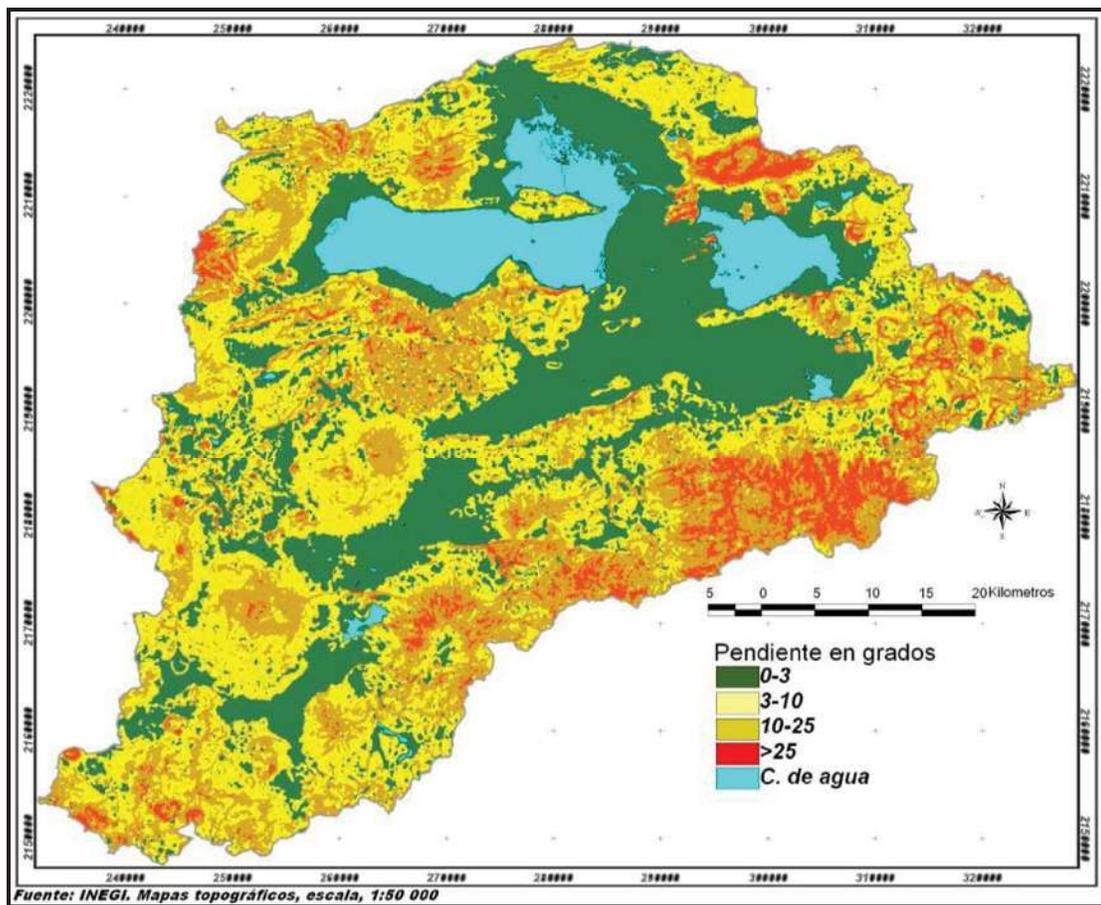


Figura 8. Mapa de pendientes de la cuenca del Lago de Cuitzeo

2.6. DENSIDAD DE LA DISECCIÓN

El mapa de densidad de la disección desarrollado en este trabajo fue clasificado en tres clases, la principal es de 0-3 km/km², la cual coincide en su mayor parte con las planicies. La clase con la mayor densidad de disección (>2km/km²) coincide con las áreas con pendientes más pronunciadas (montaña) y con coberturas vegetales más conservadas, que pertenecen a los bosques de pino-encino, encino-pino (Figura 9).

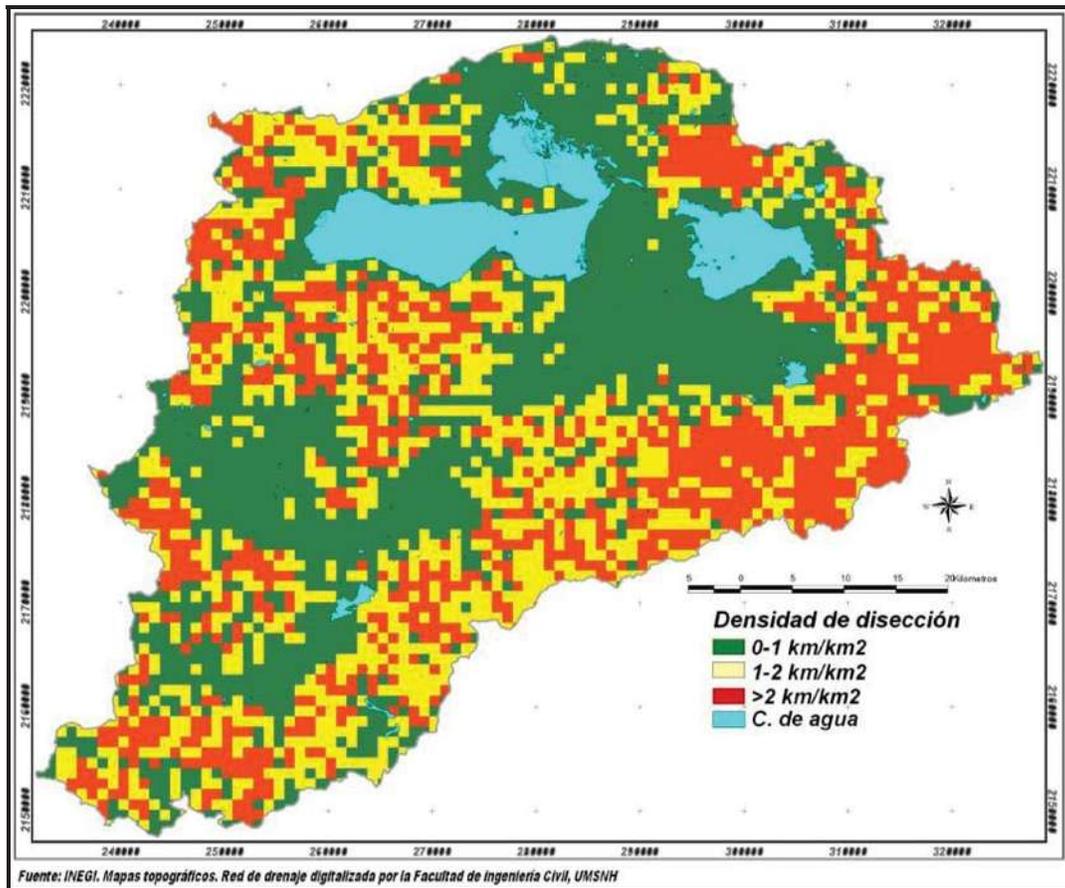


Figura 9. Densidad de disección de la cuenca del Lago de Cuitzeo

2.7. ZONIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA.

En la cuenca del Lago de Cuitzeo se presentan seis tipos de unidades superiores de relieve o zonas los cuales son: montañas, lomeríos altos, lomeríos bajos, colinas, piedemonte y planicies. La clase que cubre más área corresponde a las colinas con una superficie de 943 km² (24%) de la cuenca (Figuras 10 y 11). Las colinas se ubican desde altitudes menores a los 1900 hasta los 2300 msnm., con pendientes menores de 3° hasta 20°; se desarrollan sobre depósitos superficiales del reciente, volcanes monogenéticos

del Holoceno-Pleistoceno y depósitos de caída de diferentes épocas pertenecientes al Cuaternario.

Los lomeríos altos cubren un área de 899 km² (22%). Se ubican entre los 2100 y 2,500 msnm, sus pendientes van desde los 6° y los 20°; se desarrollan sobre ignimbritas, conos de lava y cenizas de composición andesítica y basáltica (Figuras 10 y 11).

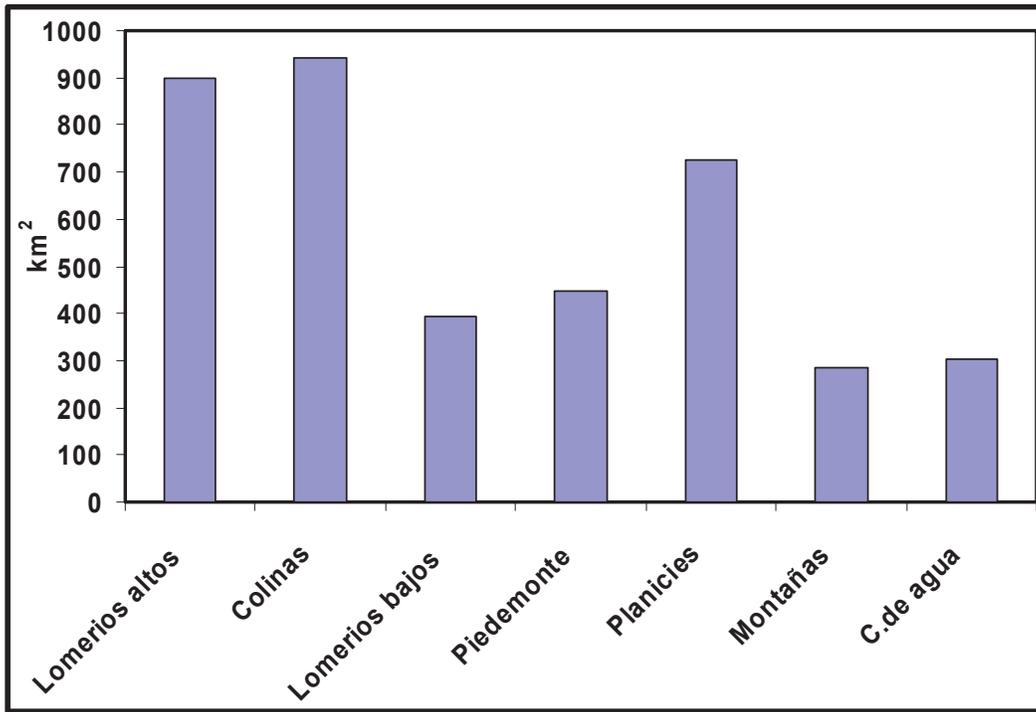


Figura 10. Unidades de relieve generalizadas presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Las planicies cubren 727 km² (18%) de la cuenca del Lago de Cuitzeo, se caracterizan por encontrarse en altitudes menores a los 1900 msnm y presentan pendientes menores a los 3°. La mayor parte de las planicies se localizan en la parte centro y norte de la cuenca (Figuras 10 y 11).

Los piedemontes cubren un área de 449 km² (11.3%) de la cuenca (Figura 10), su altitud dentro de la cuenca varía de los 1,900 a los 2,500 msnm., con pendientes menores a los 10°. Los piedemontes se localizan en la parte SO de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura 10), los cuales se conforman principalmente por conos de lava y cenizas del Pleistoceno y depósitos superficiales del reciente.

Los lomeríos bajos cubren un área de 393 km² (9.8%, Figura 10), principalmente se ubican en la parte NE y en la SO de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura 10). Los lomeríos bajos se presentan en altitudes entre los 1,900 a 2,700 msnm, con pendientes

entre 6° y 20°, y se desarrollan sobre conos andesíticos, de lava y cenizas, derrames de basaltos, domos dacíticos y riolíticos, y depósitos superficiales (Mendoza 2002).

Las montañas cubren un área de 287 km² (7%, Figura 10) presentan alturas que van desde los 2,100 hasta los 2,900 msnm, con pendientes de 6° hasta mayores de 30°. Las montañas se encuentran flujos de lava basáltica y andesíticos, conos de lava, cenizas, derrames andesíticos, y conos dacíticos y riolíticos.

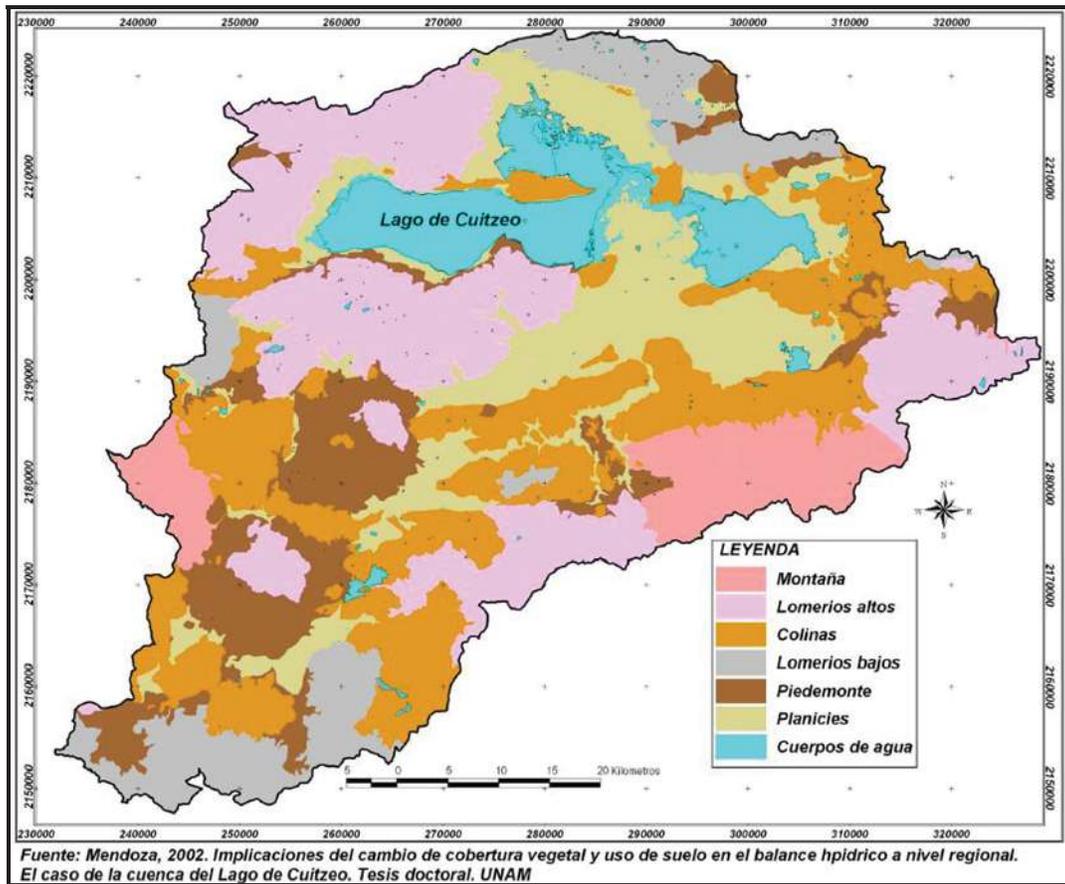


Figura 11. Mapa de zonificación geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo

2.8. COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO.

Las clases predominantes de cobertura vegetal y uso de suelo para el año 2000 fueron los cultivos con un área de 1,287 km² (32.1%, Figura 12), de los cuales 789 km² (20%) correspondieron a cultivos de temporal y el resto a cultivos de riego, los bosques cubren 798 km² (20%) de la cuenca, aunque la mayor parte de bosque se presenta en la parte S, SE y SO de la cuenca, principalmente en las partes de mayor altitud (Figuras 12 y 13) (López, *et al.*, 2006).

El matorral pastizal cubrió un área de 637 km² (16%) el cual se concentró en la parte centro-oeste y NO de la cuenca principalmente. El matorral cubrió un área de 332 km² (8.3%) de la cuenca del Lago de Cuitzeo, este tipo de cobertura vegetal se encontró principalmente en la parte NE y NO de la cuenca. Los pastizales cubrieron un área de 233 km² (5.8%), se encontró distribuido principalmente en la parte centro-oeste de la cuenca (Figura 12 y 13) (López, *et al* 2006).

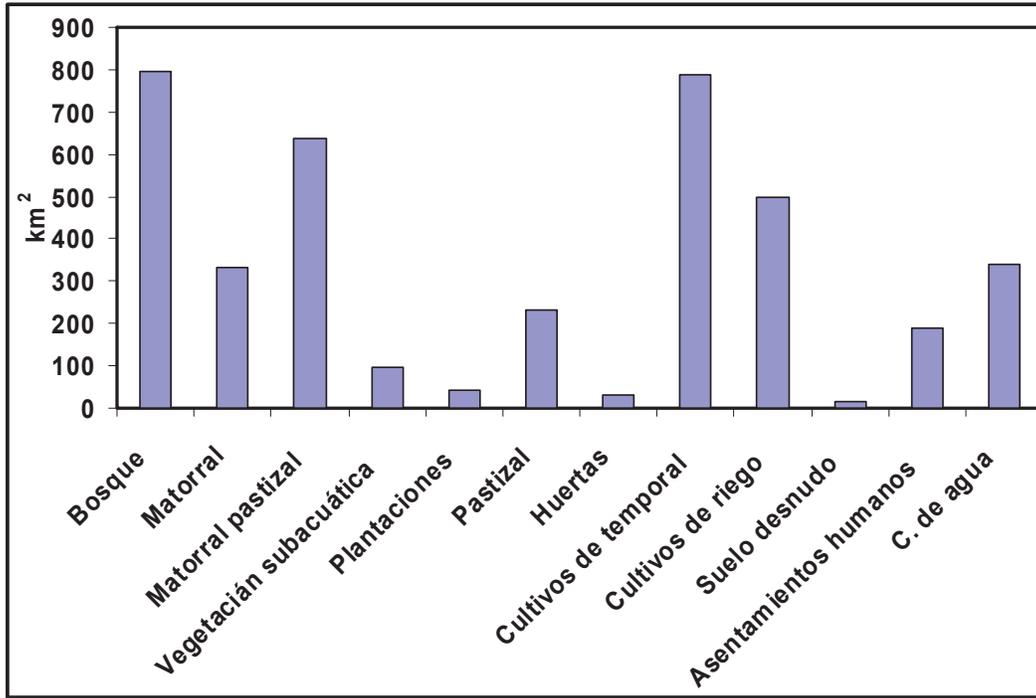


Figura 12. Tipos de cobertura vegetal y uso de suelo de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

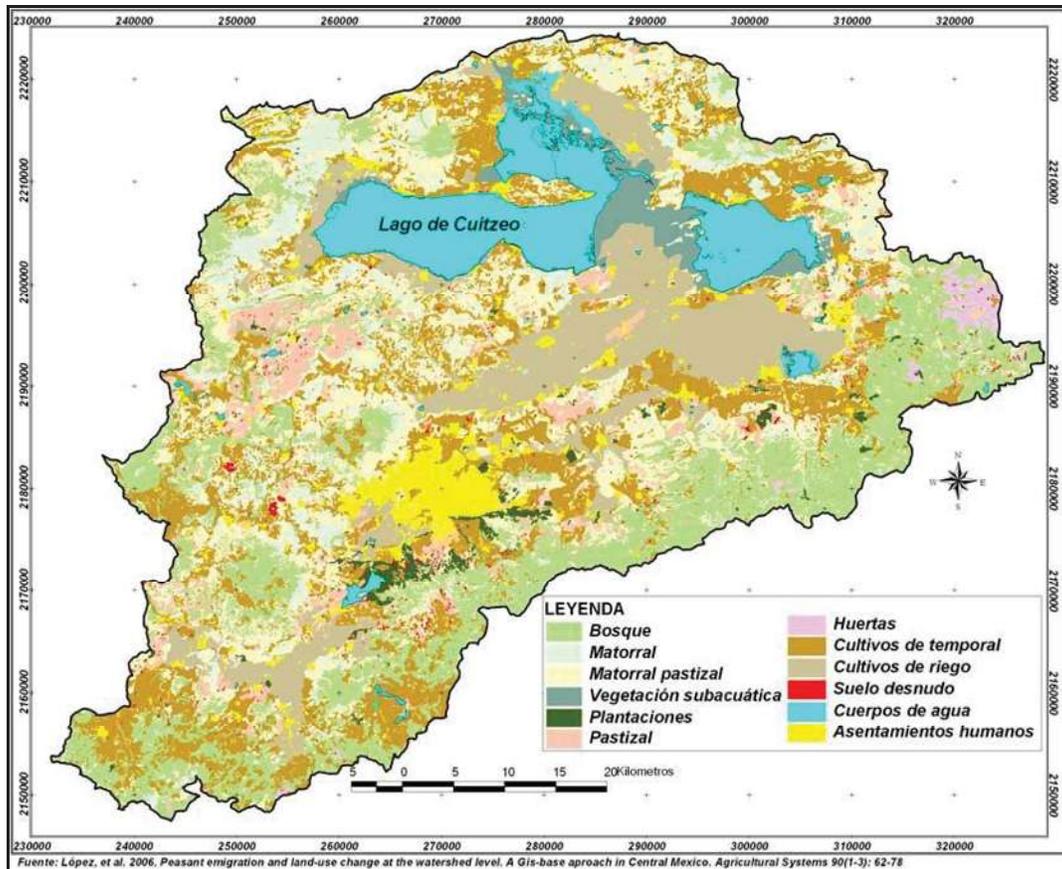


Figura 13. Cobertura vegetal y uso de suelo generalizado

2.9. CONCLUSIONES

En la cuenca del Lago de Cuitzeo predomina el clima templado subhúmedo, con lluvias en verano, la precipitación media anual es de 765 mm, el mes más seco es menor a 40 mm; la temperatura media va de los 12.5 a 18.5 °C. Los tipos litológicos principales son los depósitos superficiales que se encuentran en la parte de la planicie y al SO, en la parte de planicie se encuentra cubierta por suelos de tipo Vertisol con pendientes menores de 3° y una densidad de disección baja, teniendo un uso de suelo para la actividad agrícola de riego y temporal. En la parte SO se encuentran lomeros bajos cubiertos por suelos Andosoles y una cobertura vegetal y uso de suelo forestal y agrícola de temporal, las pendientes van de 3 a 25°.

Otro tipo importante de litología es de conos de lava en piedemontes que se encuentran en la parte de SO de la cuenca, sobre los cuales se encuentran suelos Andosol y Luvisol, con una cobertura vegetal de bosque y matorral, las pendientes van de los 3 a 25°. En la parte S y SO de la cuenca se encuentran ignimbritas en colinas y

lomeríos altos, sobre las cuales se desarrollan Acrisoles y Vertisoles, con coberturas de bosque, matorral y agricultura.

El patrón de drenaje es de dendrítico a subdendrítico, en la parte elevada se desarrolla una alta densidad de drenaje que corresponde a la parte S, SE y SO. Mientras que en la parte de la planicie se encuentra rectificado para canales que se utilizan para riego principalmente. Mientras que en la parte N se tiene un patrón de drenaje poco desarrollado.

2.10. BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado D. J., T. Zubieta., R. Ortega., Chacón A y R. Espinoza. 1994. *Hipertroficación en un Lago Tropical Somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México). Deterioro Ambiental de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.* En; Monografía del Foro de Análisis de la Problemática Ambiental del Estado de Michoacán. Comisión de Ecología del H. Congreso de Michoacán LXVI Legislatura y Facultad de Biología, U.M.SN.H. México. 19-33.
2. Ando, Y, 1990. *Regionalization of Parameters Using Basin Geology, Land Use, and Soil Type for Use in a Storm Rainfall-Runoff Relationship.* IN: Regionalization in Hydrology. IAHS Publication No. 191. International Association of Hydrological Sciences, Washington, DC. p 211-218.
3. Ayoade, J.O., 1976. *On the use of multivariate techniques in climatic classification and regionalization.* Theoretical and Applied Climatology 24 (4): 257 – 267.
4. Baeriswy, P. A. y M. Rebetz, 1997. *Regionalization of precipitation in Switzerland by means of principal component analysis.* Theoretical and Applied Climatology 58 (1-2): 31- 41.
5. Bastiaanssen, G.M., Chemin, Y., Ahmad, M.D., Ali, S., Asif, S., and Prathapar, S.A., 1999. *Patterns of crop evaporation in the Indus Basin recognized from NOAA-AVHRR satellite.* In: 17th ICID conference, Lausanne, Switzerland, September 1999.
6. Bastiaanssen, W.G.M., 2000a. *Shared water resources information from space. New management opportunities or unwanted interference?.* Department of Water Resources and Environmental Studies, ITC.
7. Bastiaanssen, G.M., 2000b. *SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey.* Journal of Hydrology 229: 87-100.

8. Baumgartner, M.F., G.M. Apfl, 1996. *Remote sensing and geographic information systems*. International Journal of Remote Sensing 41(4): 593-607.
9. Brunt, B.M. 1995. Regions and Western Europe, Journal of Geography, Vol. 94., No. 1, Texas University, 306-316.
10. Buchtele, J., A. HERRMANN, F. Maraga y O.R. Bajracharya, 1998. *Simulation of effects of land-use changes on runoff and evapotranspiration*. Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters. IAHS Publication No. 248: 99-106.
11. Carlson, T.N., S. Traci Artur, 2000. *The impact of land use – land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective*. Global and Planetary Change (25), 1-2: 49-65.
12. Chávez C.A., 1994. *Impacto Ambiental en la Cuenca del Lago de Cuitzeo; El deterioro ambiental en la cuenca del Lago de Cuitzeo*. En; Monografía del Foro de Análisis de la Problemática Ambiental del Estado de Michoacán. Comisión de Ecología del H. Congreso de Michoacán LXVI Legislatura y Facultad de Biología, U.M.SN.H. México. 3-5.
13. Chiang, S.M., T.K. Tsay, y S.J. Nix, 2002a. *Hydrologic Regionalization of Watersheds. I: Methodology Development*. Journal of Water Resources Planning and Management 28 (1): 3-11.
14. Chiang, S., T.K. Say, y S. J. Nix, 2002b. *Hydrologic Regionalization of Watersheds. II: Applications*. Journal of Water Resources Planning and Management 28 (1): 12-20.
15. Comrie, A.C. y E. Glenn, 1998. *Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability*. Climate Research Vol. 10: 201–215.
16. CONABIO (*Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*) *Regiones hidrológicas Prioritarias*.
<http://www.conabio.gob.mx/rphidrologicas/PRESENTACION.html>.
17. Dunne, T. y L.B. Leopold, 1978. *Water y Environmental Planning*. W. H. Freeman and Co., San Francisco.
18. Eichen, M A., 1989. *Regions as Classification in the Science of Geography*. Social Science Record, v26 n1 p7-8

19. Elkaduwa, W. K. B. y R. Sakthivadivel, 1998. *Use of historical data as a decision support tool in Watershed manegement: A case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka*. Report 26. Colombo, Sri. Lanka : International Water Management Institute.
20. Fahey, B.D. y Jackson, R.J. 1997. *Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South island, New Zealand*. Agriculture and Forest Meteorology 84: 69-82
21. Ferrari L., Garduño V.H., Pasquaré G. and Tibaldi A., 1994. *Volcanic and tectonic evolution of Central México: Oligocene to Present*. Geofísica International 3: 91-105.
22. Fohrer, N., S. Haverkamp, K. Eckhardt and H. G. Frede. 2002. *Hydrologic response to land use changes on the Catchment Scale*. Physics and Chemistry of the Earth (B), 26, (7-8): 577-582.
23. Garduño M. V. H., Corona C.P., Israde A. I., Mennella L., Arreygue, E., Bigioggero B. y Chiesa S. 1999. *Carta Geológica del Estado de Michoacán, escala 1:250 000*. UMSNH, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas; Dpto. de Geología y Mineralogía. Morelia Michoacán.
24. Hagget, P. 1977. *Geography. A Modern Synthesis*. Harper, N.Y., Evanston, San Francisco, London.
25. Hall, O., 2000. *Rediscovering Regionalization. A regionalization Method for Landscape Monitoring*. PhD Project, Estocolmo University. 12pp
26. Hartshorne, 1939. *The Nature of Geography*. Annals of the AAG, Vol. 29.
27. Israde A. I., Garduño, V.H and Ortega M. R. 2002. Paleambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el Centro del Lago de Cuitzeo. Hidrobiológica 12(1), 61-78.
28. Jain, A., S. C. Rai y E. Sharma, 2000. *Hydro-ecological analysis of a sacred lake watershed system in relation to land-use cover change from Sikkim Himalaya*. Catena 4 : 263-278.
29. López E. M., G. Bocco., M. Mendoza y E. Duhau. 2001. *Prediction land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico*. Landcape and Urban Planning 55:271-285.
30. López G. E. y Bocco G. 2001. *Cambio de cobertura vegeta y uso del suelo*. en: Mendoza, M.E., López-Granados, E. y G. Bocco, 2001. Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial. Informe Final

presentado al Programa SIMORELOS CONACyT. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM.

31. López E. M., Mendoza M., G. Bocco. 2004. *Cambio de cobertura vegetal y uso de terreno en la Ciudad de Morelia y sus alrededores*. En Garduño M.V. (Edit). Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Depto. De Geología. pp. 106-115.
32. López G. E., G. Bocco M. E. Mendoza, A. Velázquez y R. Aguirre, 2006. *Peasant emigration and land-use change at the watershed level. A GIS-based approach in Central Mexico*. Agricultural Systems 90 (1-3): 62-78
33. Lorup, J.K., Refsgaard, J.C. and Mazvimavi, D., 1998. *Assessing the effect of land changes on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe*. J. Hydrol, 205: 147-163.
34. Magas, Damir, 2003. Contemporary aspects of the geographical regionalization and administrative-territorial organization of Croatia. Geoadria Volumen 8/1 127-147
35. McDonell, R.A. 1996. *Including the spatial dimension: using the spatial information system in hydrology*. Progress in Physical Geography 20 (2): 159-177.
36. Mendoza, .M. E. 2002. *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica.
37. Mendoza M.E., G. Bocco, Bravo M., Siebe C y Ortiz M. 2002a. *Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 47, pp.36-58.
38. Mendoza M.E., E. López., G. Bocco. 2004. *Evaluación del efecto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico de grandes cuencas. El caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán México*. En Garduño Monroy, V. (Ed.). Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Depto. De Geología. pp. 67-79.

39. Mendoza M. E., E. López, G. Bocco. 2004a. *Erosión en la cuenca del Lago de Cuitzeo un análisis espacial a nivel regional*. En Garduño M.V. (Ed.). Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Depto. De Geología. pp. 80-88
40. Mendoza M. E., G. Bocco, M. Bravo, E. López and W.R. Osterkamp. 2006. *Predicting Water-Surface Fluctuation of Continental Lakes: A RS and GIS Based Approach in Central Mexico*. Water Resources Management. 1-21.
41. Olsson, L. y P. Pilesjo. 1999. *Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment*. ITC Short Course of Environmental.
42. Paasi, A. 1986. *The institutionalization of regions: a theoretical framework for understanding the emergence of region and the constitution of regional identity, Fennia*. 164, 1, Helsinki, 105-145.
43. Pasquaré, G., L Ferrari, V.H. Garduño, A. Tibaldi y L. Vezzoli, 1991. *Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México*. Map and Chart Series MCH072. Geological Society of America.
44. Rao, A.R. y V.V. Srinivas, 2006a. *Regionalization of watersheds by hybrid-Conglomeration analysis*. Journal of Hydrology 318: 37-56.
45. Rao, A.R. y V.V. Srinivas, 2006b. *Regionalization of watersheds by fuzzy-Conglomeration analysis*. Journal of Hydrology 318: 57-79.
46. Renschler, C.S., T. Cochrane, J. Harbor y B. Diekkrüger, 2001. *Regionalization methods for watershed management - hydrology and soil erosion from point to regional scales*. In: Stott, D.E. R.H. Mohtar y G.C. Steinhart (eds.), Sustaining the global farm. Selected papers from the 100th International Soil Conservation Organization Meeting, Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion research Laboratory.
47. Reyes E. M. 2005. *Mediciones hidrológicas en las cuencas de Queréndaro, Umécuaro y Tarimbaro*. Tesis de licenciatura, Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, UMSNH.
48. Romero M. V., Pompa L.I.Y. y Valdivia C.M. 2001. *Ambiente y Uso del Suelo en la Cuenca del Lago de Cuitzeo*. Taller de Consenso Sobre la Problemática

- del Lago de Cuitzeo. Facultad de Biología, UMSNH, CIPAMEX y FMCN. México.
49. Rubiano M, J. 1998. *Hydrological Impact of Land Use Change in Tropical Hillsides: the Impact of patterns*. This dissertation is submitted as part of an MSC degree in Geography at king's collage London
 50. Sahagian, D., 2000. *Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations : sea level and water redistribution*. Global and Planetary Change 25 (1-2): 39-48.
 51. Simo, E. 1986. *Physicogeographic and Hydrological Regionalization--the Basic Precondition for the Extension of the Areal Validity of Existing Hydrological Information IN: Integrated Design of Hydrological Networks*. IAHS Publication No. 158, 1986. p 343-349.
 52. Speelman L. 2003. *Estimation of flow Characteristics of Ungauged Catchments: Case Study in Zimbabwe*. Thesis of Doctor. ITC, Enschede.
 53. Taniguchi, A. 1997. *Perspectives of ecological studies in the polar oceans*. Gakujutsu Geppo (Japan Science Monthly), 50: 454-458.
 54. Vandewiele, G.L., Xu, C.Y. y Huybrechts, W., 1991. *Regionalization of Physically-based Water Balance Models in Belgium-Application to Un-gauged Catchments Water Resources Management*. 5: p199-208.
 55. Vörösmarty, C.J., C.A. Federer and A. Schloss. 1998. *Potential evaporation functions compared on U.S. watersheds: Implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modelling*. J. of Hydrology, 207: 147-69.
 56. Whittlesey, D., 1954. The Regional Concept and the Regional Method, Chapter II, in American Geography, Inventory and Prospects, Syracuse, 19-68.
 57. Xu, C., Y. 1999. *Estimation of parameters of a conceptual water balance model for ungauged catchments*. Water Resources Management 13 (5): 353-368.
 58. Zhang L., Walker Glen., and Dawes W. 2002. *Water balance modelling: concepts and applications*. In: McVicar, T.R., Li Rui, Walker, J., and Du Changming (Eds). Regional Water and Soil Assessment for Managing Sustainable Agriculture in China and Australia, ACIAR Monography 84: 31-47.

2.11. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS

59. INEGI. 1971. Carta de edafología. **Puruandiro**. F14 C82, escala 1:50,000
60. INEGI. 1972. Carta de edafología. **Acámbaro**. F14 C84, escala 1:50,000
61. INEGI. 1973. Carta de edafología. **Moroleón**. F14 C83, escala 1:50,000
62. INEGI. 1979. Carta de edafología. **Cuitzeo**. E14 A13, escala 1:50,000
63. INEGI. 1979. Carta de edafología. **Morelia**. E14 A23, escala 1:50,000
64. INEGI. 1979. Carta de edafología. **Pátzcuaro**. F14 C82, escala 1:50,000
65. INEGI. 1979. Carta de edafología. **Tzitzio**. E14 A24, escala 1:50,000
66. INEGI. 1979. Carta de edafología. **Villa Escalante**. E14 A32, escala 1:50,000
67. INEGI. 1979. Carta de edafología. **Zinapécuaro**. E14 A14, escala 1:50,000
68. INEGI. 1982. Carta de edafología. **Coeneo de la Libertad**. E14 A12, escala 1:50,000
69. INEGI. 1982. Carta de edafología. **Villa Madero**. E14 A33, escala 1:50,000
70. INEGI. 1983. Carta de edafología. **Maravatio**. E14 A15, escala 1:50,000

3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LAS SUBCUENCAS DE REFERENCIA: SAN MARCOS, QUERÉNDARO Y UMÉCUARO

3.1. INTRODUCCIÓN

La caracterización del objeto de estudio es la tarea inicial de toda investigación. Esta fase permite determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás (RAE); en este caso de los objetos geográficos. Lo anterior permite generar un primer modelo que describe las condiciones del sistema en estudio.

La verificación de datos es una actividad primordial debido a que los datos son los insumos del modelamiento espacial subsecuente. Sin embargo, en general, esta actividad no se realiza en muchos trabajos basados en el uso de SIG's. En cualquier disciplina, el científico debe tener una idea clara de la calidad y representatividad de los datos con los que se trabaja. Por tal motivo, el diseño y desarrollo del muestreo supone la columna vertebral del proceso de verificación de la calidad de los datos de entrada. Al igual que en otras aplicaciones, el muestreo espacial sirve para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de tal forma que sea suficientemente representativa del conjunto. Esa semejanza con la población de referencia debe conseguirse, además, minimizando el tamaño de la muestra, con objeto de reducir los costos del proceso de verificación. En definitiva, la principal virtud de un buen muestreo es seleccionar adecuadamente una parte del espacio a clasificar, de tal forma que, siendo tan pequeña como sea posible, sea a la vez suficientemente representativa del conjunto. Esa semejanza depende de una serie de factores, que debe considerarse al planificar el muestreo: 1) método de selección de la muestra, 2) tamaño y distribución, y 3) nivel de confianza otorgado a la estimación.

a. Tipos de muestreo

Entre los tres parámetros anteriormente enunciados, la elección del método más idóneo de muestreo parece ser el más controvertido entre los especialistas. Los esquemas regularmente empleados en el proceso de verificación son los de Rosenfeld, (1982); Campbell, (1987); Congalton, (1988); los cuales mencionan que:

1. **Aleatorio simple:** los elementos a verificar se eligen de tal forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados y que la elección de uno no influya en la del siguiente. Gracias a este carácter probabilístico, el muestreo

aleatorio es el más sólido estadísticamente, si bien presenta problemas en su aplicación espacial, por cuanto puede suponer elevados costos de desplazamiento. Por otra parte, existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial presente en la imagen clasificada.

2. **Aleatorio estratificado:** La muestra se realiza dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo a una variable auxiliar (altitud por ejemplo). Es más complejo de diseñar que el anterior, pero aporta información sobre subconjunto de la población, además de reducir el error de muestreo si la variable auxiliar se elige correctamente.
3. **Sistemático:** La muestra se distribuye a intervalos regulares, a partir de un punto de origen señalado aleatoriamente. Garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada (geometría de las parcelas por ejemplo). Por otro lado, no asegura una estimación probabilística, por cuanto no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones.
4. **Sistemático no alineado:** Modifica el esquema anterior, gracias a variar aleatoriamente una de las dos coordenadas. Esto permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por otra parte, sigue garantizando una revisión completa del territorio.
5. **Por conglomerados:** Se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, denominado conglomerado (Conglomeración), en lugar de individuos aislados. En otras palabras, de cada punto a verificar se toman varias muestras en puntos vecinos al elegido aleatoriamente, y de acuerdo aun esquema prefijado. Por ejemplo, un conglomerado podría constituirse por cinco puntos, a cierta distancia del punto central y siguiendo una forma de L. Este método de muestreo reduce los costos de transporte, pero resulta más complejo y, normalmente, menos preciso que los anteriores.

De entre ellos, el muestreo sistemático no alineado ha sido fenomenalmente empleado en tareas de verificación de clasificaciones (Fitzpatrick-Lins, 1978; Rosenfeld, 1982; Dozier y Strahler, 1983), gracias a lo mencionado en los tipos de métodos. Otros autores recomiendan métodos alternativos, como el aleatorio simple (Hord y Brooner, 1976), el estratificado por categorías (VanGenderen, 1978; Ginevan, 1978) o el muestreo por conglomerados (Todd *et al.*, 1980). No obstante parece

conveniente comentar con más detalle el muestreo sistemático no alineado, en razón de su frecuente uso en trabajos de verificación de clasificaciones.

En este tipo de muestreo, la elección de la muestra parte, habitualmente, de dividir el área de estudio en una malla regular de rectángulos, que podrían hacerse coincidir con la cuadrícula de Unidades Transverso Mercator (UTM). Sobre cada uno de ellos, se elige uno o varios puntos de muestreo, de acuerdo a un proceso de selección sistemático, pero no alineado. Esto quiere decir, que, en cada una de las columnas y filas de esa matriz de rectángulos, las coordenadas de cada punto de observación se elige manteniendo un eje constante, y variando el otro aleatoriamente. De esta forma, se introduce un cierto rasgo de aleatoriedad, a la vez que se mantiene una observación global del territorio (Berry y Baker, 1968). Como hemos mencionado anteriormente, existen varios tipos de métodos de muestreo, y su elección dependerá del tipo de estudio que se este realizando y de los costos. Para llevar a cabo este trabajo hemos elegido una combinación de dos métodos que son el aleatorio simple y el sistemático.

b. Objetivo

Caracterizar biofísicamente a las subcuencas que conforman la cuenca del Lago de Cuitzeo a partir de la base de datos temáticos de roca, suelo, relieve y cobertura vegetal (1975 y 2000).

c. Materiales y métodos

El primer paso en el estudio detallado de las subcuencas seleccionadas consistió en la conversión de mapas existentes. Los temas integrados son: geología (Pasquarè *et al*, 1991), a escala 1:300,000; geomorfología (Mendoza, 2002), edafología (INEGI, 1979, 1982 y 1983), cobertura vegetal y uso del suelo (López *et al*, 2006) a escala 1: 50,000. Los datos se integraron en el Sistema de Información Geográfica (SIG), denominado ArcView 3.2 (ESRI, 1999). Las actividades realizadas se resumen de la siguiente manera (Figura 1):

- ❖ Recortes de todos los temas de las subcuencas en estudio.
- ❖ Caracterización de las subcuencas a partir del uso de herramientas de superposición de los datos integrados (geología, edafología, geomorfología, y cobertura vegetal y uso del suelo).
- ❖ Diseño cartográfico de los diversos temas de interés.

Para la consecución de la fase de muestreo, se formó un listado de puntos evaluados, para los que conocemos tanto su cobertura real (verdad de campo) como la deducida por la interpretación. Se formó una matriz, denominada de confusión puesto que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. Se trata de una matriz bidimensional, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia y las columnas por las categorías deducidas de la clasificación. Lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado; se trata, en suma, de una matriz cuadrada; $n \times n$, donde n indica el número de categorías.

La matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras los residuales en columnas implican cubiertas del mapa que no se ajusta a la realidad. En definitiva, representan los errores de omisión y de comisión, respectivamente (Aronoff, 1982; Owe y Ormsby, 1984).

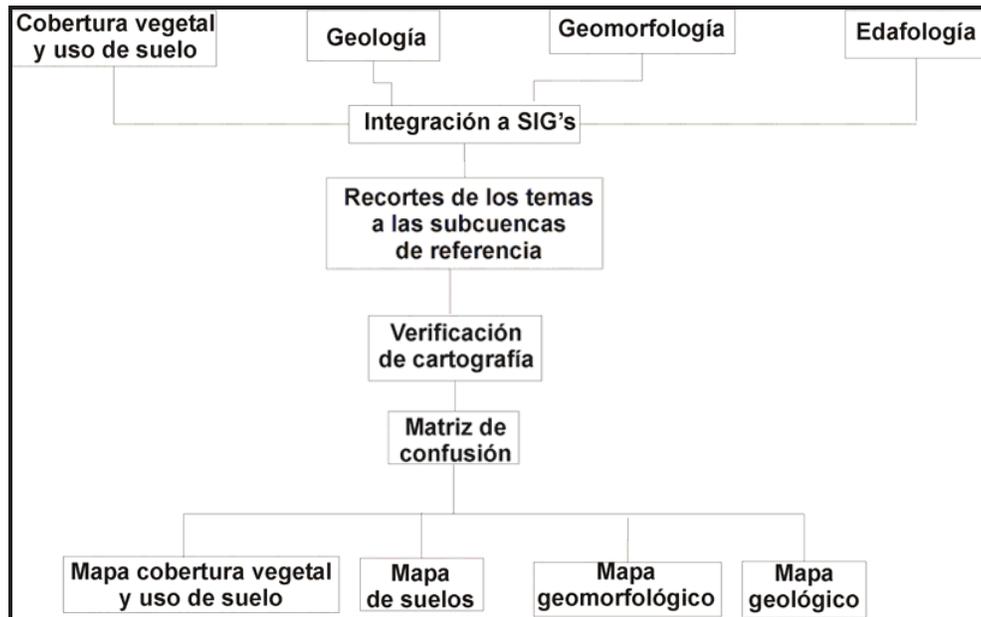


Figura 1. Diagrama de la metodología

La matriz de confusión se realizó únicamente para las subcuencas de referencia (Figura 2), las cuales se encuentran en la cuenca del Lago de Cuitzeo que tiene una superficie de $4,000 \text{ km}^2$; en su interior se seleccionaron tres subcuencas que *a priori* se consideraron representativas de la cuenca o de sectores de la cuenca del Lago de

Cuitzeo. Los datos de geología se trabajaron de una manera general así como también se conjuntaron los basaltos y dacitas, ya que su expresión geomorfológica era muy similar.

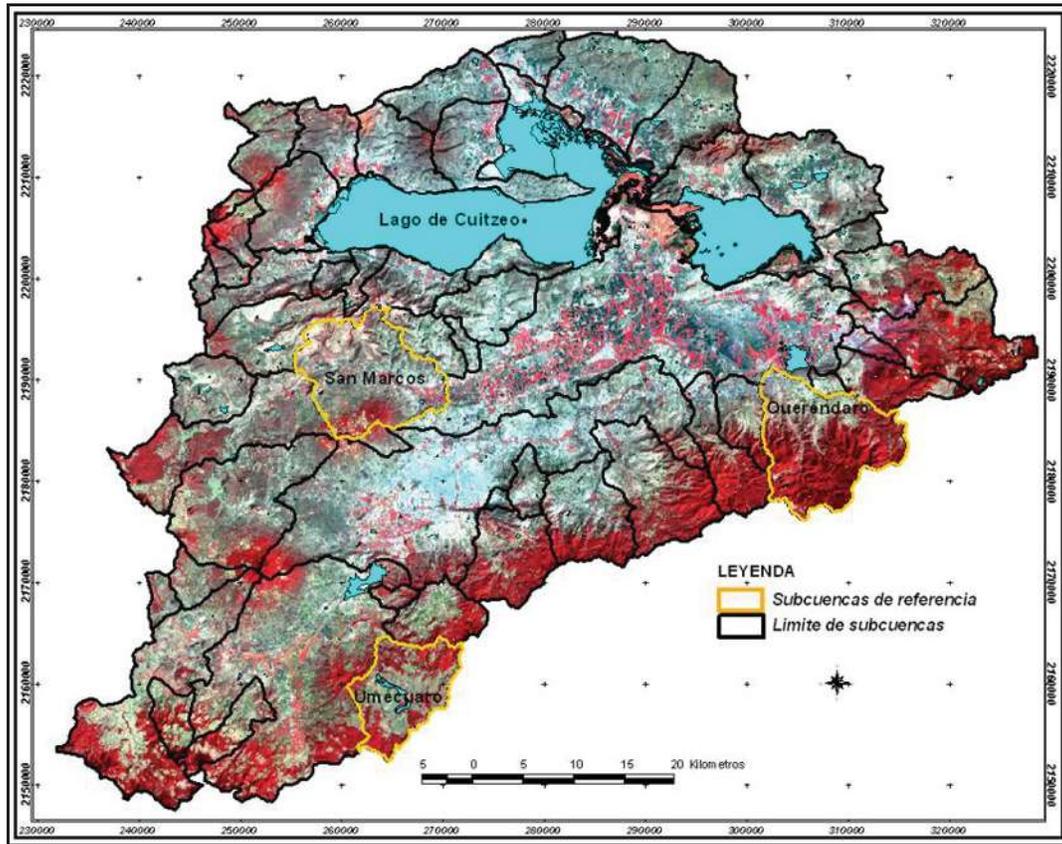


Figura 2. Cuenca del Lago de Cuitzeo con las tres subcuencas de referencia

3.2. RESULTADOS

a. Matriz de confusión

Las abreviaturas de las matrices de confusión se encuentran descritas en el Cuadro 1. La subcuenca de San Marcos se encuentra conformada en más de 50% por lomeríos, aproximadamente 30% por piedemontes y el restante por planicies y colinas. Dentro de la subcuenca de San Marcos existen 63 polígonos de unidades de relieve, de los cuales 57 se verificaron en campo, teniéndose una exactitud global de 93% como se ilustra en el Cuadro 2. Por lo tanto podemos decir que la cartografía es altamente confiable, es decir, la mayoría de las unidades no presentan confusión.

Con respecto a la subcuenca de Umécuaro en lo que respecta a las unidades del relieve existen un total de 44 polígonos, de los cuales 29 corresponden a colinas (aproximadamente el 80 % de la cuenca) y el resto corresponde a lomeríos y cuerpos de agua. La verificación de la cartografía de unidades de relieve indica que se tuvo una

exactitud de 90%, presentándose confusión en las colinas con los lomeríos, lo cual se muestra en el Cuadro 3. Sin embargo la verificación se encuentra dentro de los rangos de aceptación.

Cuadro 1. Significado de las abreviaturas utilizadas en las matrices de confusión

Abreviatura	Significado	Abreviatura	Significado
C.agua	Cuerpo de agua	Lalsir	Lomeríos altos laderas suaves irregulares
Cc	Colinas cono volcánico	Lam	Lomeríos altos mesas
Cl	Colinas laderas	Lapd	Lomeríos altos piedemonte
Clir	Colinas laderas irregulares	Lasc	Lomeríos altos superficie cumbral
Clisir	Colinas laderas suaves irregulares	Lbliir	Lomeríos bajos laderas inclinadas irregulares
Clmscn	Colinas laderas muy suaves cóncavas	Lblmscx	Lomeríos bajos laderas muy suaves convexas
Clmscx	Colinas laderas muy suaves convexas	Lblmsr	Lomeríos bajos laderas muy suaves rectilíneas
Clmsr	Colinas laderas muy suaves rectilíneas	Lblscx	Lomeríos bajos laderas suaves convexas
Clscx	Colinas laderas suaves convexas	Lblsir	Lomeríos bajos laderas suaves irregulares
Cm	Colinas mesa	Lbpdi	Lomeríos bajos piedemonte inferior
Cve	Colinas valle estrecho	Lbsc	Lomeríos bajos superficie cumbral
Cliir	Colinas laderas inclinadas irregulares	Pdmir	Piedemonte medio irregular
Clmsir	Colinas laderas muy suaves irregulares	Pdmcn	Piedemonte medio cóncavo
Cpd	Colinas piedemonte	Pdmcx	Piedemonte medio convexo
Cpldi	Colinas planicie depresión interlavica	Pmliir	Piedemonte medio laderas inferiores irregulares
Cpldizi	Colinas planicie depresión interlavica zona de inundación	Pdmr	Piedemonte medio rectilíneo
Cplzi	Colinas planicie zona de inundación	Pdscn	Piedemonte suave cóncavo
Csc	Colinas superficie cumbral	Pdsir	Piedemonte suave irregular
Cva	Colinas valle amplio	Pdsr	Piedemonte suave rectilíneo
Clsr	Colinas laderas suaves rectilíneas	Pl	Planicie lacustre
Lalicn	Lomeríos altos laderas inclinadas cóncavas	Plfl	Planicie fluvial
Laliir	Lomeríos altos laderas inclinadas irregulares	Mleir	Montaña laderas escarpadas irregulares
Lalsr	Lomeríos altos laderas suaves rectilíneas	Mlicn	Montaña laderas inclinadas cóncavas
Lacv	Lomeríos altos conos volcánicos	Mlicx	Montaña laderas inclinadas convexas
Lalmsir	Lomeríos altos laderas muy suaves irregulares	Mlmsir	Montaña laderas muy suaves irregulares
Lalmsr	Lomeríos altos laderas muy suaves rectilíneas	Mlmsr	Montaña laderas muy suaves regulares
Lalir	Lomeríos altos laderas irregulares	Mlsr	Montaña laderas suaves rectilíneas
Lalmscx	Lomeríos altos laderas muy suaves convexas	Msc	Montaña superficie cumbral
		Mva	Montaña valle amplio

Cuadro 2. Matriz de confusión de las formas del relieve de la subcuenca de San Marcos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Suma	Exactitud	
1. C. agua	4																														4	80	
2. Clir		0																													0	0	
3. Clmscx			2																												2	100	
4. Clmsr				1																											1	100	
5. Clscx					2																										2	100	
6. Clsr						1																									1	100	
7. Cm							1																								1	100	
8. Cpldi								1																							1	100	
9. Csc		1							3																						4	100	
10. Latv										1																					1	100	
11. Lalir											2																				2	100	
12. Lalir												2																			2	100	
13. Lalmsex													3																		3	100	
14. Lalmsir														1																	1	100	
15. Lalmsr															1																1	100	
16. Lalsir																2															2	100	
17. Lalsr																	2														2	100	
18. Lam																		3													3	100	
19. Lapd																			1												1	100	
20. Latsc																				1											1	100	
21. Pdmen																					2										2	100	
22. Pdmcx																						1									1	100	
23. Pdmir																							2								2	100	
24. Pdmr																								1							1	100	
25. Pdscn																									1						1	100	
26. Pdsir																										1					1	100	
27. Pdshr																											1				1	100	
28. P1																												1			1	100	
29. P1fl																													1		1	100	
30. Pmlir																													1		1	100	
Suma	4	1	2	1	2	1	1	1	3	1	2	2	3	1	1	2	2	3	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	11	Exactitud	
Exactitud	80	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	Global	92.90%

Cuadro 3. Matriz de confusión de las formas del relieve de la subcuenca de Umécuaro

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	SUMA	TOTAL
1. C. agua	1																								1	100
2. Clir		2																							2	100
3. Clir			1																						1	100
4. Clmscx				4																					4	100
5. Clmsir					2																				2	100
6. Clmsr						1														1					2	50
7. Clsir							2																		3	66.7
8. Cm								1																	1	100
9. Cpd									1																1	100
10. Cpldi										1															1	100
11. Cpldizi											2														2	100
12. Cplzi												1													1	100
13. Csc													8												9	89
14. Cva														1											1	100
15. Lalicon															1										1	100
16. Laliir																1									2	50
17. Lalsr																	1								1	100
18. Lbliir																		2							3	66.6
19. Lblmscx																			2						2	100
20. Lblmsr																				0					1	0
21. Lblscx																					2				2	100
22. Lblsir																						1			1	100
23. Lbpdi																							1		1	100
24. Lbsc																								1	1	100
SUMA	1	2	1	4	2	2	3	1	1	1	2	1	9	1	1	2	1	3	2	1	2	1	1	1	1	2122
TOTAL	100	100	100	100	100	50	66.7	100	100	100	100	100	89	100	100	50	100	66.6	100	0	100	100	100	100	100	Exactitud global 89.8 %

Cuadro 4. Matriz de confusión de las formas del relieve de la subcuenca de Queréndaro

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Suma	Total	
1. Cc	5																								6	83.3	
2. Cl		1																								1	100
3. Clir			1																							1	100
4. Clsir				2																						2	100
5. Clmscn					1																					1	100
6. Clmscx						1																				1	100
7. Clmsr							2																		3	66.6	
8. Clscx								2																	2	100	
9. Cm									3																3	100	
10. Cve										1															1	100	
11. Lacv											1														1	100	
12. Laliir												1													1	100	
13. Lalmsir													1												1	100	
14. Lalmsr														1											1	100	
15. Lalrs															1										1	100	
16. Pl																1									1	100	
17. Mleir																	1								1	100	
18. Mlien																		1							1	100	
19. Mlicx																			1						1	100	
20. Mlmsir																				1					1	100	
21. Mlmsr																					2				2	100	
22. Mlsr																						1			1	100	
23. Msc																							1		2	50	
24. Mva																								3	3	100	
Suma	6	1	1	2	1	1	1	3	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	3	Exactitud global 95.8	
Total	83.3	100	100	100	100	100	66.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	100	100	95.8	

La subcuenca de Queréndaro está representada por 39 polígonos que describen distintas formas de relieve en colinas, lomeríos, planicies y montañas. En esta predominan las colinas (21 polígonos) y montañas (12 polígonos); aunque es importante mencionar que la zona de montaña cubre más del 50% de la subcuenca. Con respecto a la verificación cartográfica de la unidades del relieve tenemos una exactitud del 96% (Cuadro 4).

Cuadro 5. Matriz de confusión de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de San Marcos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Suma	Total
1. Asentamientos humanos	15											16	93.75
2. Bordos		10										11	90.9
3. Bosque de encino			89									104	85.57
4. Bosque de pino				1								1	100
5. Cultivos de riego					3							3	100
6. Cultivos de temporal						81						100	81
7. Huertas							1					1	100
8. Matorral								83	2			94	88.29
9. Matorral pastizal									192			237	81.01
10. Pastizal										69		81	85.18
11. Suelo desnudo											18	19	94.73
Suma	16	11	104	1	3	100	1	94	237	81	19	Exactitud global 90.94	
Total	93.75	90.9	85.6	100	100	81	100	88.29	81	85.18	94.73		

Cuadro6. Matriz de confusión; cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de Queréndaro

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Suma	Total
1. Asentamientos humanos	18														20	90
2. Bordos		3													3	100
3. Bosque de encino			3												3	100
4. Bosque de pino				8											9	88.8
5. Bosque mixto					287										355	80.8
6. Cultivos de temporal						42									45	93.3
7. Huertas							6								7	85.7
8. Matorral								96							107	89.7
9. Matorral pastizal									185						209	88.5
10. Pastizal										55					69	79.7
11. Plantaciones de eucaliptos											6				6	100
12. Plantaciones de pino												14			16	87.5
13. Suelo desnudo													19		21	90.4
14. Terrenos baldíos														1	2	50
Suma	20	3	3	9	355	45	7	107	209	69	6	16	21	2	Exactitud Global 87.4	
Total	90	100	100	88.8	80.8	93.3	85.7	89.7	88.5	79.7	100	87.5	90.4	50		

La base de datos de la cartografía de cobertura vegetal y uso del suelo en las subcuencas de San Marcos, Queréndaro y Umécuaro contiene un total de 1903 polígonos; La subcuenca de San Marcos presenta 667 polígonos, de los cuales 104 corresponden a bosque de encino, 100 cultivos de temporal, 207 a matorral-pastizal, 94 a matorral, 81 a pastizal, el resto a huertas, asentamientos humanos, suelo desnudo, bosque de pino y cuerpos de agua (Cuadro 5).

La clase que mayor confusión presentó fue la de matorral-pastizal con matorral, esto se debe en primer lugar a que ambas clases tienen respuestas espectrales similares, al estar integradas por elementos comunes y obviamente en su expresión en el paisaje es similar; sin embargo, el nivel de confianza es alto, debido a que la exactitud global es de 80%.

La base de datos de la subcuenca de Queréndaro presenta un total de 873 polígonos, de los cuales 355 pertenecen a bosque mixto, ésta es la clase más representativa en la subcuenca. Del total de polígonos se verificaron 740, arrojando una exactitud de 87 % (Cuadro 6).

Cuadro 7. Matriz de confusión; cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de Umécuaro

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Suma	Total
1. Asentamientos humanos	16															16	100
2. Bosque de encino		9														9	100
3. Bosque de pino			9													10	90
4. Bosque mixto				150				3								164	93.1
5. C. agua					2											2	100
6. Cultivos de riego						1										1	100
7. Cultivos de temporal							44									51	86.2
8. Huertas								3								3	100
9. Matorral			1	3				1	13							18	72.2
10. Matorral pastizal										53						61	86.8
11. Pastizal											21					22	95.4
12. Plantaciones de pino												1				1	100
13. Plantaciones no diferenciadas													0			3	0
14. Suelo desnudo														3		3	100
15. Zonas de inundación															3	3	100
Suma	16	9	10	161	2	1	51	4	16	61	22	1	3	3	3		
Total	100	100	90	93.1	100	100	86.2	75	81.2	86.8	95.4	100	0	100	100		Exactitud Global 87.7

La base de datos de cobertura vegetal y uso del suelo de la subcuenca de Umécuaro esta integrada por 363 polígonos, de ellos se verificó 336 polígonos; la exactitud global fue de 88%. Las clases que presentaron mayor confusión fueron las de

matorral y bosque mixto donde de los 153 polígonos de bosque mixto 1.4% fueron confundidos con matorral (Cuadro 7).

La precisión obtenida en el mapa varía notablemente de unas clases a otras, aunque en algunas no proceda realizar conclusiones muy rigurosas ante su escasa representación en la muestra. Las categorías urbanas y el agua ofrecen un porcentaje de exactitud bastante alto, si bien no puede aplicarse con rigor de un 100%, puesto que el número de puntos asignados a esas clases es relativamente bajo (Chuvieco, 1990).

b. Caracterización biofísica de las subcuencas de referencia

Los materiales geológicos más importantes que se encuentran en la subcuenca de San Marcos son: conos de lava, basaltos y andesitas, ignimbritas, depósitos superficiales y depósitos de caída (Figura 3). Los materiales que mayor superficie ocupan son los conos de lava 46 km² (38%), los conos de lava se encuentran en la parte SSE y SSO; los basaltos y andesitas 34 km² (27%), las ignimbritas 31 km² (25%); los depósitos superficiales 9 km² (Figuras 3 y 4).

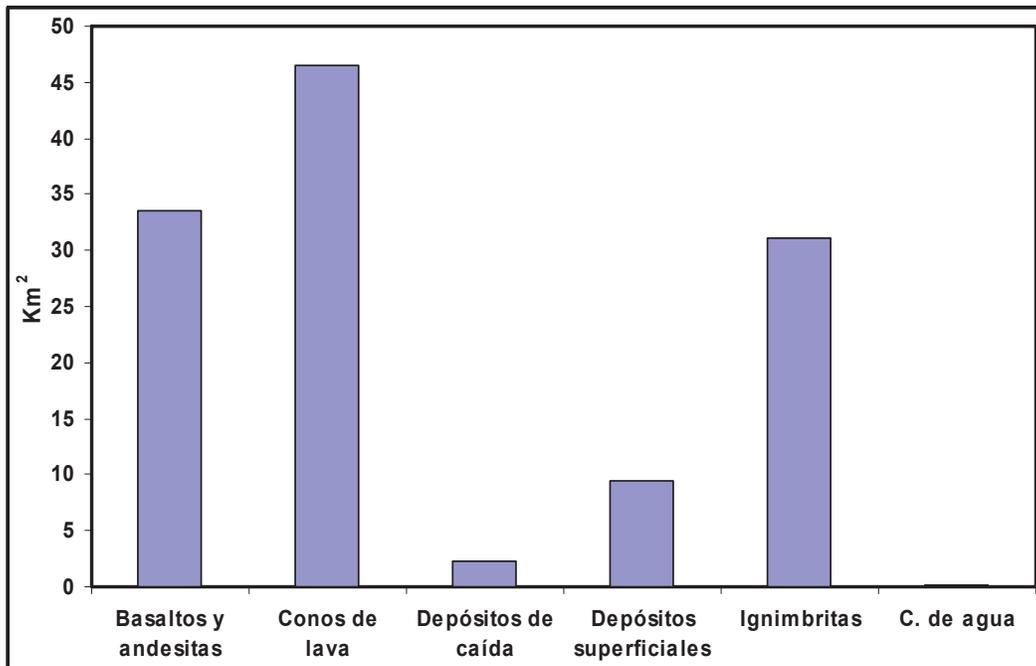


Figura 3. Tipos de rocas presentes en la subcuenca de San Marcos

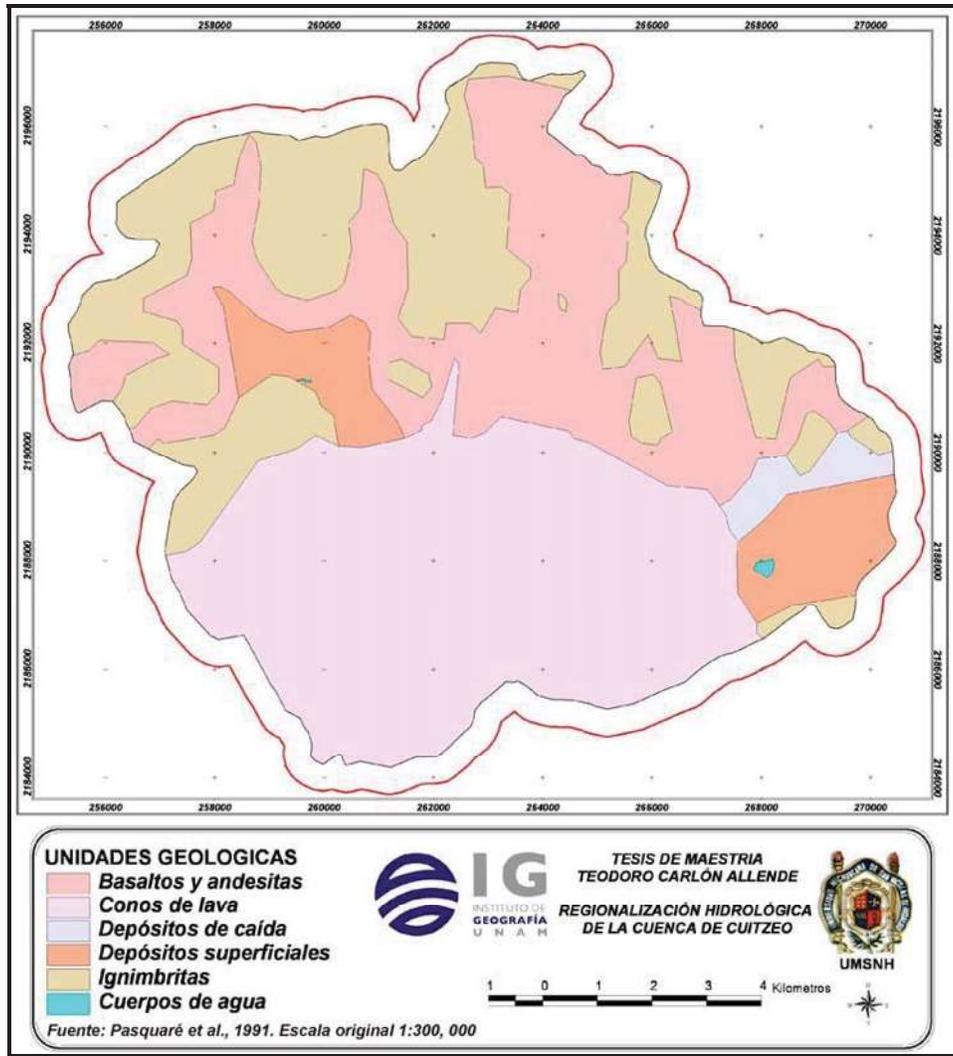


Figura 4. Unidades de los tipos de roca presentes en la subcuenca de San Marcos

La cartografía geomorfológica muestra en la subcuenca de San Marcos que las principales formas de relieve son piedemontes medios 27 km² (21%); laderas inclinadas en lomeríos altos 21 km² (17%); laderas suaves en lomeríos altos 19 km² (15%); mesas en lomeríos altos 18 km² (15%); laderas muy suaves en lomeríos altos 7 km² (6%); piedemonte suaves 6 km² (5%); planicies fluvio lacustres 6 km² (5%); planicie fluvial 5 km² (4%); piedemonte inclinado irregular 5 km² (4%); laderas suaves en colinas 3 km² (2%); lomeríos altos superficie cumbre 1%; laderas inclinadas en colinas 1%; laderas inclinadas irregulares en rampas de piedemonte 1% (Figuras 5 y 6). El resto del área se encuentra cubierto por: mesas en colinas, piedemonte en lomeríos altos, laderas muy suaves en colinas, superficie cumbre en colinas, planicie depresión interlavica en colinas, y cono volcánico en lomerío alto; estas unidades cubren un área de 3% (Figura

5). Aunque la mayor parte de la subcuenca se encuentra cubierta por lomeríos altos y rampas de piedemontes.

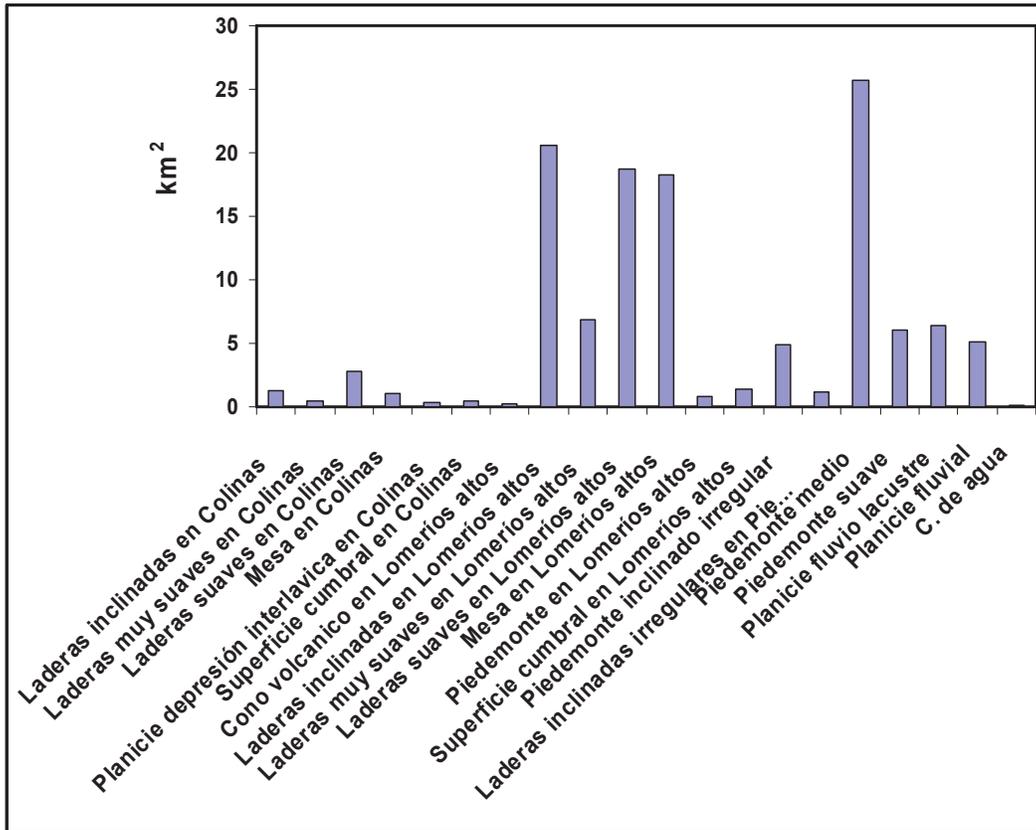


Figura 5. Abundancia proporcional de unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de San Marcos

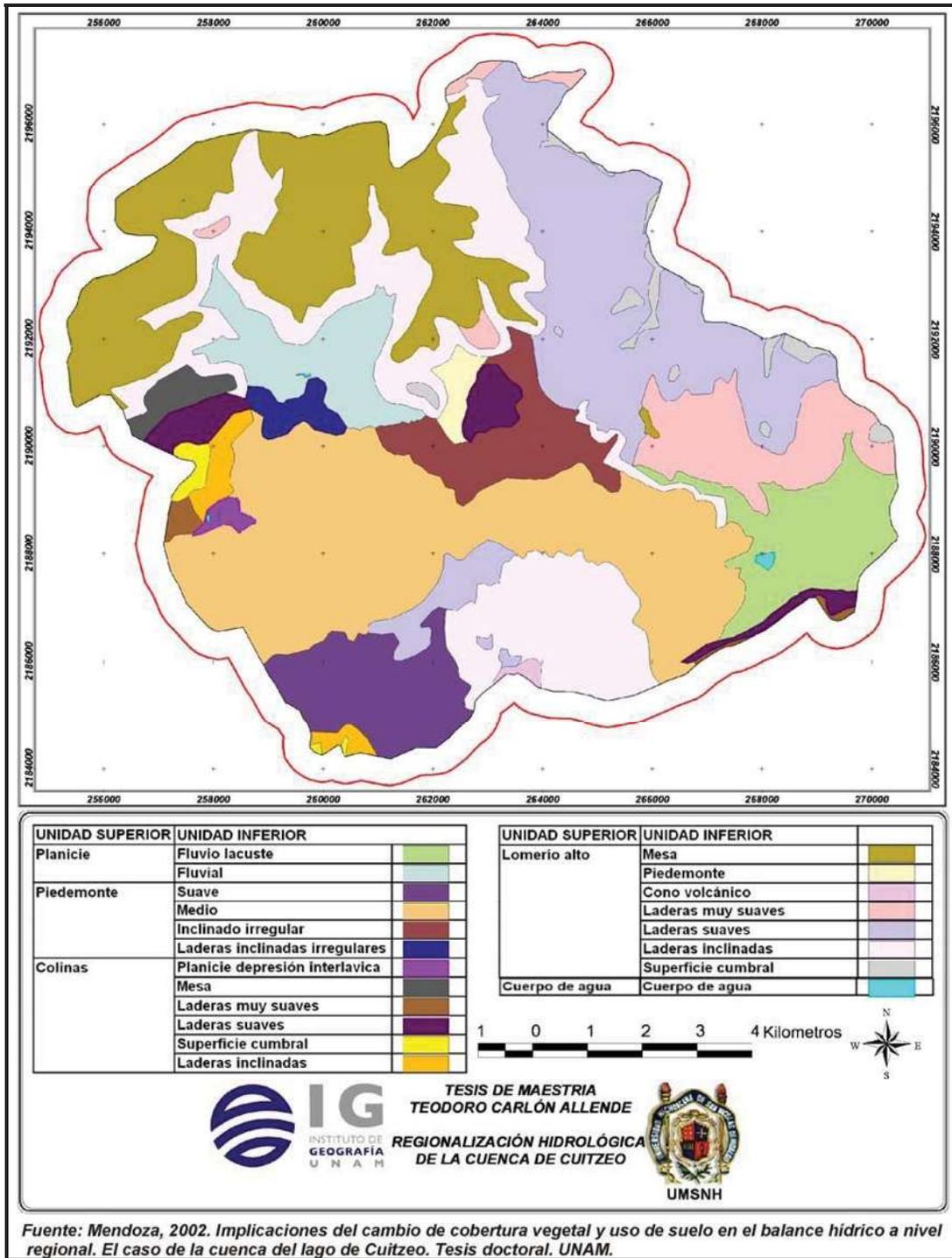


Figura 6. Subcuenca de San Marcos, unidades geomorfológicas

En la subcuenca de San Marcos se desarrollan principalmente Vertisoles, los cuales presentan una textura fina y una fase física lítica y lítica profunda; estos suelos permiten el desarrollo de agricultura. Cuando la fase física es pedregosa también se utilizan para la agricultura pero en menor grado, ya que dominan principalmente el

matorral-pastizal y el matorral. Los Vertisoles ocupan aproximadamente 94 km² (77%) (Figura 8). Luvisoles cubren 11 km² (9%); éste se encuentra al sureste de la cuenca. Sobre este tipo de suelo se desarrollan principalmente pino-encino, matorrales y pastizales; los suelos menos representativos en esta subcuenca por superficie ocupada son: Phaeozems y Andosoles que en conjunto cubren aproximadamente el 13% de la subcuenca (Figuras 7 y 8).

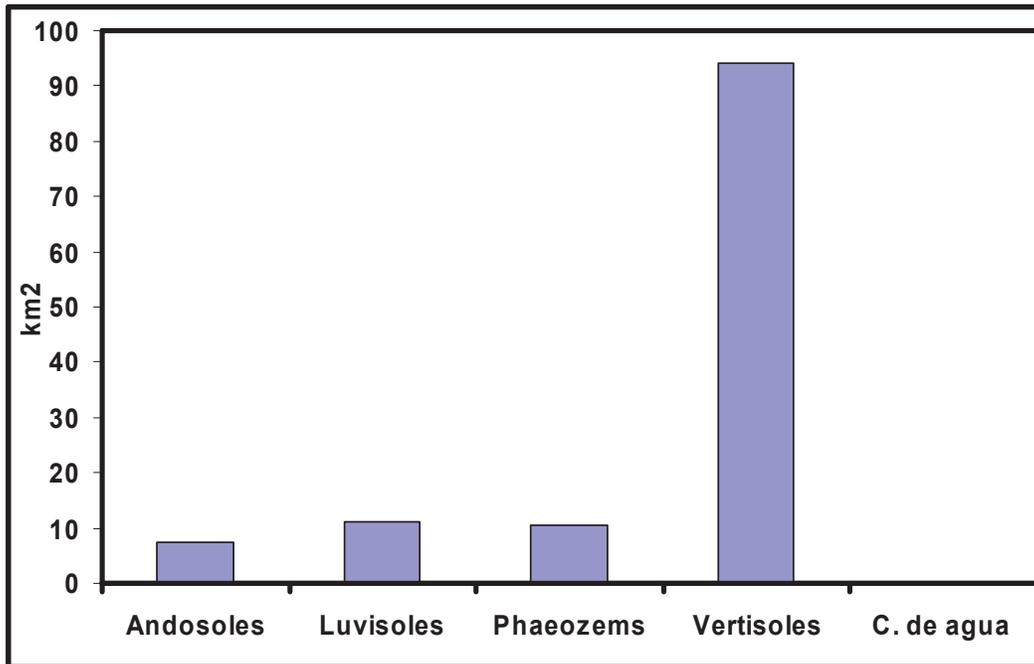


Figura 7. Abundancia proporcional de principales tipos de suelo presentes en la subcuenca de San Marcos.

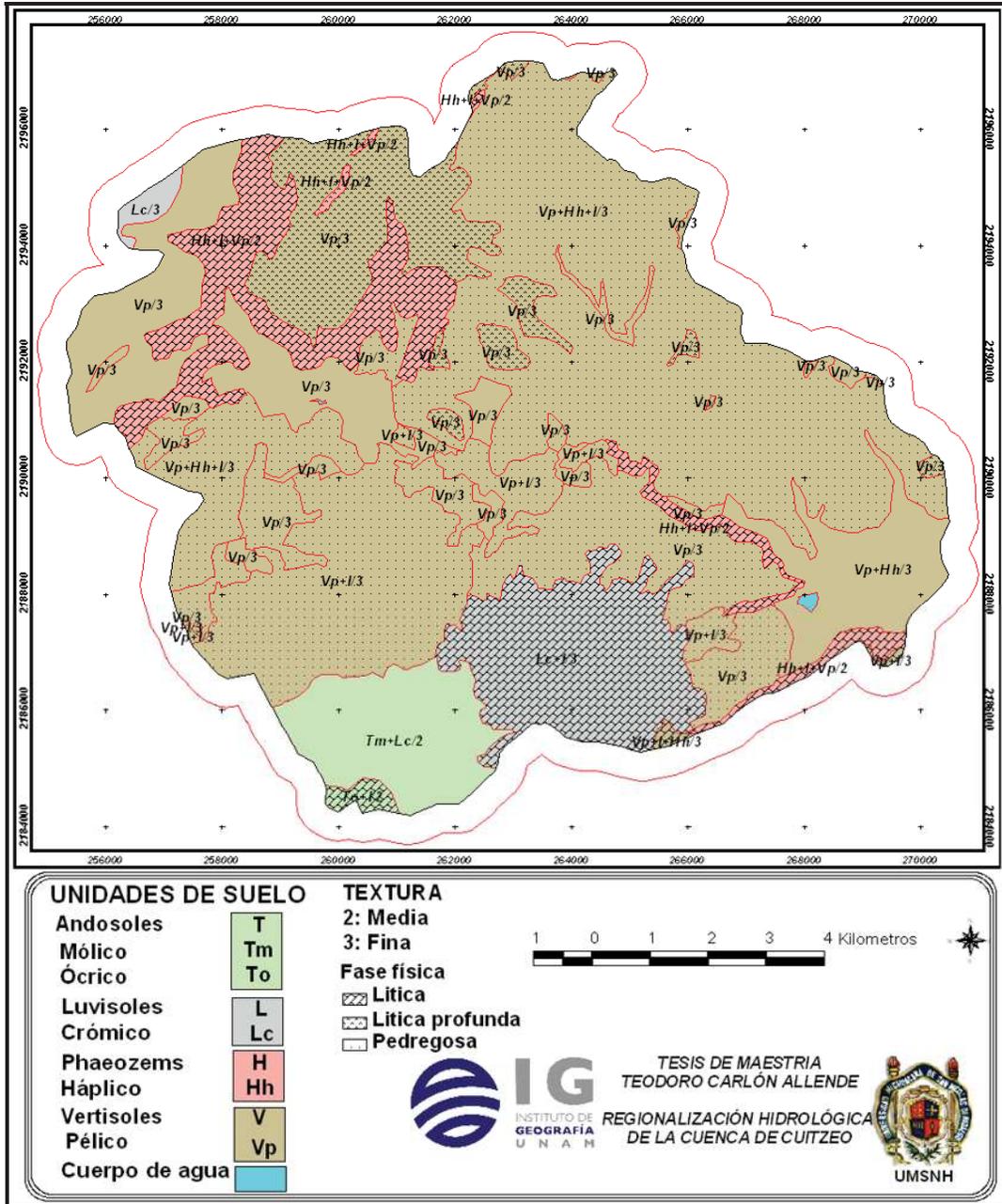


Figura 8. Unidades de suelo de la subcuenca de San Marcos

La parte alta de la subcuenca de San Marcos presenta una cobertura de bosque de encino-pino, 14 km² (11%); en la parte media y baja de la subcuenca se desarrolla matorral-pastizal, 35 km² (29%) (Figuras 9 y 11); cultivos de temporal 24 km² (20%) (Figura 10); el matorral cerrado representa el 22 km² (18%); pastizal 18 km² (15%); los cultivos de riego 6 km² (5%); el resto de la subcuenca corresponde a asentamientos humanos, bordos, suelo desnudo (áreas erosionadas) y huertas (Figuras 12 y 13). Es

importante mencionar que la zona erosionada se encuentra distribuida en la parte NO de la subcuenca. En la Figura 12 se observan las superficies ocupadas por cada una de las unidades de cobertura vegetal y uso del suelo.



Figura 9. Matorral- pastizal típico de la subcuenca de San Marcos



Figura 10. Agricultura de temporal

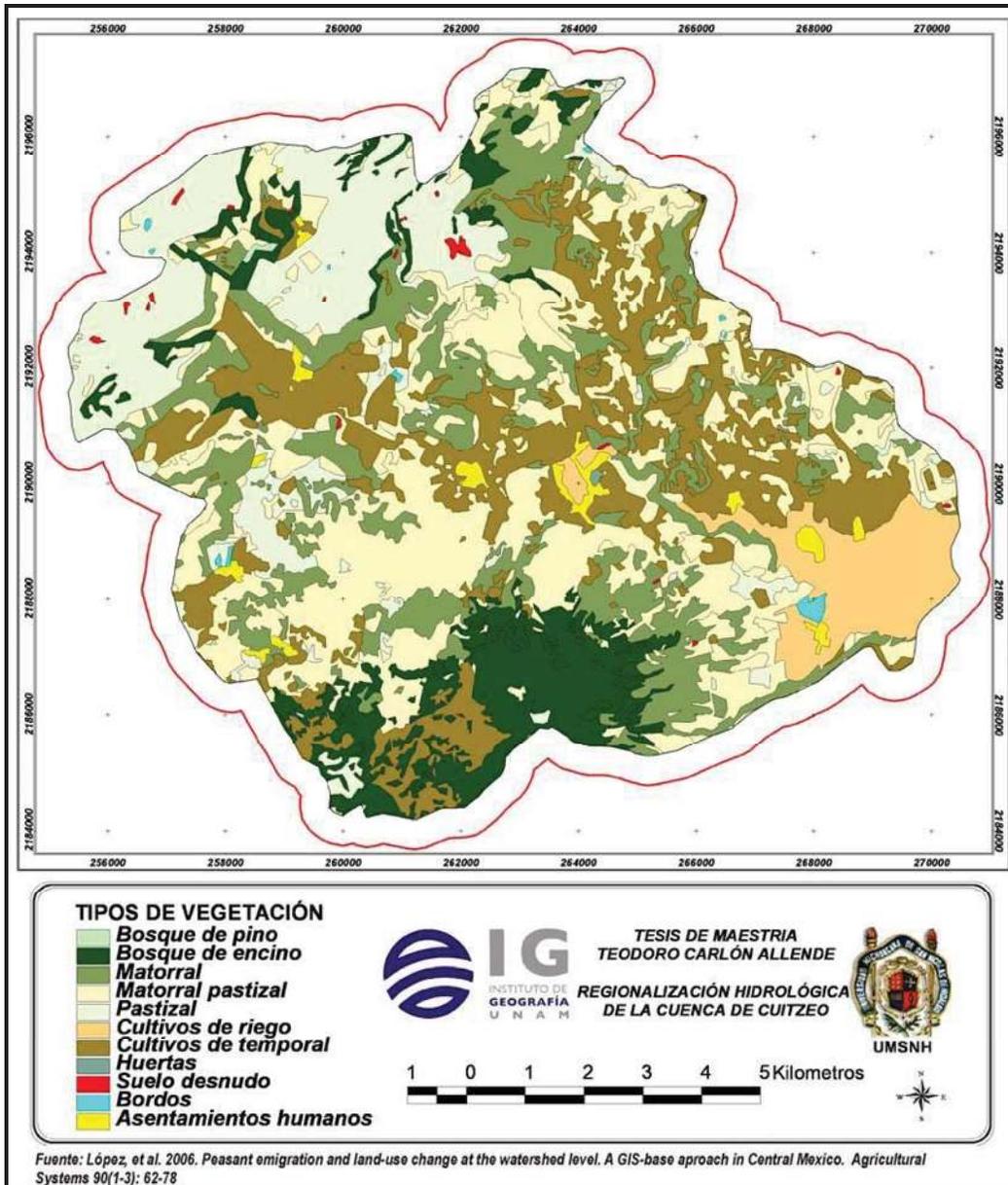


Figura 11. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo 2000 de la subcuenca de San Marcos

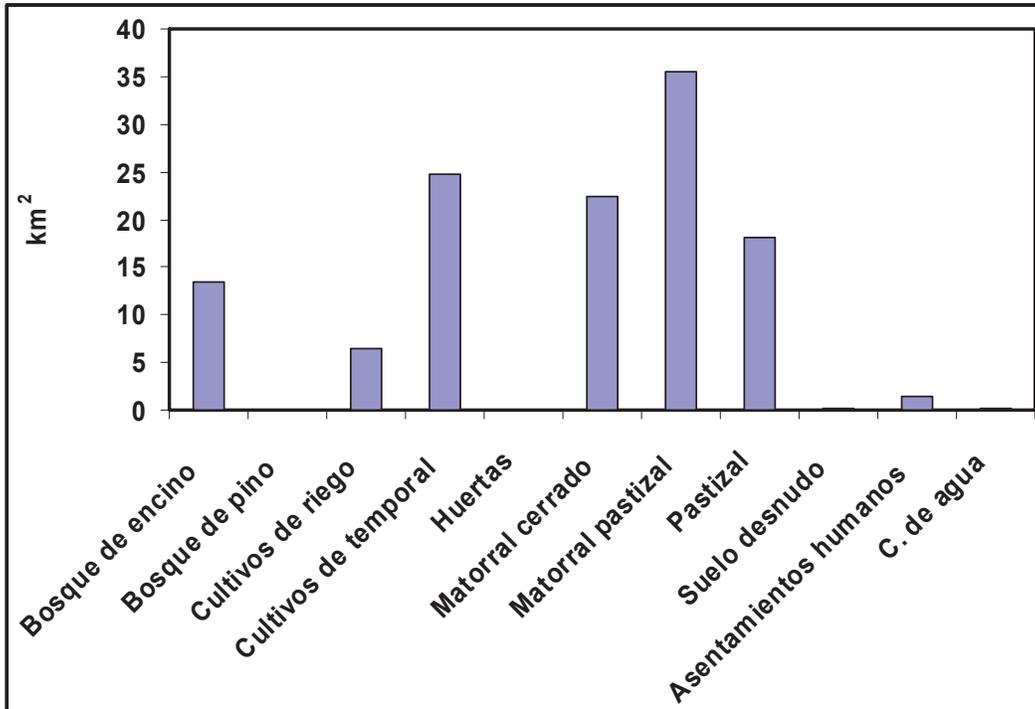


Figura 12. Superficies ocupadas por las clases de cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca de San Marcos



Figura 13. Erosión presente en la parte noroeste de la subcuenca de San Marcos

La cartografía geológica de la subcuenca de Umécuaro indica que se presentan cuatro tipos diferentes de materiales: Depósitos superficiales 52 km² (65%); conos

andesíticos 21 km² (26.5%); basaltos y dacitas, 5 Km² (6%), e ignimbritas 2 km² (2.2%; Figuras 14 y 15).

La cartografía geomorfológica de la subcuenca de Umécuaro, indica que esta formada por laderas muy suaves en colinas, 41 km² (52%); laderas suaves en colinas, 8 km² (10%); laderas suaves en lomeríos bajos, 7 km² (9%); laderas muy suaves en lomeríos bajos, 7 km² (8%) y superficies cumbrales en colinas, 5 km² (6%), (Figuras 16 y 17). Las unidades con menos superficie son: laderas inclinadas en lomeríos altos (2%); mesas en colinas (2%); laderas irregulares en colinas (1.4%); planicies inundables en colinas (1.2%); las clases restantes que son: laderas inclinadas en colinas, piedemontes en colinas, valles amplios en colinas, piedemontes en lomeríos bajos y superficie cumbre en lomeríos bajos, cubren el 4% de la subcuenca.

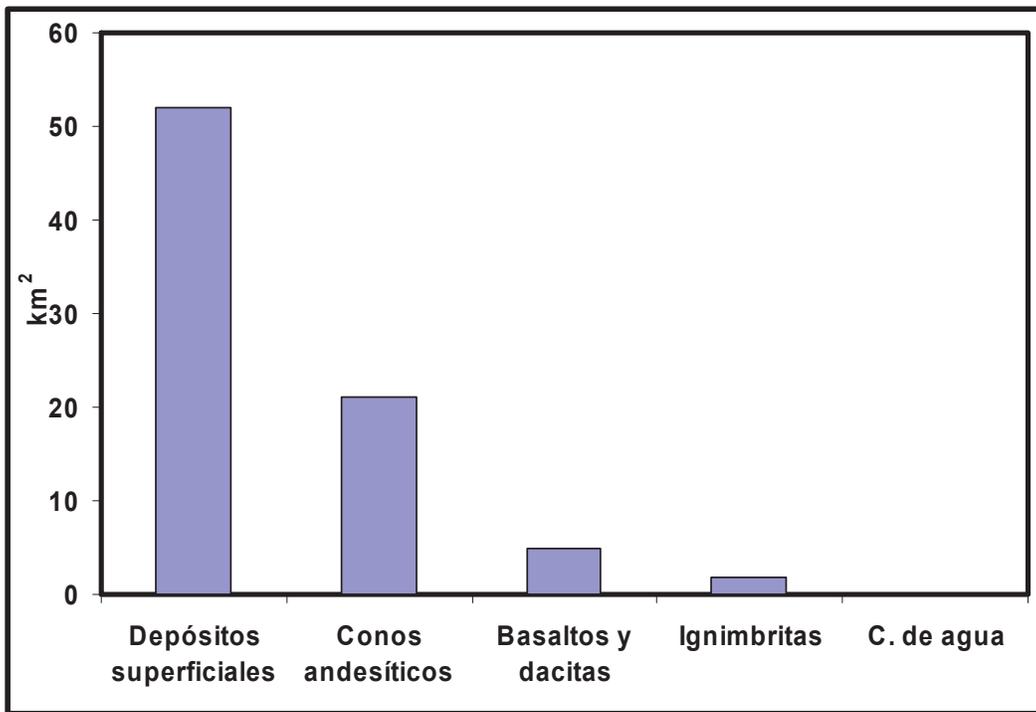


Figura 14. Superficies ocupadas de tipos de geología presente en la subcuenca de Umécuaro

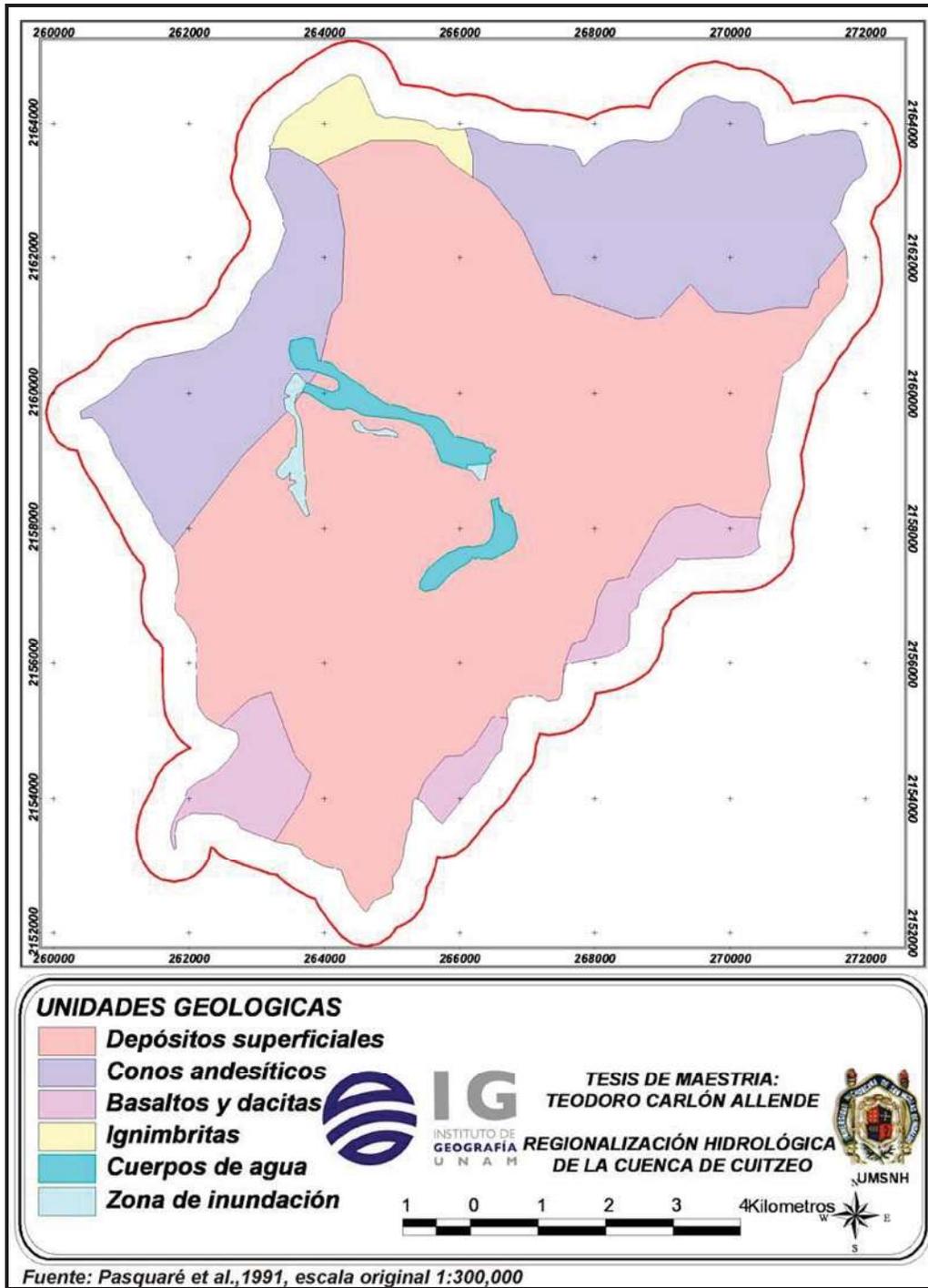


Figura 15. Unidades geológicas presentes en la subcuenca de Umécuaro

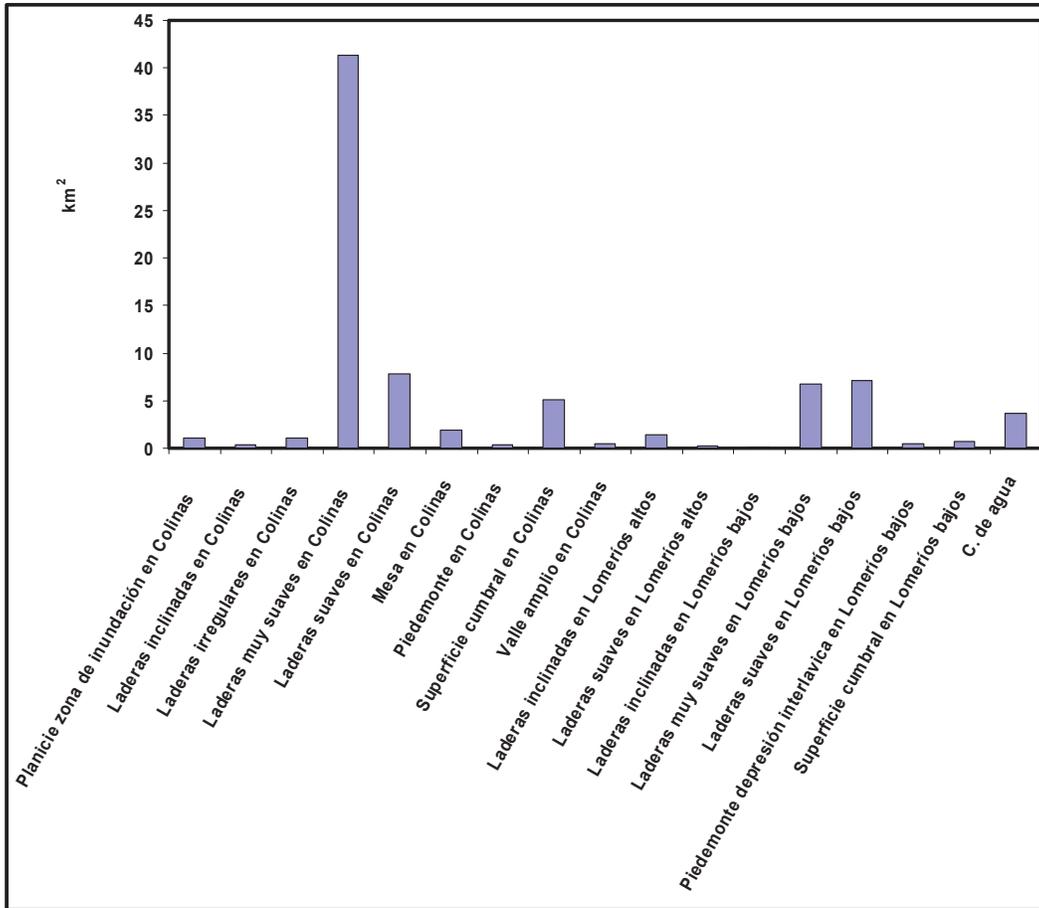


Figura 16. Unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de Umécuaro.

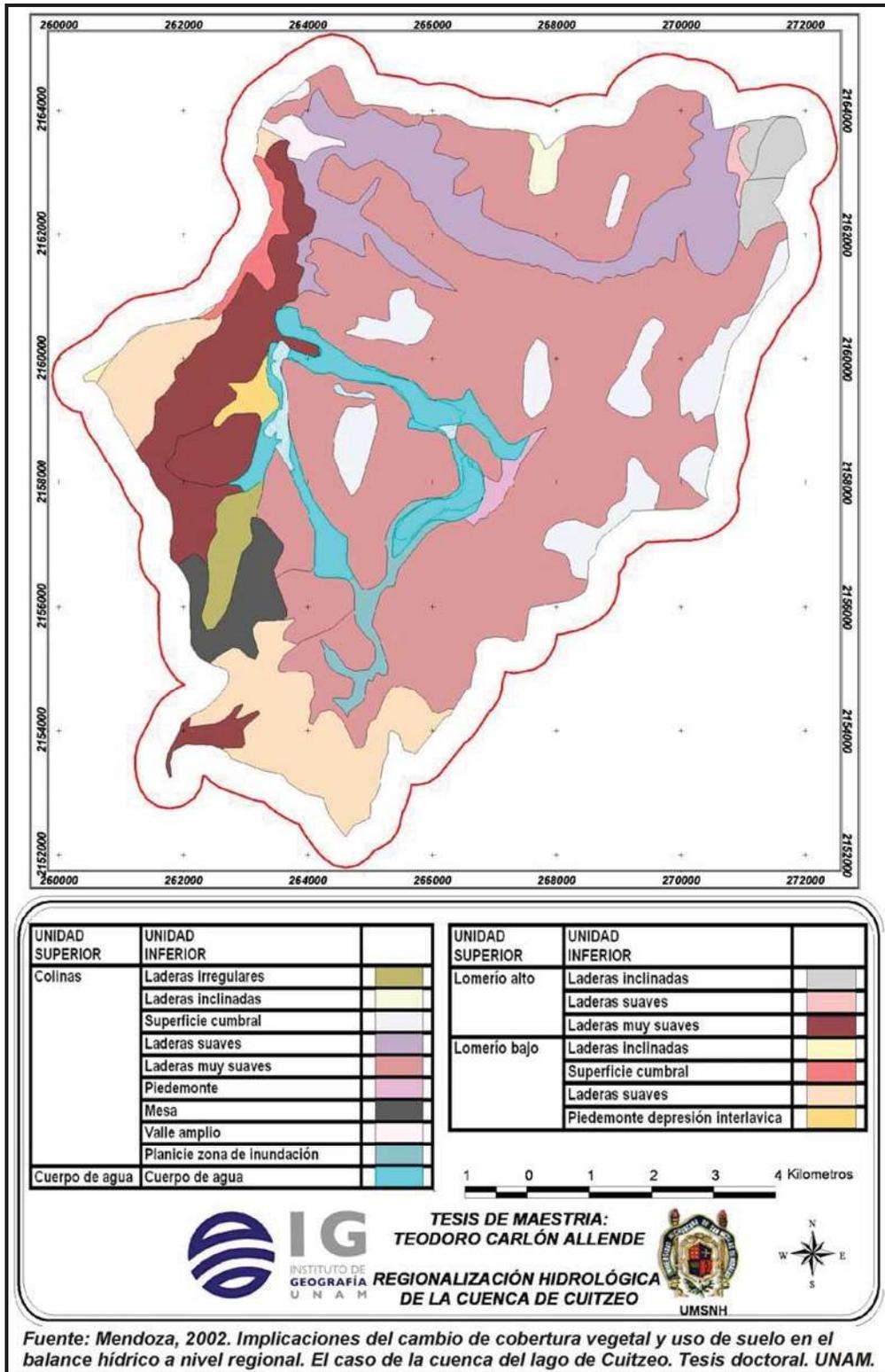


Figura 17. Mapa de unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de Umécuaro.

En la subcuenca de Umécuaro los suelos más representativos son Andosoles, 60 km² (75%); Acrisoles, 15 km² (19%) y por último Gleysoles, Luvisoles y Phaeozems, que juntos cubren aproximadamente el 5% (Figuras 18 y 19).

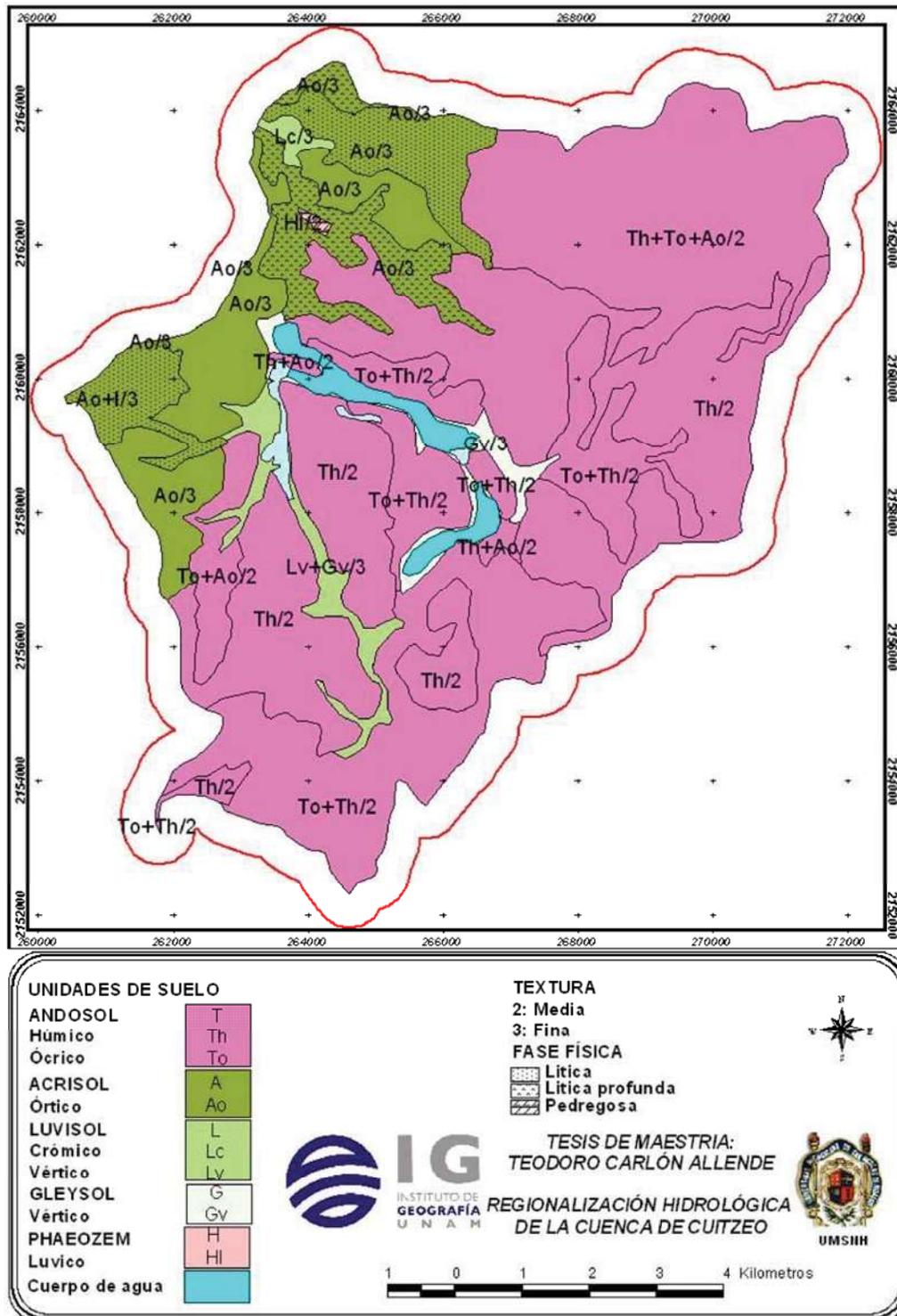


Figura 18. Mapa de tipos de suelo presentes en la subcuenca de Umécuaro

En los Andosoles se desarrollan bosques mixtos, así como la mayor parte de la agricultura de temporal y las huertas de aguacate; mientras que en las áreas donde se encuentran Acrisoles existe una cobertura de matorral y agricultura de riego (Figuras 18 y 19).

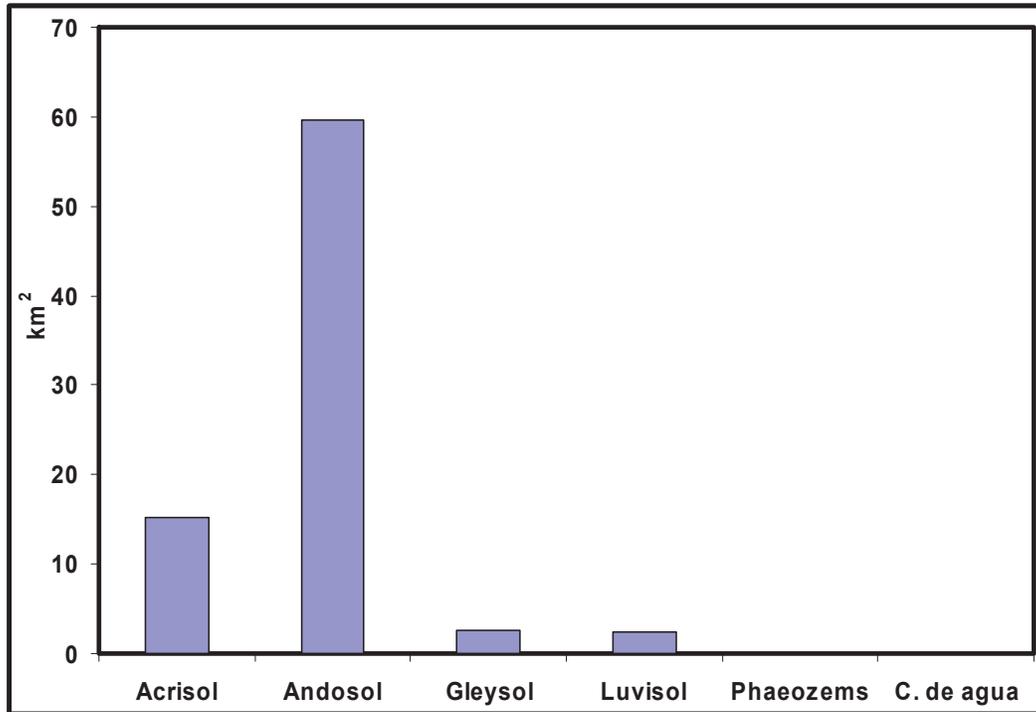


Figura 19. Tipos de suelos presentes en la subcuenca de Umécuaro

La cobertura predominante en la subcuenca de Umécuaro es cultivos de temporal 40 km² (50%; Figuras 20, 21, 22 y 23); los cultivos de temporal se localizan en la parte baja de la cuenca, a las orillas de la presa. En ocasiones la agricultura se encuentra con algunos manchones de bosque mixto, el cual cubre 31 km² (38%; Figuras 20 y 23); el matorral-pastizal, 3 km² (4%); el resto corresponde a bosque de pino, bosque de encino, cuerpos de agua, cultivos de riego, pastizal, entre otros (8%; Figuras 20 y 23). La parte alta de la subcuenca presenta bosque de pino-encino, el cual sufre procesos de deforestación, posteriormente este espacio se está destinando principalmente para huertas de aguacate. La subclase más representativa de bosque es semiabierto; sin embargo, existe una pequeña superficie de bosque abierto.

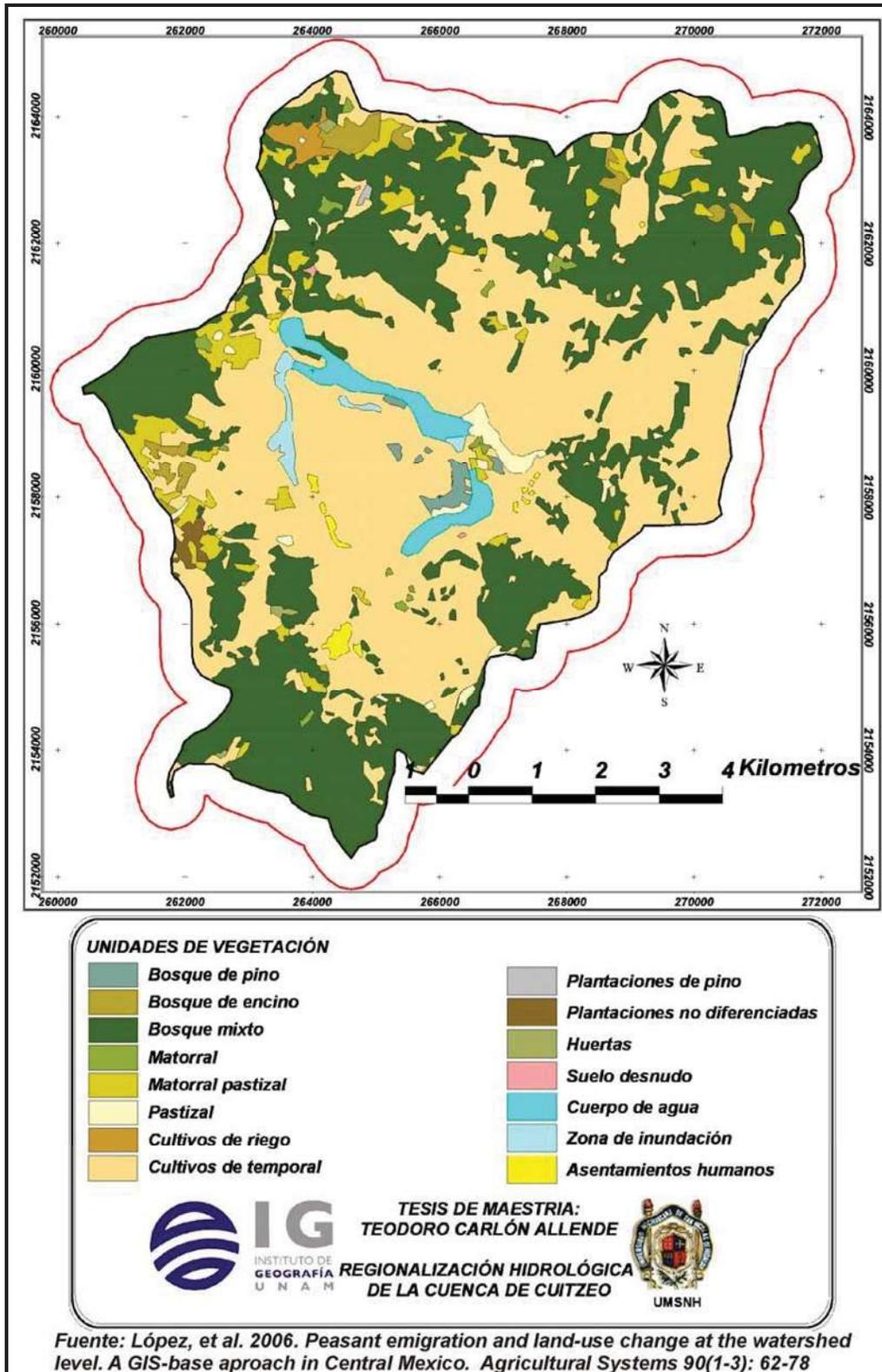


Figura 20. Unidades de vegetación de la subcuenca de Umécuaro



Figura 21. Agricultura de temporal con algunos matorrales



Figura 22. Agricultura y bosque de pino-encino al fondo

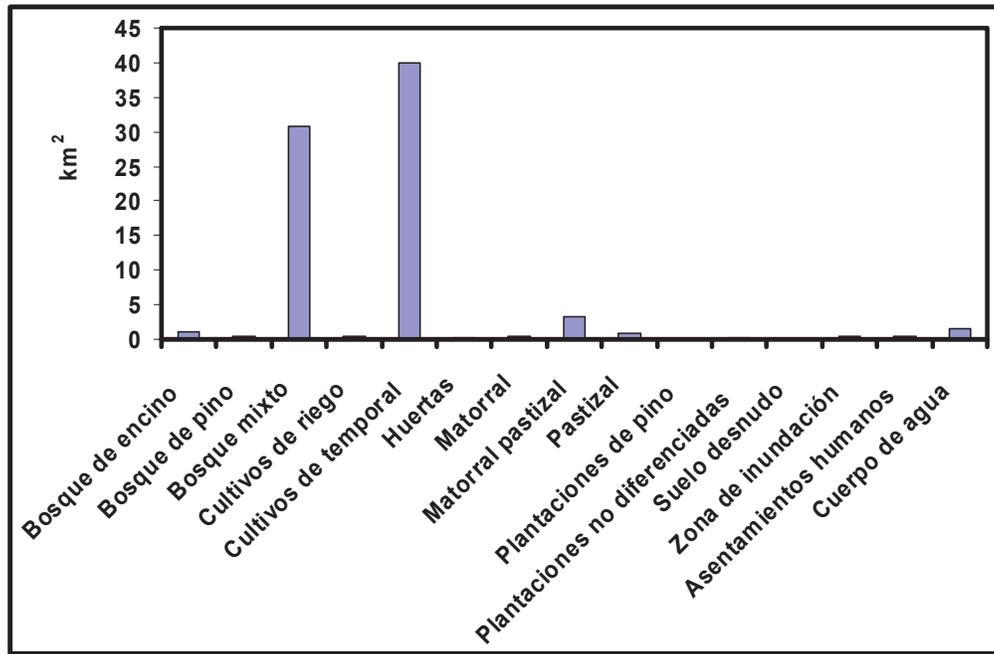


Figura 23. Cobertura vegetal que se presenta en la subcuenca de Umécuaro

Las unidades litológicas presentes en la subcuenca de Queréndaro son: basaltos, basaltos y dacitas, conos andesíticos, depósitos de caída, depósitos superficiales, domos andesíticos, riolíticos y dacíticos, ignimbritas y volcanes monogenéticos (Figuras 24 y 25).

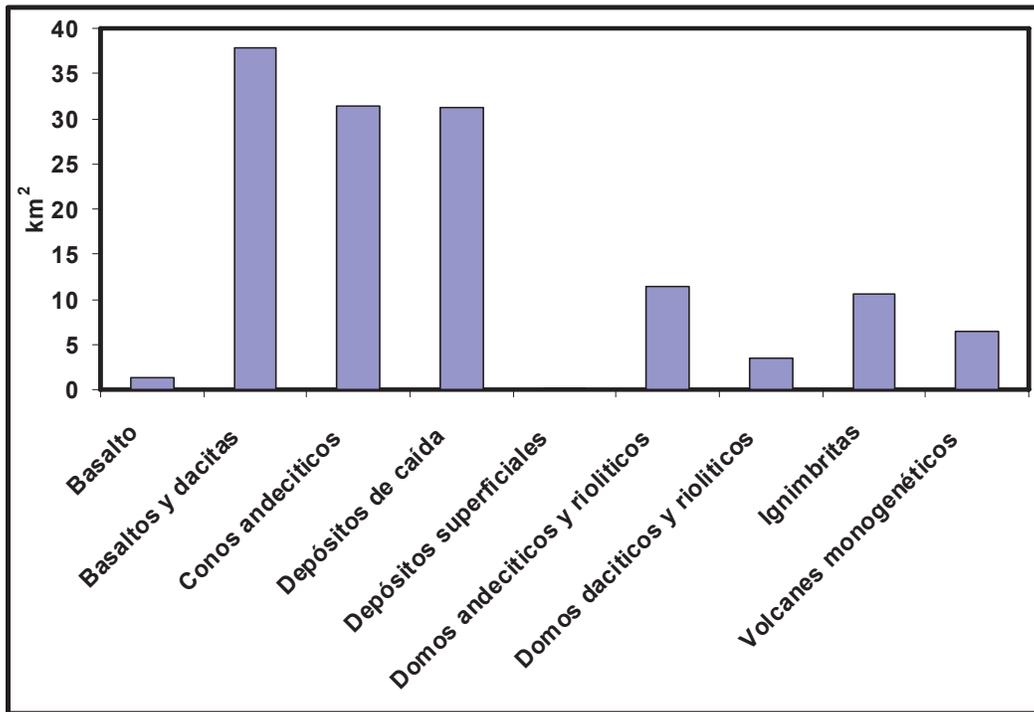


Figura 24. Tipos litológicos en la subcuenca de Queréndaro

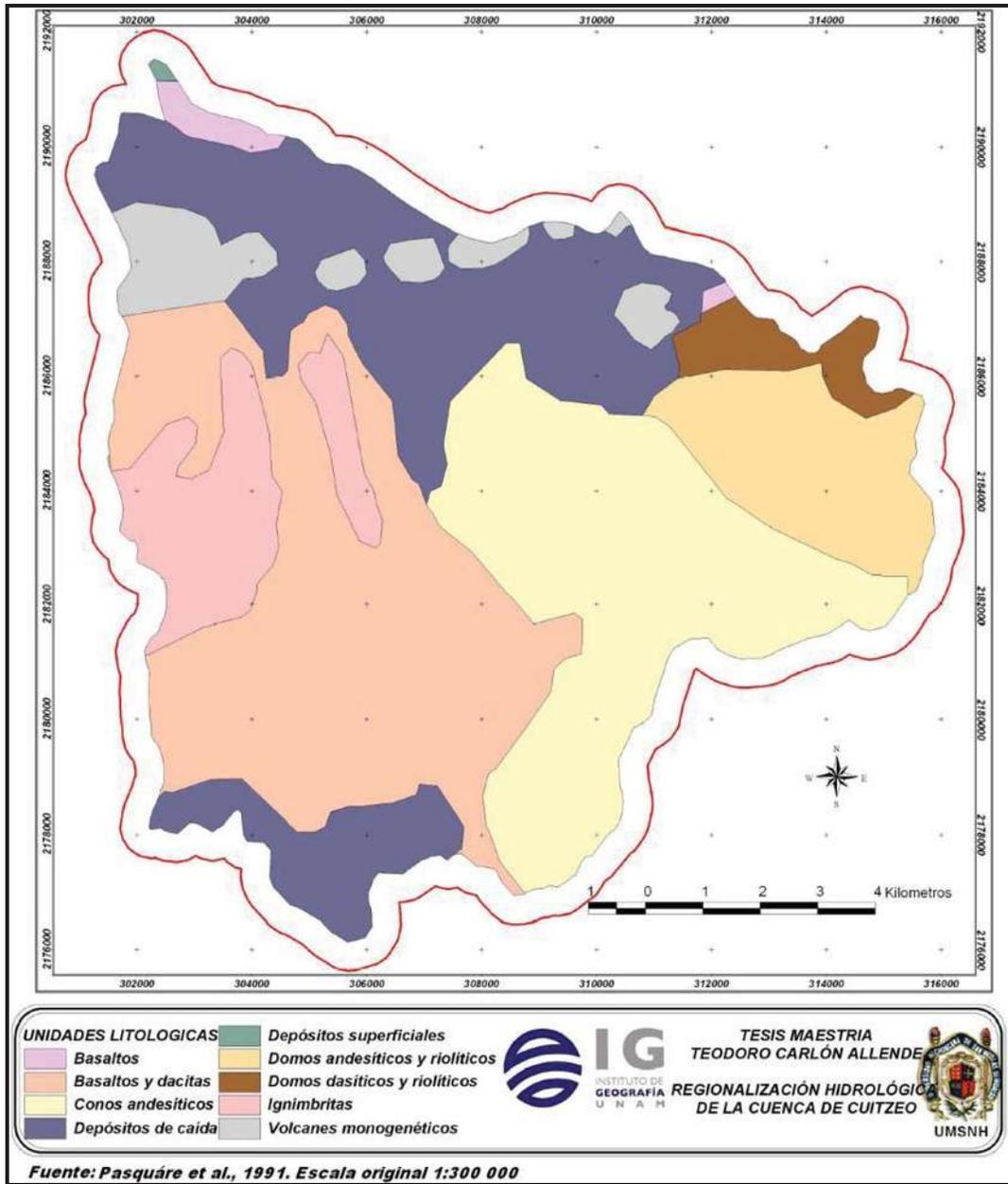


Figura 25. Unidades litológicas presentes en la subcuenca de Queréndaro

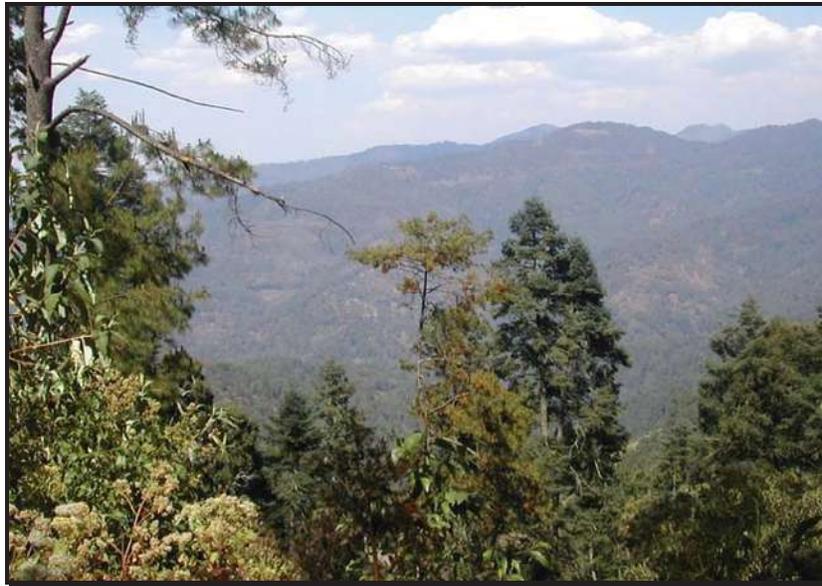


Figura 26. Laderas en montañas, presentes en la subcuenca de Queréndaro.

Las unidades más representativas por el área que cubren son: basaltos y dacitas, 38 km² (28%); conos andesíticos, 31 km² (23.5%); depósitos de caída, 31 km² (23.3%); domos andesíticos y riolíticos, 11 km² (11%) e ignimbritas, 11 km² (7.8%). Las unidades restantes cubren menos del 8% de la subcuenca.

Los datos geomorfológicos indican que las laderas escarpadas en montañas cubren 83 km² (62%); las laderas muy suaves en colinas, 18 km² (14%); las laderas suaves en colinas, 9 km² (7%); las laderas muy suaves en lomeríos altos, 6 km² (7%); las laderas muy suaves de montañas, 5 km² (4%); mesas en colinas, 3 km² (2%); los conos volcánicos en colinas, 3 km² (2%); laderas inclinados lomeríos altos, (1%); unidades restantes cubren el 2.5%, aproximadamente. Las unidades son: conos volcánicos en lomeríos altos, los valles amplios en montañas, valles estrechos en colinas, laderas suaves en lomeríos altos, planicies lacustres, laderas suaves en montañas, superficies cumbrales en montañas, y laderas inclinadas en colinas (Figuras 26 y 28).

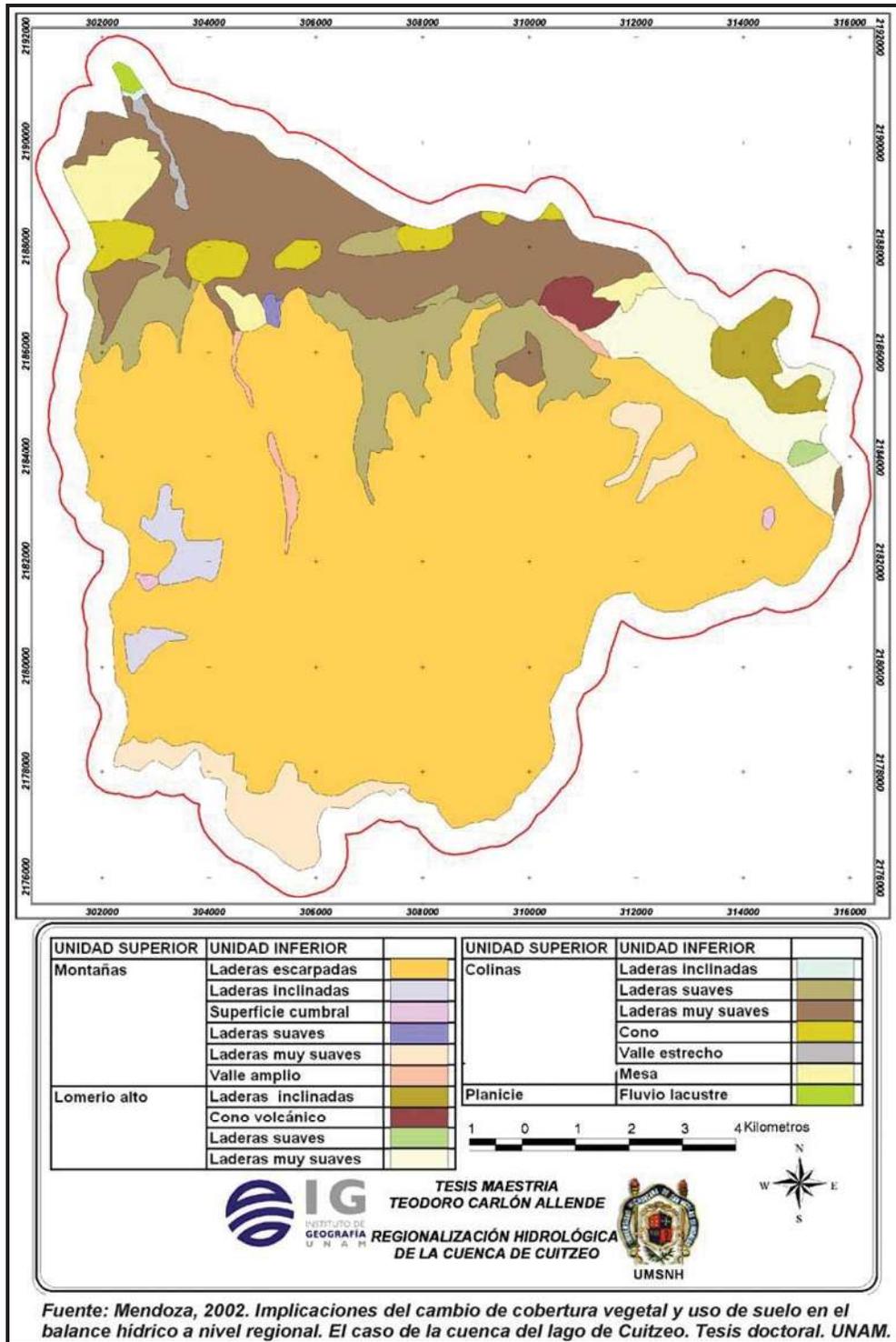


Figura 27. Mapa de unidades geomorfológicas de la subcuenca de Queréndaro.

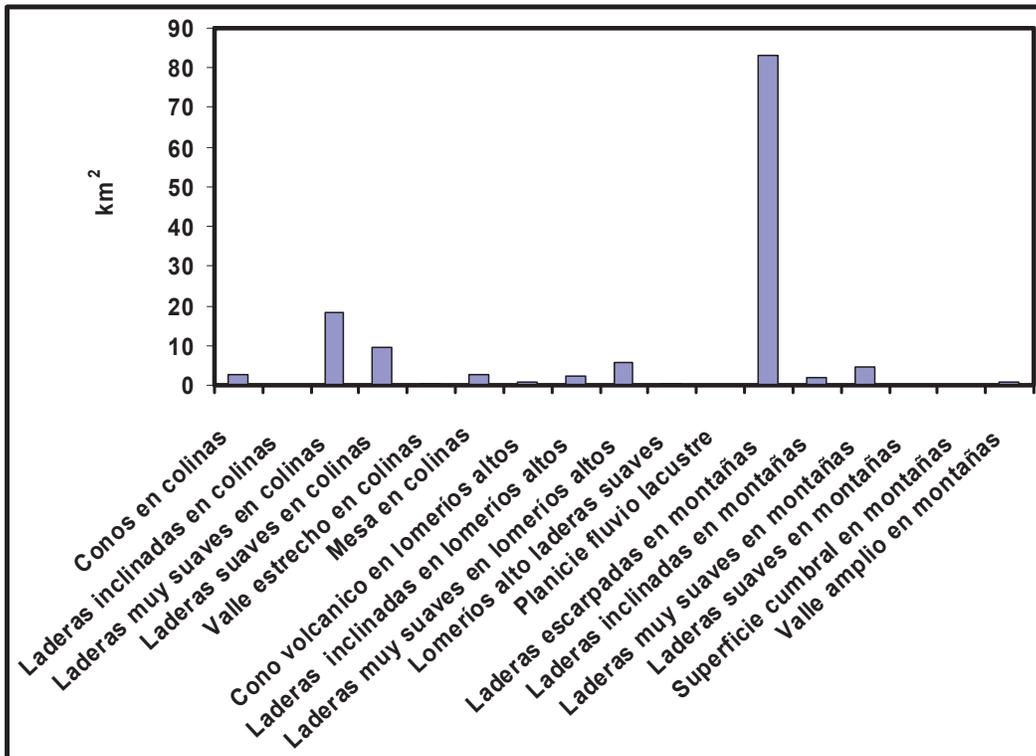


Figura 28. Unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca de Queréndaro

En la subcuenca de Queréndaro los tipos de suelos con mayor superficie son: Luvisoles 49, km² (37%); Andosoles, 41 km² (31%); Acrisoles, 27 km² (20%) y Vertisoles, 15 km² (12%). Los Luvisoles se encuentra en la parte media de la subcuenca de EO y que es donde se presenta un cambio de cobertura vegetal de matorral a bosque de pino-encino con escasa agricultura de temporal. Los Andosoles se ubican en la parte SE de la subcuenca, sobre ellos se desarrolla una cobertura de bosque de pino-encino y encino-pino. Los Acrisoles se ubican en la parte SO de la subcuenca, sobre ellos se desarrolla el bosque de pino-encino. Los Vertisoles se ubican en la parte baja de la subcuenca, cuya cobertura es de matorral y agricultura. El suelo que menor área cubre es Phaeozems 1% y se ubica en la parte baja de la subcuenca (Figuras 29 y 30).

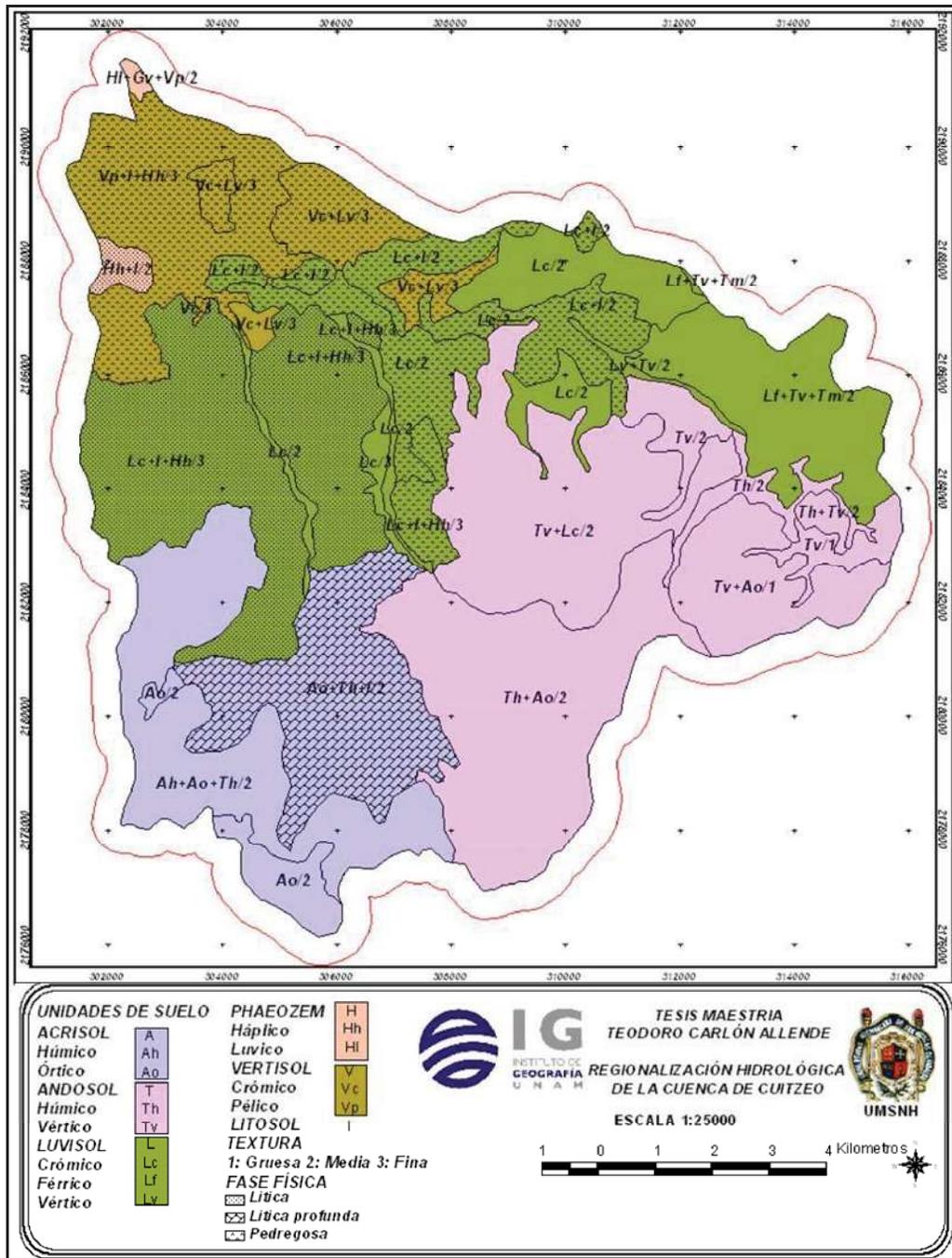


Figura 29. Mapa de tipos de suelos presentes en la subcuenca de Queréndaro

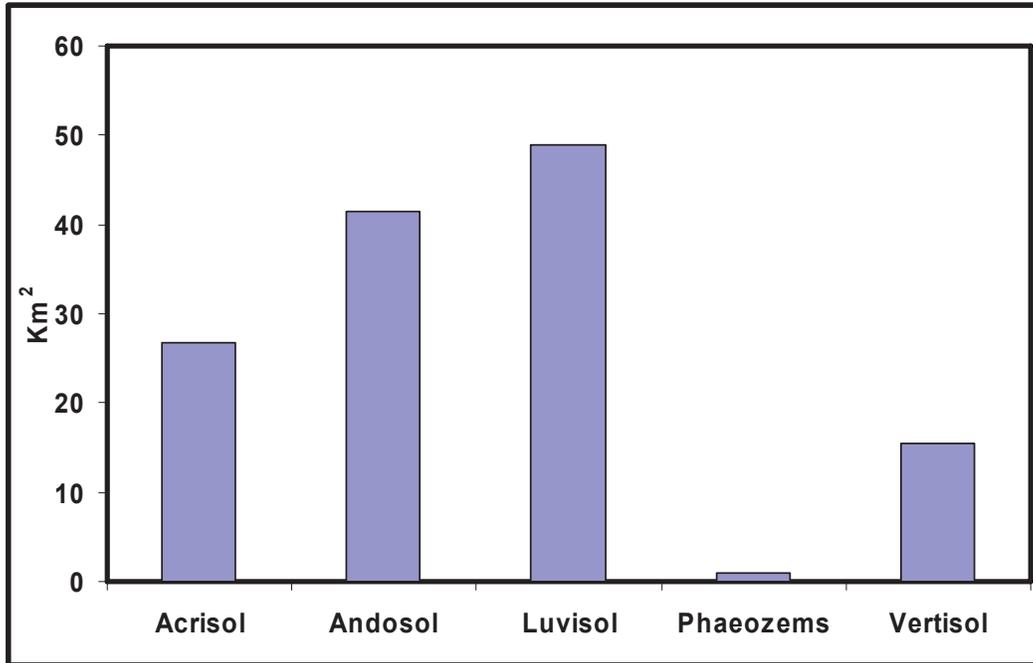


Figura 30. Abundancia proporcional de tipo de suelo presentes en la subcuenca de Queréndaro

Las características biofísicas de la subcuenca de Queréndaro definen dos ambientes, el primero se localiza en la porción baja y esta representado por matorral y agricultura, mientras que en la parte alta se encuentra una cobertura de bosque mixto (pino-encino y encino-pino).

La subcuenca de Queréndaro presenta una cobertura vegetal que va desde el matorral hasta el bosque de pino-encino. La cobertura que predomina es la de bosque mixto (pino-encino, encino-pino), 76 km² (58%, Figura 31 y 32); cultivos de temporal, 24 km² (18%), matorral-pastizal, 17 km² (12%); matorral cerrado, 6 km² (5%) y pastizal con 3 km² (2%; Figura 31 y 33). El resto se encuentra cubierto por bosque de pino, plantaciones de pino, asentamientos humanos, huertas, eucaliptos, suelo desnudo, terrenos baldíos, bosque de encino y bordos que cubren el (5%) del área de la subcuenca (Figuras 31 y 33).

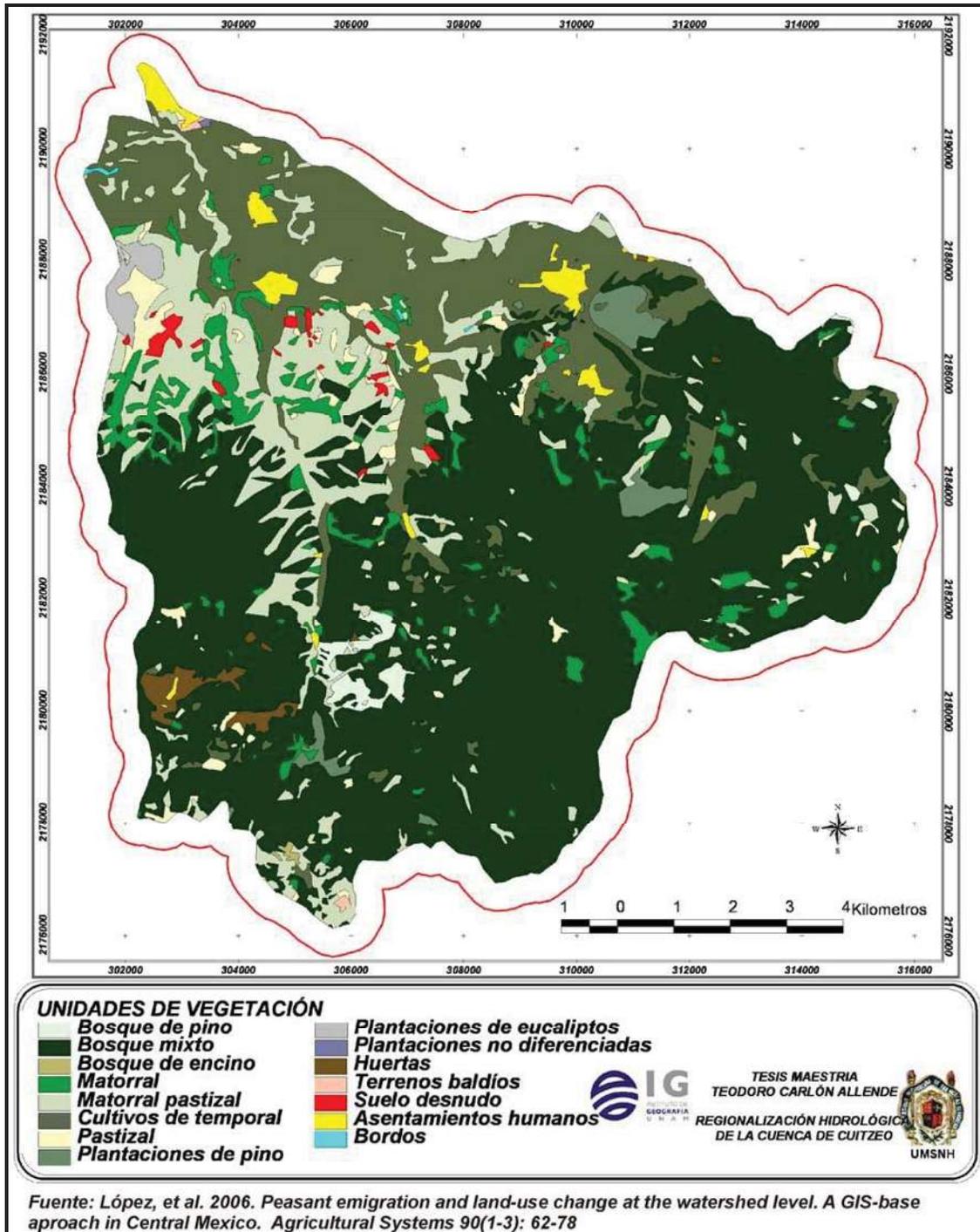


Figura 31. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca de Queréndaro



Figura 32. Bosque típico en la parte alta de la subcuenca de Queréndaro.

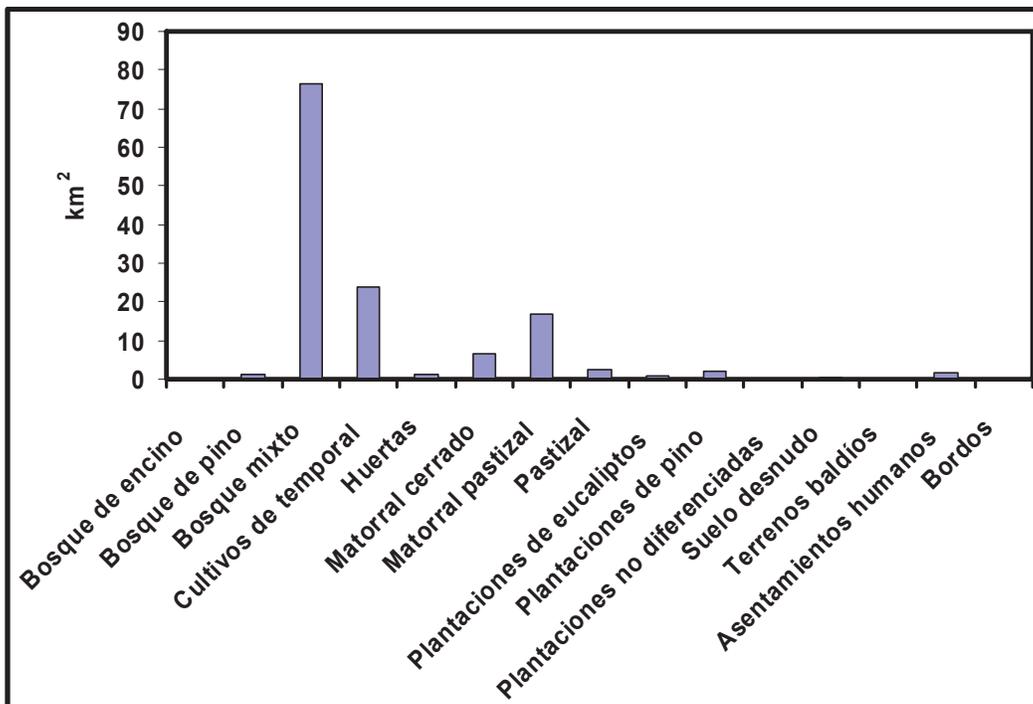


Figura 33. Cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca de Queréndaro

3.3. CONCLUSIONES

Con respecto a la matriz de confusión su interés radica en su capacidad para reconocer los conflictos entre categorías. De esta forma, no sólo se conoce, la clasificación que asigna los números de polígonos correctos del total, sino también la confiabilidad para cada una de las clases y las principales confusiones estas clases.

Los principales problemas que se presentaron surgieron entre las categorías espectralmente similares: matorral-pastizales y matorral abierto (muy confuso con la clase pastizal – matorral, como es lógico en una cubierta de transición).

En el caso de las unidades geomorfológicas se presentaron confusiones entre las colinas y los lomeríos.

De las tres subcuencas consideradas de referencia la subcuenca de San Marcos está conformada principalmente por conos de lava, basaltos y andesitas, sobre los que se desarrollan Vertisoles ya que se encuentran en las partes planas, los cuales son de buena calidad para la agricultura y de acuerdo a sus características de textura y físicas se infiere que poseen una alta capacidad de retención de humedad, por lo que en ella existe agricultura tanto de temporal como de riego, y crecimiento de matorral y pastizal.

La subcuenca de Umécuaro está constituida predominantemente por depósitos superficiales y conos andesíticos, con desarrollo predominante Andosoles cubiertos por vegetación de matorral cerrado, bosque de mixto de pino-encino y huertas, la actividad más importante es la agricultura de temporal y deforestación que posteriormente se convierten en espacios para huertas.

La subcuenca de Queréndaro está conformada por basaltos y dacitas, conos andesíticos y depósitos de caída sobre los que se desarrollan Luvisoles, Andosoles y Acrisoles. Esta es la unidad más conservada ya que no presenta importantes superficies expuestas a deforestación. Adicionalmente la agricultura de temporal ocupa una superficie muy reducida; los tipos de cobertura vegetal y uso de suelo predominante son bosques de pino-encino, los cuales se encuentran en la parte de la montaña, mientras que en la porción baja se presenta matorral y agricultura. Las unidades de relieve más importantes son las laderas escarpadas en sierras que es donde se encuentra la cobertura vegetal de pino-encino, así como también se observa una densidad de disección muy marcada y densa.

3.4. BIBLIOGRAFÍA

1. Aronoff, S, 1982. *Classification accuracy: A user approach, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 48. Citado en Chuvieco, E. Fundamentos de Teledetección Espacial 1990.
2. Berry, B.J. y A.M. Baker, 1968. *Geographic Sampling*. En B.J. Berry y D.F. Marble, Spatial Analysis, Englewood Cliffs.
3. Campbell, J.B., 1987. *Introduction to Remote Sensing*. New York. The Guilford Press.
4. Chuvieco, E. y J. Sancho. 1986. *Tratamiento Visual y digital de las Imágenes Espaciales*. Aplicación docente, Didáctica Geográfica.
5. Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp, S.A. Madrid.
6. Congalton, R.G. 1988. *Comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 54: 593-600.
7. Dozier, J. y A.H. Strahler. 1983. *Ground investigations in support of remote sensing*. Manual of Photogrammetry, pp. 959-986.
8. ESRI. 1999. *ArcView 3.2*, GIS. Environmental Systems Research Institute, Inc
9. Fitzpatrick –Lins, K. 1978. *Accuracy and consistency comparisons of land use and land cover maps made from high altitude photographs and Landsat multispectral imagery*. Journal Research U.S. Geological Survey 6.
10. Ginevan M.E. 1978. *Testing land-use map accuracy. Another look, Photogrammetric*. Engineering and Remote Sensing 45 (10): 1371-1377.
11. Hord, R.M. y W. Brooner. 1976. *Land use map accuracy criteria*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 42: 671-677.
12. López G. E., G. Bocco M. E. Mendoza, A. Velásquez y R. Aguirre, 2006. *Peasant emigration and land-use change at the watershed level. A GIS-based approach in Central Mexico*. Agricultural Systems 90 (1-3): 62-78
13. Mendoza, M. E., 2002. *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica.

14. Owe, M. y J. Ormsby. 1984. *Improved classification of small scale urban watershed using Thematic Mapper simulator data*. International Journal of Remote Sensing 5: 761-767.
15. Pasquaré, G., L Ferrari, V.H. Garduño, A. Bibaldi y L. Vezzoli, 1991. *Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México*. Map and Chart Series MCH072. Geological Society of America.
16. Rosenfeld, G.H. 1982. *Sample desing for estimating change in land use and land cover*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48: 793-801.
17. Todd, W.J., D.G.Gehring y J.F.Haman. 1980. *Land sat wildland mapping accuracy*. Photogrammetric Enginneering and Remote Sensing 46: 509-520.
18. Van Genderen, J.L. 1978. *Guidelines for using Landsat data for rural land use surveys in developing countries*. ITC Journal 1: 30-49.

3.5. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS

19. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Cuitzeo*. E14 A13, escala 1:50,000,
20. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Morelia*. E14 A23, escala 1:50,000
21. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Tzitzio*. E14 A24, escala 1:50,000
22. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Zinapécuaro*. E14 A14, escala 1:50,000
23. INEGI. 1982. *Carta de edafología. Coeneo de la Libertad*. E14 A12, escala 1:50,000
24. INEGI. 1982. *Carta de edafología. Villa Madero*. E14 A33, escala 1:50,000
25. INEGI. 1983. *Carta de edafología. Maravatio*. E14 A15, escala 1:50,000

4. CARTOGRAFÍA GEOPEDOLÓGICA APLICADA AL CÁLCULO DE INFILTRACIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

La pedología es la rama de la geografía que estudia el suelo en especial lo concerniente a los procesos edáficos de formación, clasificación y taxonomía, y su relación e interacción con el resto de los factores geográficos en la dinámica del ciclo geográfico (<http://es.wikipedia.org/wiki/Pedolog%C3%ADa>)

El enfoque geopedológico para el levantamiento de suelos fue desarrollado por Zinck (1988) y es esencialmente una aplicación sistemática del análisis geomorfológico para el mapeo de suelos. Este enfoque puede ser utilizado para cubrir áreas grandes rápidamente, especialmente si la relación geomorfología-suelos es cercana. Depende la exactitud o apego a la realidad de dos hipótesis:

1. Los límites dibujados a través del análisis del paisaje separan la mayor variación en los suelos; para hacerlo mejor requerirá un muestreo exhaustivo. Este será el caso si son dominantes los tres factores formadores del suelo (material parental, relieve, tiempo). El interpretador debe formar un modelo mental correcto basado en la geomorfología (relaciones suelo-paisaje) y aplicarlo correcta y consistentemente (Rossiter, 2002).
2. Las áreas de muestreo son representativas; su patrón de suelo puede ser confiablemente extrapolado a unidades de mapeo no visitadas. Adicionalmente, el enfoque geopedológico tiene ventajas en la construcción y estructuración de la leyenda. Es un sistema de leyenda jerárquico; una vez que las líneas son dibujadas a un nivel categórico, ellas se mantienen, incluso si los suelos en unidades adyacentes tienen la misma clasificación. Esto se debe a las muchas interpretaciones que están relacionadas a las geoformas (Rossiter, 2002).

El propósito de la cartografía integrada consiste en generar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos, la estructura, composición y dinámica de los suelos y agua, así como de los fenómenos naturales relacionados (Meijerink, 1988; Zinck, 1988). De esta manera los mapas elaborados no son únicamente documentos científicos en sí mismos, sino también valiosas herramientas en la evaluación de recursos naturales. El método reconoce una concepción sistémica de las unidades de relieve; es decir, los atributos de cada unidad presentan distintos tipos de procesos de modelamiento por efecto de las condiciones climáticas controladas por el tipo de roca, suelos y cobertura. En consecuencia, cada unidad tiene una función ecológica distribuida en el espacio. De este modo, la

cartografía es útil porque la información geopedológica proporciona el marco espacial georreferenciado de aplicación de las distintas políticas de uso y manejo de recursos naturales (Mendoza y Bocco, 1998a, Gallant et al., 1989; Mendoza y Bocco, 1998b). En este sentido se tratará de estimar la capacidad de infiltración para las unidades geopedológicas; la infiltración se entiende como el proceso en el cual el agua de lluvia o de riego penetra desde la superficie del suelo, mientras que la capacidad de infiltración da la máxima velocidad bajo la cual la infiltración ocurrir. Durante la primera etapa del proceso las velocidades de infiltración son altas, pero gradualmente van decreciendo hasta un valor relativamente constante, este valor se define como infiltración básica y aproximadamente es igual a la conductividad hidráulica saturada (Brady y Weil, 2002). Algunos de los factores que intervienen y lo afectan son la cobertura vegetal, la porosidad (Cuadro 1), y la conductividad hidráulica así como el contenido de humedad en el suelo, de ahí su importancia en el balance hídrico, ya que la infiltración se puede considerar que forma parte de las abstracciones en dicho balance (Chow, *et al.*, 1994).

Cuadro 1. Valores estimados de la porosidad (%), según Sanders (1998), y Freeze y Cherry (1979)

Arcillas	40 a 60
Limos	35 a 50
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50
Arenas gruesas	21 a 50
Grava	25 a 40
Areniscas	5 a 35
Caliza, dolomías no carstificadas	0.1 a 25
Caliza, dolomías carstificadas	5 a 50
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0.01 a 1
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10

Por las características mencionadas, el mapa geopedológico puede considerarse como un modelo geográfico que integró datos relacionados con el funcionamiento hídrico de las cuencas y en consecuencia este documento fue utilizado para estratificar la toma de muestras asociadas a las pruebas de infiltración. Ya que la infiltración del agua en el suelo juega un papel de primer orden en la relación lluvia escurrimiento y, por lo tanto, es de fundamental importancia describirla utilizando diversos parámetros que puedan ser usados como elementos de entrada a los modelos hidrológicos. Con este propósito se realizó un análisis para determinar y evaluar bajo condiciones de campo algunos parámetros que explican la infiltración, tales como cobertura vegetal y uso de suelo, geomorfología, suelos y geología.

a. Objetivos

- ❖ Construir un mapa geopedológico de las subcuencas de Umécuaro, Queréndaro, y San Marcos que describa de manera integrada las características físicas de las subcuencas.
- ❖ Determinar las diferencias en la capacidad infiltración en las unidades geopedológicas en las subcuencas en estudio

b. Materiales y método

Para la elaboración del mapa geopedológico se integraron bases de datos existentes:

- ❖ Geología (Pasquarè et al., 1991; escala 1:300,000)
- ❖ Geomorfología (Mendoza et al, 2002; escala 1:50,000)
- ❖ Edafología (INEGI, 1979, 1982, 1983; escala 1:50,000)

La integración de las bases de datos espaciales de las subcuencas de San Marcos, Umécuaro y Queréndaro, se realizó utilizando herramientas propias de los SIG's, específicamente se utilizó el programa ArcView (ESRI, 1999).

La secuencia de operaciones básicas fueron las siguientes (Figura 1):

- ❖ Integración de los datos geomorfológicos y geológicos a partir de la intersección de las bases de datos mencionadas.
- ❖ La nueva base de datos se integró con los datos de suelos a través de su intersección con el mapa edafológico.
- ❖ El mapa resultante fue generalizado espacialmente eliminando aquellas áreas que no cumplían con el área mínima cartografiable de 2 ha.

Las características que distinguen a las unidades de relieve utilizadas en su delimitación y que forman parte de la leyenda fueron:

Litología: Las rocas en las cuales se desarrolla el relieve están íntimamente relacionadas al origen de las formas y los procesos que en la actualidad los modelan. La información geológica básica fue extraída de la cartografía temática (Pasquarè et al., 1991).

Pendiente: La inclinación del relieve permite distinguir las diferentes formas de modelado y los procesos que en el se desarrollan.

Tipos de suelo: La génesis de los suelos está íntimamente relacionada con la forma del relieve en que se desarrollan, debido a que la roca o sedimento que constituye el sustrato, conocido como roca madre, se transforma por procesos exógenos

(intemperismo), y la presencia de diferentes pendientes, en las cuales los procesos pedogénicos varían. Los tipos de suelos fueron consultados en la cartografía temática de INEGI.

El trabajo de campo consistió básicamente en la ejecución de recorridos de verificación y validación de la interpretación de la cartografía. Se realizaron tres salidas de verificación de las unidades geomorfológicas, edáficas y geológicas (7 días) y tres salidas de validación de la cartografía integrada (30 días). El total de días en campo fue de 37. Posteriormente se realizaron las pruebas de infiltración para lo cual se realizó y se determinó lo siguiente:

Capacidad de infiltración

Las pruebas de infiltración se realizaron para poder determinar que tan permeable es nuestra área de estudio tomando en cuenta la información de rocas, relieve y suelos, al igual que las prácticas de manejo en el campo que afectan la velocidad de penetración del agua de lluvia en el suelo.

Los factores más importantes que afectan la velocidad o tasa de infiltración son (Aparicio 2004; Chow *et al.*, 1994):

- ❖ Características físicas (textura) del suelo
- ❖ Carga hidráulica o lámina sobre la superficie del suelo
- ❖ Contenido de materia orgánica en el suelo
- ❖ Contenido de humedad del suelo (inicial y a saturación)
- ❖ Temperatura del suelo y del agua
- ❖ Cobertura vegetal
- ❖ Uso del suelo
- ❖ Compactación

Para determinar los datos básicos de infiltración se empleó el infiltrómetro de doble anillo, que consiste de un anillo externo de 35 cm de diámetro y uno interno de 29 cm. de diámetro, respectivamente (Naeth, *et al.*, 1991).

Los materiales utilizados en las pruebas de infiltración fueron los siguientes:

- c. Dos anillos de metal (dos tubos de 29 cm de diámetro y 30 cm de largo y otro tubo de 35cm de diámetro y 30 cm de largo; los tubos fueron afilados por uno de sus extremos).

- d. Una regla de 30 cm para medir la profundidad a la que se entierra el anillo y lo que queda descubierto del anillo, además para colocar la regla en la parte interior del tubo pequeño para detectar las variaciones en el nivel del agua.
- e. Plástico para colocarlo al interior del tubo como molde antes de llenarlo de agua.
- f. Recipientes de plástico (19 Litros de preferencia) para vaciar agua a los tubos.
- g. Garrafones de diferentes capacidades para llevar agua a campo ya que algunas áreas donde se realizaron las pruebas requirieron de un volumen mayor de agua por su alta permeabilidad
- h. Una libreta de campo para llevar a cabo las anotaciones de la cantidad de agua infiltrada y el tiempo.
- i. Un reloj cronómetro para registrar el tiempo de infiltración.

Para llevar a cabo las pruebas se siguió el siguiente procedimiento (Figura 1):

- ❖ Se ubicaron los lugares representativos en campo con base en la cartografía geopedológica, evitando bordes de caminos, huellas de llantas, fracturas en el suelo, etc.
- ❖ Primeramente se colocó el tubo pequeño, teniendo cuidado de que se enterrara suave y uniformemente a una profundidad aproximadamente de 5 cm. De esta misma manera se introdujo el tubo de diámetro mayor.
- ❖ Se colocó una regla dentro del tubo chico la cual permitió medir el nivel del agua.
- ❖ Se forró la parte interior del tubo chico con plástico y al mismo tiempo se fué vertiendo lentamente el agua dentro del tubo, procurando que el agua permaneciera sobre la lámina de plástico y que no escurriera por los lados. Teniendo el nivel requerido de agua se llenó el tubo grande al mismo nivel que el chico.
- ❖ Se retiró suavemente la lámina de plástico que esta dentro del tubo chico, esto se hizo lo más rápido posible. Se registró el tiempo desde el momento en que el agua tocó el suelo.
- ❖ Para llevar a cabo los registros se establecieron un rango (1, 2, o 3 min) las siguientes mediciones se realizaron a cada 10 o 20 minutos dependiendo de la capacidad de infiltración del suelo.
- ❖ Cuando el agua se infiltró muy rápido se recargo de inmediato, de tal manera que el tirante no variara mucho.

Se hipotetizo que la velocidad de infiltración depende principalmente de los tres factores mencionados anteriormente, pero también de la pendiente del terreno y de la humedad del suelo como es muy común encontrar diferentes contenidos de humedad en el suelo, por ello fue necesario determinar la densidad aparente en todos los sitios.

Densidad aparente

El suelo como todo cuerpo poroso tiene dos densidades. La densidad real que depende de las partículas sólidas y la densidad aparente que incluye sólidos y poros, ambas densidades están definidas en volumen estándar.

La densidad aparente refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos pues refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire. También es un dato necesario para transformar muchos de los resultados de los análisis de los suelos en el laboratorio.

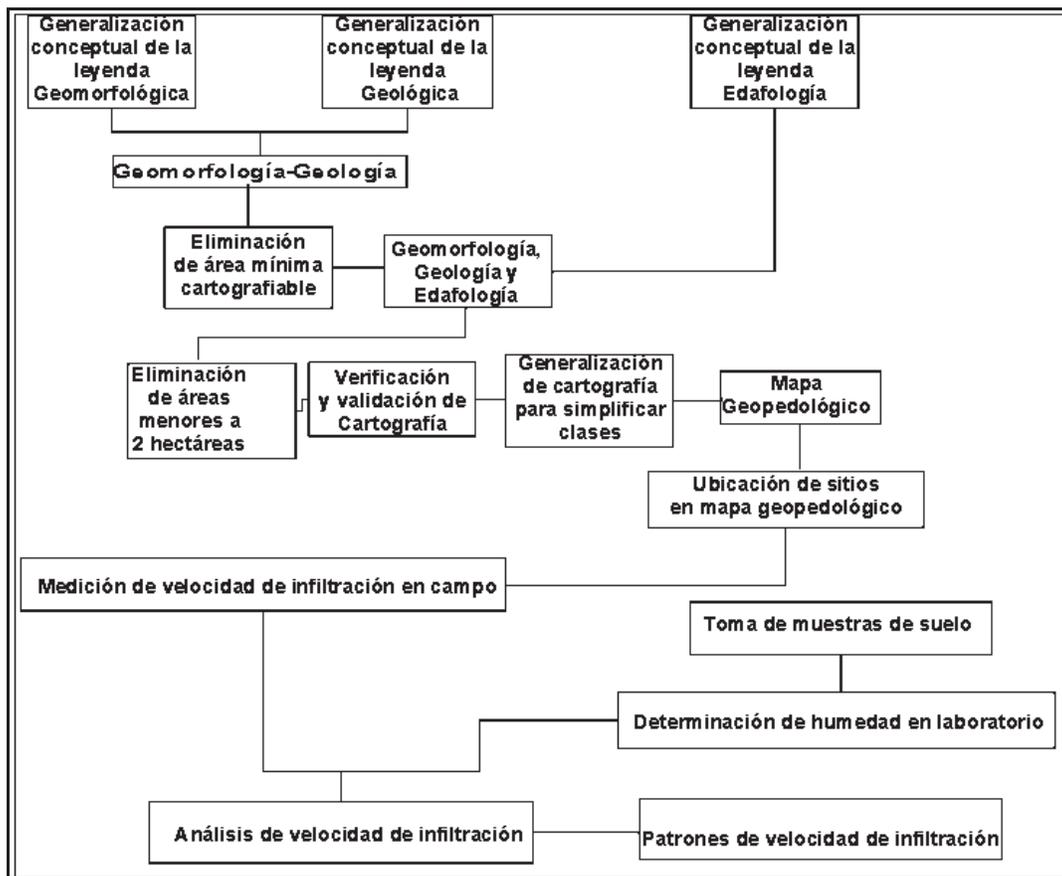


Figura 1. Diagrama de los pasos de la metodología para la realización de la cartografía geopedológica y las pruebas de infiltración

Para llevar a cabo la toma de muestras se requirió de los siguientes materiales:

- ❖ De un densímetro, que consta de una varilla cromada, con una rosca por un lado.

- ❖ Tres anillos de 5.5 cm. de diámetro, de diferentes tamaños de largo; primer tubo 1cm segundo tubo 5 cm y tercer tubo 2 cm.
- ❖ Un martillo el cual se adapta a la varilla.
- ❖ Frascos de 250 ml.
- ❖ Una báscula de precisión AOHUS con 4 dígitos.
- ❖ Una estufa.

Obtención de muestras para la determinación del contenido de humedad.

- ❖ Los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración fueron los mismos donde se tomaron las muestras de suelo para determinar la humedad.
- ❖ A la varilla se le adaptó un tubo dentro del cual se colocaron los tres tubos de diferentes volúmenes.
- ❖ Se colocó la varilla con los tubos adaptados en el suelo y se inició a golpear con el martillo. De tal manera que los tubos quedaron enterrados, y llenos de la muestra de suelo.
- ❖ Se extrajeron los tubos con la muestra, la que se utilizó para determinar la humedad fue la del anillo del medio que fue el de 5.5 cm de diámetro por 5 cm de largo y finalmente la muestra se colocó en un frasco.
- ❖ Se llevó al laboratorio la muestra donde se peso incluyendo el recipiente que lo contenía para conocer el peso inicial
- ❖ Se colocó a la estufa a 105° por 24 h para secarla.
- ❖ Se sacó y se pesó con todo y frasco, posteriormente se sacó del frasco y se pesó el frasco sin muestra.

Para conocer el porcentaje de humedad se calculó el peso húmedo con frasco y después el peso seco con frasco y luego el peso del frasco. El peso del frasco se restó al peso húmedo y peso seco. La diferencia del peso húmedo y seco restado, el peso del frasco será la humedad. Para conocer el % de humedad se realizó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso suelo húmedo} - \text{Peso suelo seco}}{\text{Peso suelo seco}}$$

La determinación de la humedad permitió conocer el valor porcentual de humedad en cada uno de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración, ya que la humedad es uno de los factores que interviene en la capacidad y velocidad de infiltración del suelo.

4.2. RESULTADOS

a. Generación de cartografía geopedológica.

La subcuenca de San Marcos está descrita por 154 polígonos, agrupados en 70 categorías geopedológicas (Figura 2). La categoría más representativa corresponde piedemontes medios conformados por conos de lava y desarrollo de Vertisoles (18%); seguida mesas sobre lomeríos altos formadas por ignimbritas y desarrollo de Vertisoles (11 %); laderas suaves en lomeríos altos sobre basaltos y andesítas con desarrollo de Vertisoles (11%); laderas inclinadas en lomeríos altos sobre conos de lava y desarrollo de Luvisoles (6%); piedemontes suaves sobre conos de lava y desarrollo de Andosoles (5%); planicies sobre depósitos superficiales con Vertisoles (4%); laderas inclinadas de lomeríos altos sobre basaltos y andesítas con Vertisoles (4%); piedemonte inferior en conos de lava con Vertisoles (3%); mesas en lomeríos altos sobre basaltos y andesítas con Vertisoles (3%); laderas suaves en lomeríos altos sobre ignimbritas con Vertisoles (3%); planicie fluvial sobre depósitos superficiales con Vertisoles (3%); Vertisoles sobre basaltos y andesítas en lomeríos altos con laderas muy suaves (3%); laderas inclinadas en lomeríos altos sobre ignimbritas con Vertisoles (2%) (Figura 2), el 25% restante lo forman las otras unidades que son menores del (1.4%).

La subcuenca de Queréndaro se describe por 74 polígonos, agrupados en 66 categorías geopedológicas (Figura 3). Las categorías más representativas son: laderas escarpadas de montañas con la presencia de conos andesíticos y con Andosoles (21%); laderas escarpadas de montañas con basaltos y dacitas y desarrollo de Acrisoles (12.5%); laderas muy suaves en colinas sobre depósitos de caída y con Luvisoles (9%); laderas escarpadas de montañas con basaltos y dacitas y desarrollo de Luvisoles (8.5%); laderas muy suaves de colinas con depósitos superficiales y Vertisoles (6%); laderas de escarpadas en montañas sobre ignimbritas y con Luvisoles en (5.5%); laderas escarpadas montañas sobre basaltos y dacitas y con Andosoles (5%); el 32% restante lo constituyen las otras categorías geopedológicas (Figura 3).

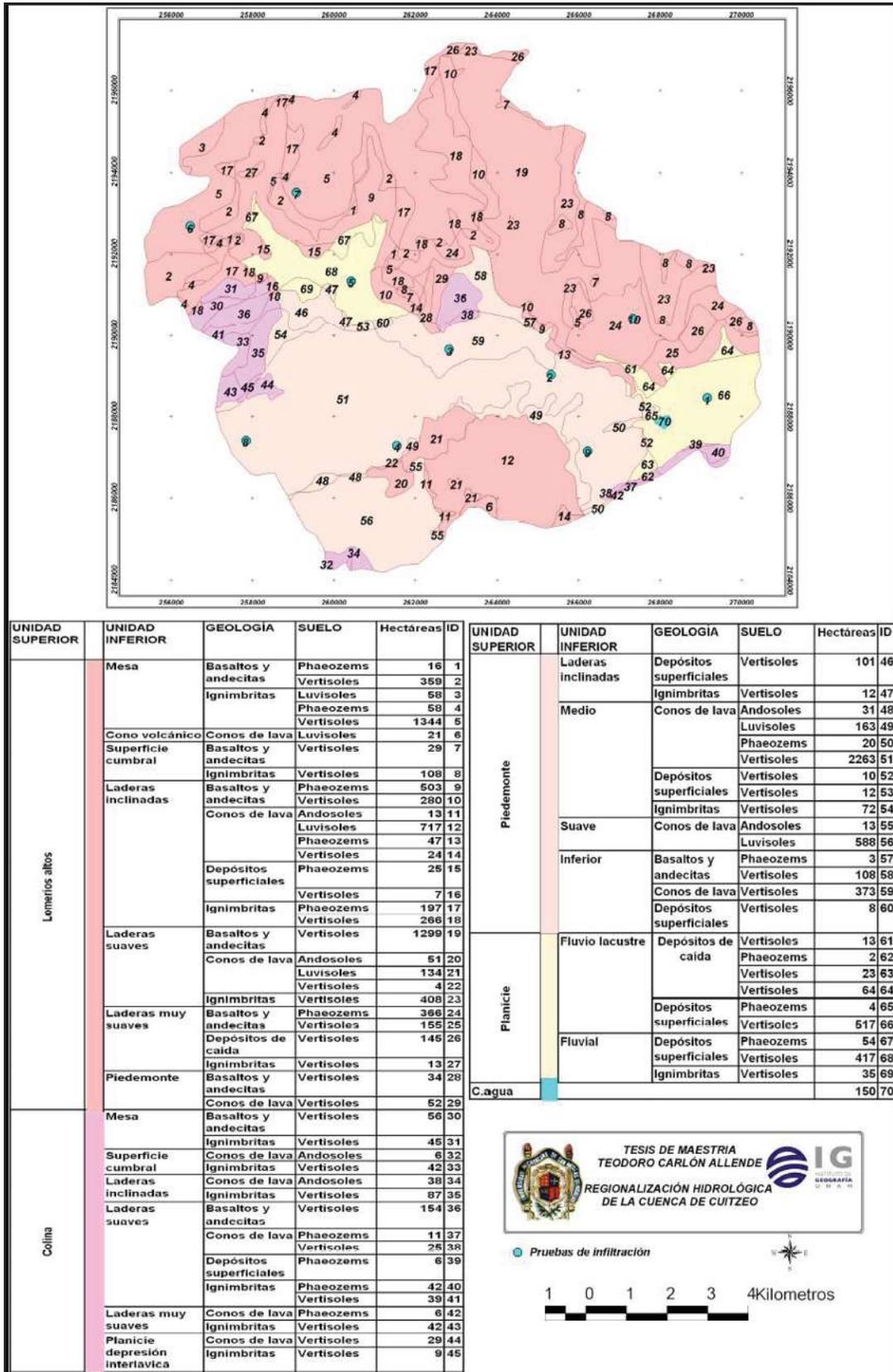
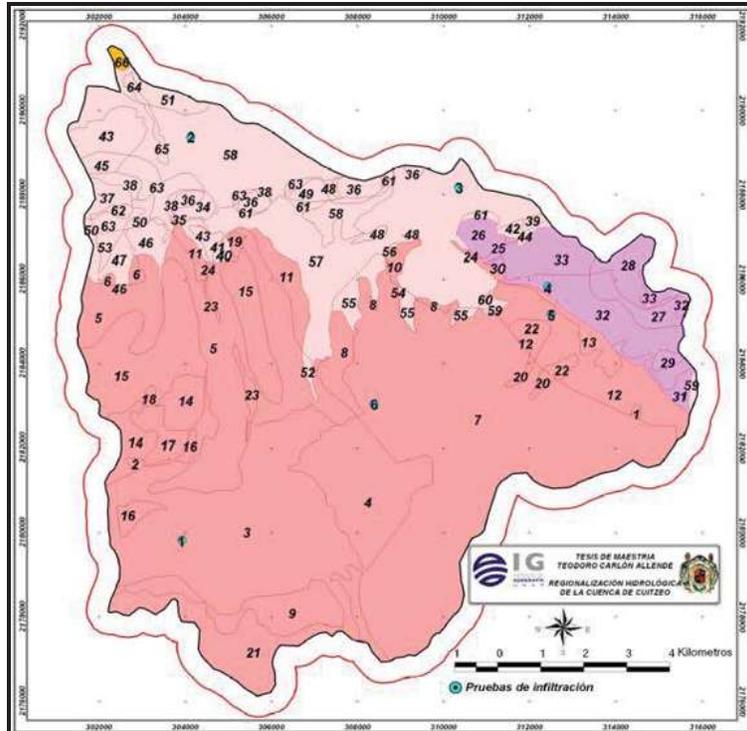


Figura 2. Mapa geopedológico de la subcuenca de San Marcos



UNIDAD SUPERIOR	UNIDAD INFERIOR	GEOLOGÍA	SUELOS	HECTÁREAS	ID
Montaña	Superficie cumbre	Domos andesíticos y reolíticos	Andosoles	6	1
		Ignimbritas	Acrisol	9	2
	Laderas escarpadas	Basaltos y dacitas	Acrisol	1663	3
			Andosoles	629	4
			Luvisoles	1136	5
			Vertisoles	23	6
		Conos andesíticos	Andosoles	2652	7
			Luvisoles	131	8
		Depósitos de caída	Acrisol	274	9
			Andosoles	32	10
			Luvisoles	152	11
		Domos andesíticos y reolíticos	Andosoles	440	12
	Luvisoles		93	13	
	Ignimbritas	Acrisol	206	14	
		Luvisoles	730	15	
	Laderas inclinadas	Basaltos y dacitas	Acrisol	67	16
		Ignimbritas	Acrisol	93	17
		Luvisoles	11	18	
	Laderas suaves	Basaltos y dacitas	Luvisoles	15	19
		Conos andesíticos	Andosoles	29	20
Laderas muy suaves	Depósitos de caída	Acrisol	367	21	
	Domos andesíticos y reolíticos	Andosoles	75	22	
Valle amplio	Basaltos y dacitas	Luvisoles	40	23	
	Depósitos de caída	Luvisoles	22	24	
Lomeríos altos	Cono volcánico	Depósitos de caída	Luvisoles	12	25
		Volcanes monogenéticos	Luvisoles	69	26
	Laderas inclinadas	Domos andesíticos y reolíticos	Luvisoles	99	27
		Domos dacíticos y reolíticos	Luvisoles	120	28
	Laderas suaves	Domos andesíticos y reolíticos	Luvisoles	25	29
		Depósitos de caída	Luvisoles	8	30
	Laderas muy suaves	Domos andesíticos y reolíticos	Andosoles	52	31
			Luvisoles	322	32
		Domos dacíticos y reolíticos	Luvisoles	213	33
	Colinas	Cono	Depósitos de caída	Luvisoles	33
			Vertisoles	7	35
Volcanes monogenéticos		Luvisoles	103	36	
		Phaeozems	54	37	
Mesa		Basalto	Vertisoles	49	38
		Luvisoles	13	39	
Basaltos y dacitas		Luvisoles	10	40	
		Vertisoles	8	41	
Depósitos de caída		Luvisoles	19	42	
		Vertisoles	172	43	
Domos dacíticos y reolíticos		Luvisoles	13	44	
		Volcanes monogenéticos	Vertisoles	42	45
Laderas suaves		Basaltos y dacitas	Luvisoles	75	46
			Vertisoles	81	47
Depósitos de caída		Luvisoles	26	48	
		Volcanes monogenéticos	Luvisoles	42	49
Laderas muy suaves		Basalto	Vertisoles	37	50
		Basaltos y dacitas	Luvisoles	88	51
Basaltos y dacitas		Luvisoles	16	52	
		Vertisoles	30	53	
Conos andesíticos	Andosoles	2	54		
	Luvisoles	121	55		
Depósitos de caída	Andosoles	7	56		
	Luvisoles	1175	57		
Domos andesíticos y reolíticos	Vertisoles	805	58		
	Andosoles	29	59		
Volcanes monogenéticos	Luvisoles	5	60		
	Luvisoles	43	61		
Phaeozems	Phaeozems	18	62		
	Vertisoles	170	63		
Valle estrecho	Basalto	Vertisoles	14	64	
	Depósitos de caída	Vertisoles	20	65	
Planicie	Fluvio lacustre	Depósitos superficiales	Phaeozems	18	66

Figura 3. Mapa geopedológico de la subcuenca de Queréndaro

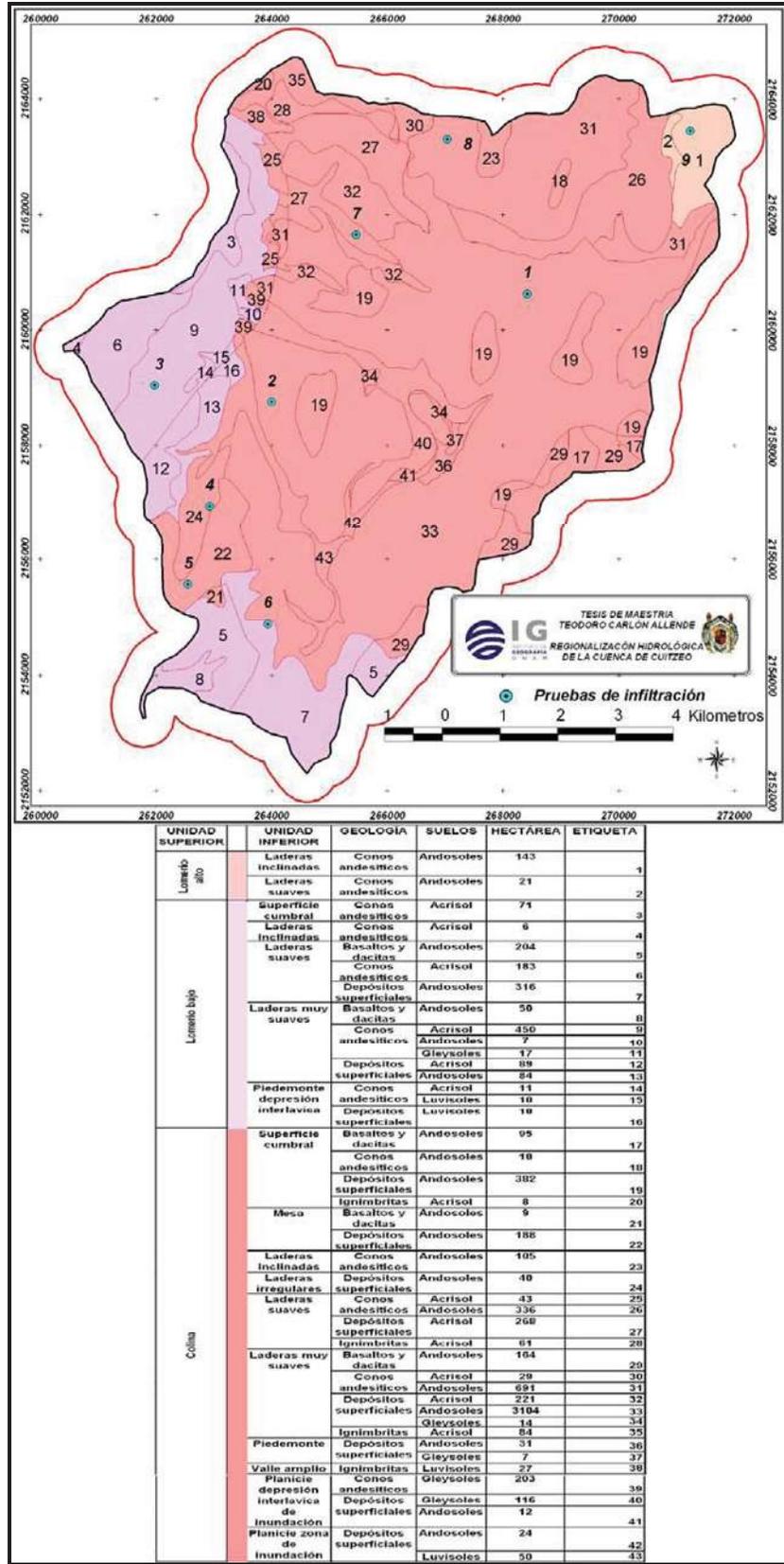


Figura 4. Mapa geopedológico de la subcuenca de Umécuaro

Por último, la subcuenca de Umécuaro está descrita por 66 polígonos, en 43 categorías geopedológicas. Las más representativas son las laderas muy suaves en colinas sobre depósitos superficiales y Andosoles (39%); laderas muy suaves en colinas sobre conos andesíticos y Andosoles (9%); laderas muy suaves en lomeríos bajos sobre conos andesíticos y Acrisoles (6%); superficie cumbre de colinas sobre depósitos superficiales y Andosoles (5%); laderas suaves de colinas en conos andesíticos con Andosoles (4%); laderas suaves de lomeríos bajos sobre depósitos superficiales con Andosoles (4%); laderas suaves en colinas sobre depósitos superficiales con Acrisoles (3%); el 30% restante lo cubren las clases restantes (Figura 4).

b. Medición y cálculo de la capacidad de infiltración

Subcuenca de Umécuaro

En la subcuenca de Umécuaro se realizaron 9 pruebas de infiltración distribuidas en toda la subcuenca (Figura 4). Se llevaron a cabo en diferentes unidades geopedológicas y de cobertura, con intención de obtener información sobre la capacidad de infiltración de las unidades más representativas en la subcuenca, las pruebas se realizaron en el mes de octubre.

Cuadro 2. Porcentaje (%) de humedad de suelo presente en las muestras que se tomaron en la subcuenca de Umécuaro

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO			
No. de prueba	Peso suelos húmedo	Peso suelo seco	% humedad
1	139.46	96.83	44.00
2	146.12	104.23	40.20
3	171.34	127.92	33.90
4	118.80	78.01	52.30
5	147.19	95.30	54.40
6	144.86	88.10	64.40
7	175.38	130.70	34.20
8	144.75	100.55	44.00
9	144.12	101.48	42.00

El área donde se realizó la primera prueba de infiltración fue en un Andosol ubicado en ladera muy suave en colinas con depósitos superficiales. En los primeros 3 min se registró una alta velocidad de infiltración; sin embargo, 15 min después de iniciada la prueba alcanzó el equilibrio Figura 5S1 (Cuadro 3).

El segundo sitio de muestreo correspondió a laderas muy suaves en colinas con depósitos superficiales y tipo de suelo Andosol (Figura 4). En los primeros minutos se presentó una infiltración muy rápida, ya que en el primer minuto se infiltraron aproximadamente 14 mm, después de aproximadamente 55 min se alcanzó el equilibrio, esta prueba se realizó por un tiempo de 140 min como se muestra en la Figura 5S2, y Cuadro 3.

La tercera prueba de infiltración se efectuó en un lomerío bajo con laderas muy suaves sobre conos andesíticos con Phaeozems; en esta unidad durante los primeros 15 min se presentó una alta infiltración pero posteriormente llegó a un punto de equilibrio o de saturación del suelo; esta prueba se realizó por un tiempo de 78 min (Figura 5S3).

La cuarta prueba de infiltración se realizó en una ladera inclinada regular en colinas constituidas por depósitos superficiales con Andosoles (Figuras 4 y 5S4, Cuadro 3). El comportamiento fue muy inestable hasta los 50 min aproximadamente; la prueba se realizó por un tiempo de 108 min.

El quinto sitio donde se efectuó la prueba de infiltración correspondió a una mesa en una colina formada por depósitos superficiales con Andosoles. Esta prueba fue una de las que se llevó más tiempo, ya que la infiltración no alcanzaba el equilibrio; después de una hora el suelo se saturó y alcanzó el equilibrio. La prueba tuvo una duración de 148 min (Figura 5S5, Cuadro 3).

La sexta prueba se llevó a cabo en una ladera suave irregular en lomeríos bajos sobre basaltos y dacitas con Andosoles. La prueba alcanzó un tiempo de 148 min (Figura 5S6, Cuadro 3). En los primeros 15 min se muestra un comportamiento gradual ya que fue muy constante, después de los primeros 15 min el agua seguía infiltrándose de manera muy semejante en los rangos de tiempo.

La séptima prueba fue registrada en una ladera suave irregular en colinas sobre conos andesíticos cubiertos por Acrisoles. En los cinco primeros minutos la infiltración fue muy alta, posteriormente fue bajando uniformemente hasta llegar a un punto de equilibrio (Figura 6S1, Cuadro 3). Esta prueba se realizó por un tiempo de 108 min.

La octava prueba se realizó en una ladera muy suave en colinas formada por depósitos superficiales con Luvisoles. El tiempo que se requirió para realizarse fue de 108 min. En los primeros 5 min se presentó una alta velocidad de infiltración, pero también se saturó después de los 15 min, en este momento la infiltración fue uniforme (Figura 6S2, Cuadro 3).

Cuadro 3 Características biofísicas de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración en la subcuenca de Umécuaru.

No. prueba	1		2		3		4		5		6		7		8		9		
	Cobertura y densidad		Tipo de suelo, textura y fase física		Geología		Geomorfología		% Humedad		Infiltración		Infiltración		Infiltración		Infiltración		
	Bosque mixto semiabierto	Andosol Media	Cultivos de temporal	Andosol media	Acrisol Fina	Bosque mixto cerrado	Andosol media	Bosque mixto cerrado	Andosol media	Bosque mixto cerrado	Andosol media	Bosque mixto cerrado	Acrisol fina	Andosol media	Bosque mixto abierto	Andosol media	Bosque mixto semiabierto	Andosol media	
	Depósitos superficiales	Depósitos Superficiales	Conos andesíticos	Depósitos superficiales	Conos andesíticos	Conos andesíticos	Conos andesíticos	Conos andesíticos											
	Colinas laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Lomerío bajo laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas-laderas muy suaves	Colinas laderas suaves	Colinas laderas suaves	Lomerío alto laderas inclinadas	Lomerío alto laderas inclinadas	
	44.00	40.20	33.90	52.30	54.40	64.40	34.20	44.00	42.00										
	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	min. infiltración	
	1 1,764.71	1 35,306.47	1 2,352.94	1 48,000.00	1 7,647.06	1 4,411.76	1 22,352.94	1 5,882.35	1 9,411.76	1 22,352.94	1 4,411.76	1 22,352.94	1 5,882.35	1 9,411.76	1 5,882.35	1 9,411.76	1 9,411.76	1 9,411.76	1 9,411.76
	2 588.24	2 34470.59	2 2058.82	2 46764.71	2 3823.53	2 2058.82	2 14411.76	2 2058.82	2 2058.82	2 3823.53	2 2058.82	2 14411.76	2 2058.82	2 2941.18	2 2058.82	2 2058.82	2 2941.18	2 2941.18	2 2941.18
	3 588.24	3 31823.53	3 2058.82	3 38441.18	3 3235.29	3 2058.82	3 12647.06	3 2058.82	3 2058.82	3 3235.29	3 2058.82	3 12647.06	3 2058.82	3 2941.18	3 2058.82	3 2058.82	3 2941.18	3 2941.18	3 2941.18
	8 481.93	4 31117.65	8 1686.75	8 3493.98	8 2891.57	8 1987.95	8 9578.31	8 1265.06	8 2951.81	8 2891.57	8 1987.95	8 9578.31	8 1265.06	8 2951.81	8 1265.06	8 1265.06	8 2951.81	8 2951.81	8 2951.81
	13 481.93	5 2352.94	13 1325.30	13 2831.33	13 2469.88	13 1807.23	13 8795.18	13 1144.58	13 1807.23	13 2469.88	13 1807.23	13 8795.18	13 1144.58	13 1807.23	13 1144.58	13 1144.58	13 1807.23	13 1807.23	13 1807.23
	23 359.28	10 2228.92	18 1265.06	18 2710.84	18 1987.95	18 1807.23	18 8433.73	18 1024.10	18 1807.23	18 1987.95	18 1807.23	18 8433.73	18 1024.10	18 1807.23	18 1024.10	18 1024.10	18 1807.23	18 1807.23	18 1807.23
	33 359.28	15 2168.67	28 988.02	28 1227.54	33 1980.00	28 1317.37	33 8220.00	33 810.00	33 1680.00	33 1980.00	28 1317.37	33 8220.00	33 810.00	33 1680.00	33 810.00	33 810.00	33 1680.00	33 1680.00	33 1680.00
	53 360.36	20 1807.23	38 988.02	38 1227.54	48 1650.00	38 1317.37	48 7470.00	48 810.00	48 1200.00	48 1650.00	38 1317.37	48 7470.00	48 810.00	48 1200.00	48 810.00	48 810.00	48 1200.00	48 1200.00	48 1200.00
	73 360.36*	30 1437.13	48 988.02	48 1227.54	68 1621.62	48 1287.43	68 7057.06	68 690.00	68 1200.00	68 1621.62	48 1287.43	68 7057.06	68 690.00	68 1200.00	68 690.00	68 690.00	68 1200.00	68 1200.00	68 1200.00
		40 1377.25	63 810.00	63 630.00	88 1441.44	58 1287.43	78 7005.99	78 600.00*	78 1200.00	88 1441.44	58 1287.43	78 7005.99	78 600.00*	78 1200.00	78 600.00*	78 600.00*	78 1200.00	78 1200.00	78 1200.00
		50 1377.25	78 810.00*	78 630.00	118 1380.00	68 1227.54	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35	118 1380.00	68 1227.54	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35	88 6826.35
		65 1290.00		93 420.00	148 1140.00*	88 1201.20	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31	148 1140.00*	88 1201.20	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31	98 6347.31
		80 1290.00		108 420.00*		108 1171.17	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 1171.17	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*	108 5808.38*
		110 1110.00				128 1141.14		128 1141.14	128 1141.14			128 1141.14		128 1141.14			128 1141.14		128 1141.14
		140 1050.00*				148 1111.11*		148 1111.11*	148 1111.11*			148 1111.11*		148 1111.11*			148 1111.11*		148 1111.11*

Nota: * corresponde a la infiltración básica

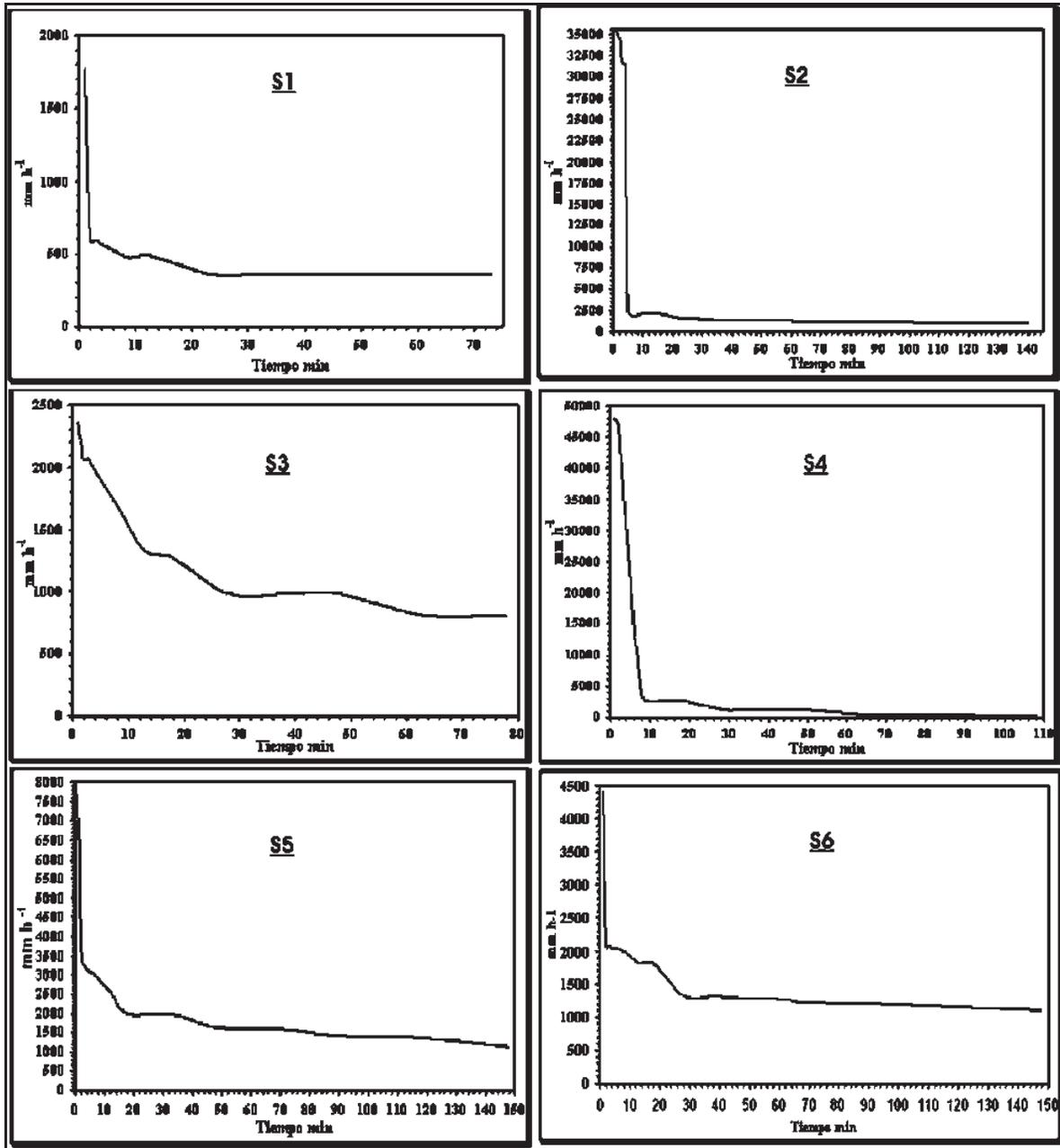


Figura 5. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de Umécuaro

La novena prueba de infiltración se realizó en una ladera inclinada en un lomerío alto conformado por conos andesíticos que forman Andosoles. Las pruebas que requirieron menos tiempo fueron la primera y la tercera, debido a que el suelo a los primeros minutos se saturaba y alcanzaba un equilibrio; se requirió de 78 min para la realización de la prueba, en los primeros 3 min, se presentó una alta infiltración; sin embargo, después de este tiempo la infiltración se redujo considerablemente, y a los 34 min ya se había estabilizado (Figura 6S3, Cuadro 3).

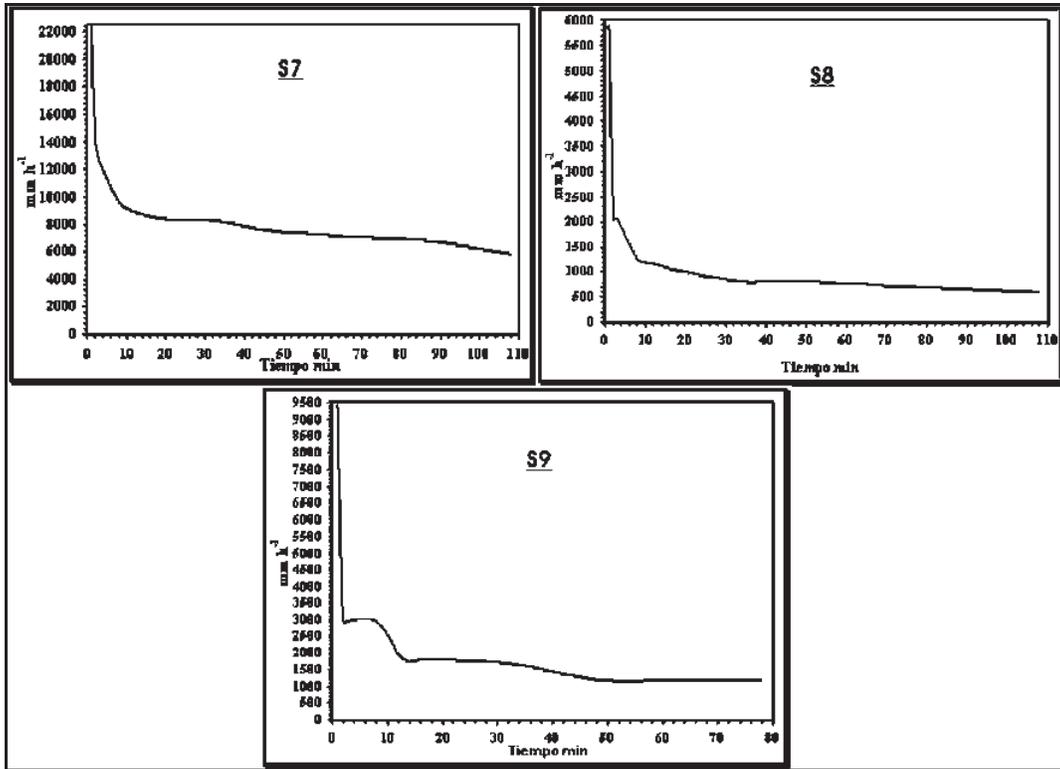


Figura 6. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de Umécuaro

De acuerdo con las pruebas realizadas llevadas a cabo en esta subcuenca, es posible generar dos grupos de acuerdo con sus características edafológicas. Dos de las pruebas fueron realizadas en Acrisoles y el resto en Andosoles. De acuerdo con los contenidos de humedad aparentemente los Acrisoles de texturas más finas se encontraban más secos; mientras que los Andosoles que presentaron una textura media se encontraban un poco más húmedos (Cuadros 2, 3).

Con respecto a la capacidad de infiltración en Acrisoles, se presentaron diferencias significativas (Pruebas 3 y 7, Figuras 5S3 y 6S1). Los resultados anteriores pueden atribuirse al tipo de roca y cobertura vegetal. La prueba 3, con menor capacidad de infiltración, se realizó en una zona de cultivos de temporal desarrollados sobre conos andesíticos; mientras que la prueba 7, con mayor capacidad de infiltración, se realizó en un área con bosque mixto, sobre depósitos superficiales; esta prueba se desarrolló sobre suelos con fase física lítica profunda. La información geomorfológica no sugiere ser una variable explicativa debido a que si bien la prueba 3 se desarrolló sobre lomeríos bajos y la prueba 7 sobre colinas, ambas presentan unidades inferiores muy similares, laderas muy suaves (prueba 3) y laderas suaves (prueba 7). Los resultados anteriores sugieren que un sitio con una cobertura de cultivos de temporal presenta diferente capacidad de

infiltración a un sitio con bosque mixto. Durante el uso agrícola del suelo se puede crear una capa compacta que impermeabiliza el suelo, debido a la compactación por el uso de maquinaria durante la labranza y las prácticas de pastoreo, cuando el suelo se encuentra en “descanso”, estas relaciones de uso de suelo y compactación han sido documentadas por Medina, 2006.

Las pruebas realizadas en Andosoles sugieren la posibilidad de generar dos grupos de acuerdo a la cobertura vegetal. Una serie de pruebas se realizaron en bosque mixto y una se realizó en áreas destinadas a cultivos de temporal (Prueba 2). La prueba en cultivos presentó la mayor infiltración, esto puede asociarse a que el sitio donde se realizó fue sometido al uso de maquinaria pesada para preparar las tierras. Esta fue una de las pruebas que requirió mayor tiempo, otra de las razones de su alta infiltración es que los porcentajes de humedad son bajos en comparación con los otros sitios (Cuadros 2 y 3).

La prueba 4 (Figura 5S4), presentó los valores más altos de infiltración; sin embargo, la prueba 5, (Figura 5S5) realizada en un sitio con características similares, no presenta valores de infiltración con el mismo grado de magnitud; lo cual se atribuye a las diferencias en las formas inferiores de relieve; la prueba 4 se realizó en laderas inclinadas irregulares de colinas, con pendientes relativamente pronunciadas, mientras que la prueba 5 se realizó en una mesa de colinas, con menor pendiente.

Las pruebas restantes (8 y 9) en Andosoles presentaron una infiltración semejante. La prueba 1, que fue la que presentó la capacidad de infiltración más baja, puede atribuirse al tipo de cobertura y su manejo (pastoreo).

En general los Andosoles presentaron mayor infiltración que los Acrisoles, excepto cuando los Acrisoles se encontraron cubiertos por bosque mixto cerrado. Es importante mencionar que los Acrisoles presentaron menor porcentaje de humedad que los Andosoles, lo que sugiere una mayor capacidad de absorción de humedad y con ello una mayor velocidad de infiltración (Prueba 7). Por último se observó que los sitios sobre depósitos superficiales presentan mayor infiltración que aquellos sobre conos andesíticos, lo cual debe estar relacionado con las distintas permeabilidades de ambos materiales.

Subcuenca de San Marcos

En la subcuenca de San Marcos se realizaron 10 pruebas de infiltración distribuidas como se aprecia en la Figura 2. Las pruebas se llevaron a cabo en diferentes unidades geopedológicas y de cobertura vegetal y uso del suelo con la intención de

conocer, en una primera aproximación, la capacidad de infiltración de las unidades más representativas en la subcuenca, estas pruebas se hicieron en el mes de enero.

Cuadro 4. Porcentaje (%) de humedad de suelo presente en las muestras que se tomaron en la subcuenca de San Marcos

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO			
No. de prueba	Peso Húmedo	Peso seco	% humedad
1	159.44	105.51	51.10
2	141.86	88.45	60.00
3	159.41	108.09	47.50
4	141.75	102.82	38.00
5	182.40	148.18	23.10
6	168.68	154.75	9.00
7	159.58	142.50	12.00
8	138.17	121.74	13.50
9	147.64	126.16	17.00
10	196.96	179.97	9.40

La primera prueba de infiltración se realizó en una unidad geopedológica de planicies formada sobre depósitos superficiales y con Vertisoles; la prueba requirió de un tiempo de 109 min; en los primeros dos minutos se determinó una velocidad de infiltración muy alta ($16,470 \text{ mm h}^{-1}$; $12,941 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente), en el tercer min, la velocidad disminuyó drásticamente, registrándose una velocidad de $5,882 \text{ mm h}^{-1}$ y posteriormente, entre el minuto 5 y 20 min, se registró una infiltración relativamente estable y en el tiempo restante alcanzo el equilibrio. Esta prueba tiene una de las de mayores velocidades de infiltración de las realizadas en esta subcuenca, como se puede observar en la Figura 7S1 y Cuadro 5.

La segunda prueba de infiltración se realizó en un piedemonte medio formado sobre conos de lava y con Vertisoles. La prueba requirió de un tiempo total de 98 min; en los primeros dos minutos se registró una alta velocidad de infiltración de $2,058$ y $1,352 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente, posteriormente se redujo gradualmente hasta los 70 min aproximadamente (Figura 7S2, Cuadro 5). En el tiempo restante se registró una velocidad de infiltración muy baja, en ese momento el suelo se encontraba prácticamente saturado.

La tercera prueba de infiltración se realizó en una unidad geopedológica de piedemonte inferior sobre conos de lava y Vertisoles, la cual requirió de un tiempo total de 120 min en los primeros tres minutos se registró una velocidad de infiltración muy alta, a partir de este tiempo fue descendiendo uniformemente hasta los 60 min; posteriormente, se observó un descenso muy notorio el cual ocurrió entre los 70 a los 90 min (Figura 7S3,

Cuadro 5). En el tiempo restante se observó que prácticamente el suelo se encontraba saturado.

La cuarta prueba de infiltración se realizó en una unidad geopedológica de piedemonte medio sobre conos de lava y Vertisoles. Esta prueba requirió de un tiempo total de 103 min. En el primer minuto se observó una infiltración de 705 mm h^{-1} , en comparación con las pruebas realizadas anteriormente, en esta prueba se registró la menor velocidad de infiltración en los primeros minutos; en el segundo minuto se presentó un descenso muy brusco, la velocidad fue de 235 mm h^{-1} , posteriormente el comportamiento fue muy uniforme hasta llegar a un punto de equilibrio o de saturación (Figura 7S4).

La quinta prueba se efectuó en una unidad geopedológica de planicie fluvial sobre depósitos superficiales con Vertisoles. Requirió de un tiempo de 108 min. En el primer minuto se registró una velocidad de infiltración extremadamente alta ($2,2941 \text{ mm h}^{-1}$) de hecho fue la prueba que registró la mayor velocidad en el primer minuto. Sin embargo la infiltración de esta prueba pronto se estabilizó, a los 10 min se registró una velocidad de infiltración aproximada de $1,500 \text{ mm h}^{-1}$ (Figura 7S5, Cuadro 5). En los minutos restantes la velocidad descendió uniformemente hasta llegar a su punto de equilibrio.

La sexta prueba de infiltración se llevó a cabo en una mesa en lomerío alto formada por ignimbritas y con Vertisoles. La realización de la prueba requirió de 103 min. En este sitio se registró la menor infiltración de toda la subcuenca. La velocidad en el primer minuto fue de 411 mm h^{-1} ; entre los 2 y 10 minutos registró un descenso notorio en la velocidad (Figura 7S6, Cuadro 5). En el tiempo restante se observó un comportamiento constante, debido a que el suelo llegó al punto de equilibrio.

La séptima prueba de infiltración se realizó en una mesa de un lomerío alto formado por ignimbritas y Vertisoles. Se requirió de un tiempo de 98 min, en el primer minuto se registró una infiltración de 705 mm h^{-1} , en el segundo minuto fue de 588 mm h^{-1} , de los 5 a los 15 minutos se tuvo un descenso notorio y se redujo de 500 mm h^{-1} a 180 mm h^{-1} aproximadamente (Figura 8S1, Cuadro 5). En el tiempo restante se presentó una infiltración muy uniforme.

La octava prueba de infiltración se realizó en un piedemonte medio irregular con conos de lava y Vertisoles; fue una de las que registró la menor infiltración, pero requirió de más tiempo (123 min). Durante los primeros tres minutos se registró una velocidad de infiltración entre 500 y 300 mm h^{-1} (Figura 8S2). En los minutos restantes se presentó una velocidad muy constante, hasta los 70 min, como consecuencia de que el suelo prácticamente se encontraba saturado.

Cuadro 5. Características biofísicas de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración en la subcuenca de San Marcos.

No. Prueba	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		
	Cobertura y densidad	Cultivos de riego	Cultivos de temporal	Matorral pastizal Semiabierto	Matorral pastizal Abierto	Matorral pastizal Abierto	Cultivos de temporal	Pastizal	Pastizal	Pastizal	Pastizal	Pastizal	Pastizal	Pastizal	Matorral pastizal Semiabierto	Matorral pastizal Abierto	Matorral pastizal Abierto	Matorral pastizal Semiabierto	Suelo, textura y fase física	Geología	Geomorfología
	51.10	Dep.superficiales	Vertisol, fina pedregosa	Conos de lava	Vertisol, fina, pedregosa	Vertisol, fina, pedregosa	Conos de lava	Conos de lava	Vertisol, fina, lítica profunda	Vertisol, fina, pedregosa	Vertisol, fina, pedregosa	Conos de lava	Conos de lava	Conos de lava	Vertisol, fina, pedregosa	Vertisol, fina, pedregosa	Vertisol, fina, pedregosa	Basalto y andesitas			
		Planicie fluvio lacustre	Piedemonte medio	Piedemonte inferior	Piedemonte medio	Piedemonte medio	Piedemonte medio	Planicie fluvial	Lomeríos alto	Lomeríos alto	Lomeríos alto	Lomeríos alto	Lomeríos alto	Lomeríos alto	Piedemonte medio	Piedemonte medio	Piedemonte medio	Lomeríos alto			
% humedad		60.00	47.50	38.00	23.10	9.00	12.00	13.50	17.00	9.40											
		min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	infiltración mm h ⁻¹	min	infiltración mm h ⁻¹
	1	16470.59	1	882.35	1	22941.18	1	411.76	1	705.88	1	705.88	1	529.41	1	8823.53	1	8823.53	1	10441.18	1
	2	12941.18	2	1352.94	2	6176.47	2	176.47	2	588.24	2	588.24	2	382.35	2	4705.88	2	4705.88	2	8941.18	2
	3	5882.35	3	880.00	3	3647.06	3	176.47	3	3647.06	3	470.59	3	294.12	3	3235.29	3	3235.29	3	4264.71	3
	6	1800.00	8	500.00	8	373.49	8	132.53	8	1831.33	8	343.37	8	173.65	4	2588.24	4	2588.24	4	3823.53	4
	9	1680.00	13	349.40	13	277.11	13	108.43	13	1180.72	13	240.96	13	101.80	9	2168.67	9	2168.67	7	2470.00	7
	14	1566.27	18	337.35	18	216.87	28	76.00	18	710.84	28	28.00	18	180.72	43	1674.70	14	1674.70	10	2450.00	10
	19	734.94	28	275.45	38	148.48	43	64.00	23	493.98	43	20.00	38	138.14	63	1101.80	24	1101.80	15	1734.94	15
	34	484.00	38	257.49	58	145.45	63	57.06	38	600.00	63	12.01	58	114.11	93	826.35	34	826.35	20	1313.25	20
	49	444.00	58	168.17	88	114.00	83	54.05	53	312.00	83	12.01	78	87.09	123	704.00	49	704.00	30	727.54	30
	69	222.22	78	117.12	118	82.00*	103	54.05*	68	208.00	103	10.51*	98	76.58*		556.00	64	556.00	40	613.77	40
	89	222.22	98	117.12*		195.20			88	195.20						477.48	84	477.48	50	550.90	50
	109	195.20*				192.19*			108	192.19*						396.40*	104	396.40*	70	343.84	70
																			90	211.71	90
																			110	129.13*	110

Nota: * corresponde a la infiltración básica

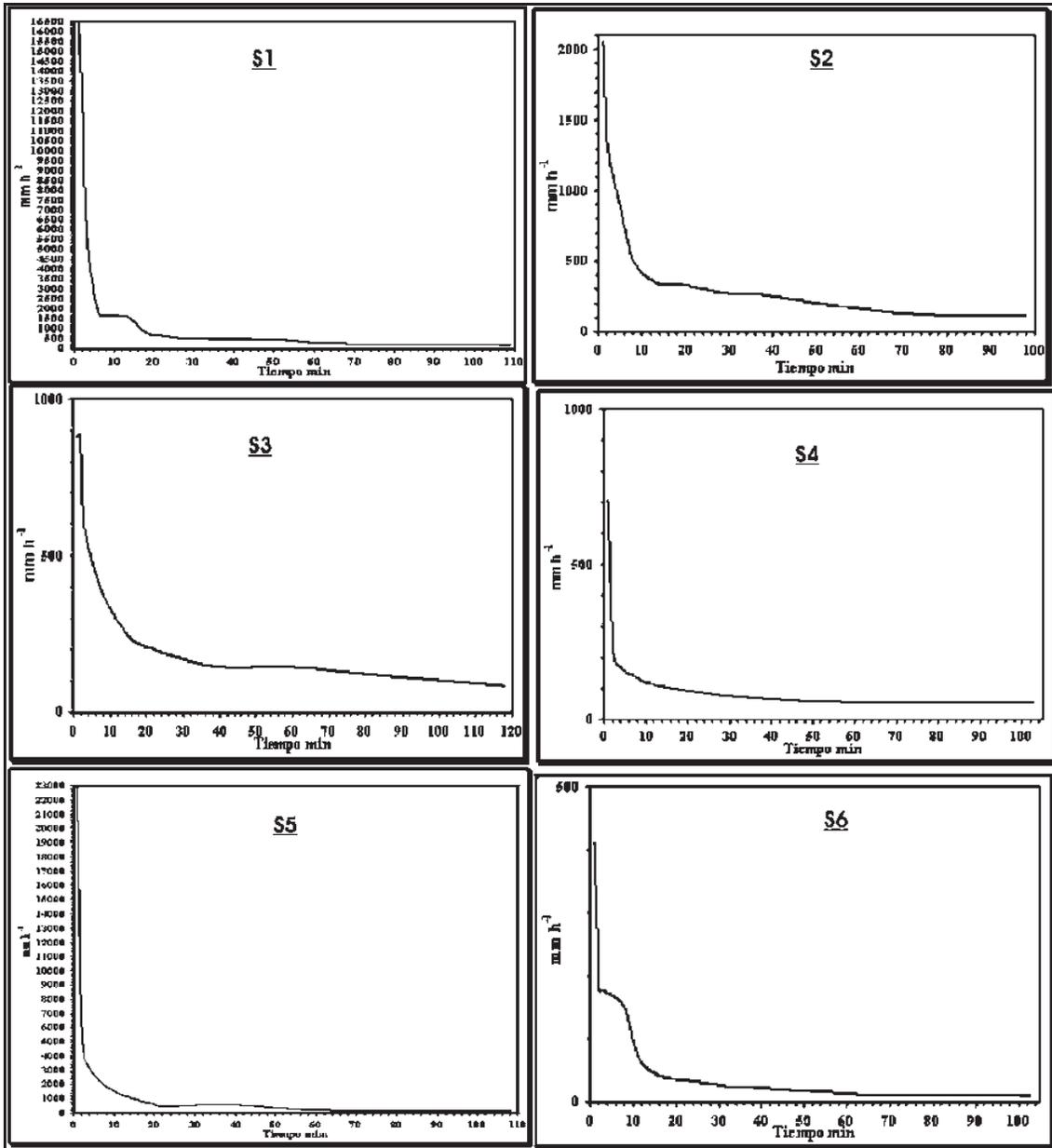


Figura 7. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de San Marcos

La novena prueba se realizó en un de piedemonte medio desarrollado sobre Conos de lava y cubierto por Vertisoles. La prueba requirió de un tiempo de 105 min; en el primer minuto se registró una velocidad de infiltración muy alta $8,823 \text{ mm h}^{-1}$, en los siguientes 10 min, descendió drásticamente hasta $2,000 \text{ mm h}^{-1}$ aproximadamente (Figura 8S3). En el tiempo restante se registró un descenso muy uniforme y fue hasta el final cuando se presentó la saturación del suelo, al llegar a una velocidad de infiltración igual en los rangos de tiempo.

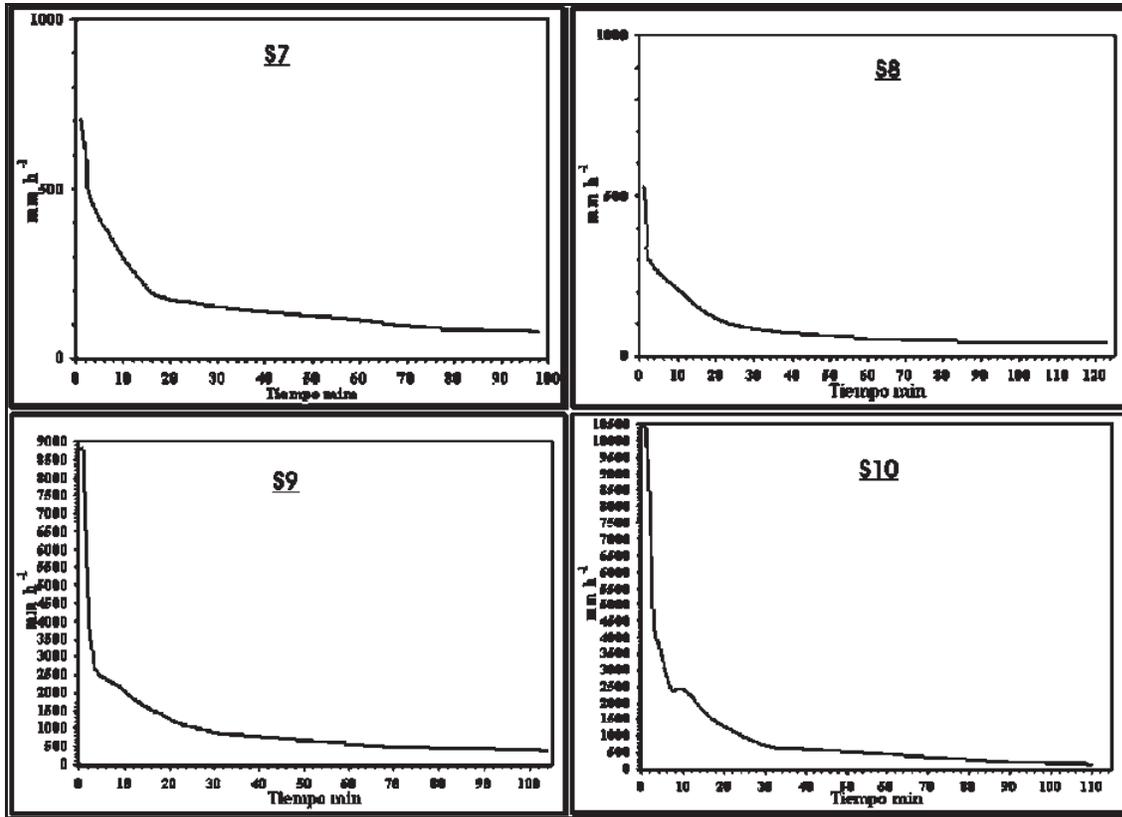


Figura 8. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de San Marcos

La décima prueba se llevo a cabo en laderas muy suaves en lomeríos altos formadas por basaltos y andesitas, sobre Vertisoles. La prueba requirió de un tiempo de 110 min, de los cuales en los primeros dos minutos se registró una velocidad de infiltración muy alta, 4,000 a 10,500 mm h^{-1} (Figura 8S4). Esta fue una de las pruebas con las velocidades de infiltración más altas, aunque en los minutos restantes fue descendiendo. En esta prueba, junto con la prueba tres fue muy difícil alcanzar el punto de saturación del suelo.

De las pruebas realizadas en esta subcuenca se pueden dividir en cuatro grupos de acuerdo a su capacidad de infiltración.

Dentro del primer grupo tenemos las pruebas 1 y 5. Las cuales se realizaron en unidades geopedológicas con cobertura vegetal y textura del suelo muy similares (Cuadro 5). Tenemos que estas pruebas fueron las que presentaron mayor velocidad de infiltración (Figura 7S1 y 7S5). Aunque existen diferencias absolutas en velocidades de infiltración, éstas no son realmente significativas, lo que si es significativo son los porcentajes de humedad (Cuadro 4 y 5).

El segundo grupo está conformado por las pruebas 3, 4 y 8. Todas las pruebas se desarrollaron en piedemontes (medio o inferior), formados por conos de lava y con cobertura de matorral pastizal (semiabierto y abierto). Las diferencias en la infiltración pueden estar asociadas con el contenido de humedad antecedente y al uso de suelo asociado a las coberturas (pastoreo) (Figuras 7S3, 7S4 y 7S2, Cuadro 4 y 5). En términos generales, la infiltración fue moderada.

El tercer grupo está constituido por las pruebas 6 y 7. Estas pruebas se realizaron en unidades geopedológicas y de cobertura similares, la única diferencia está asociada con la fase física detectada en la prueba 7 (lítica profunda).

Las pruebas 9 y 10 forman el cuarto grupo; las cuales muestran algunas diferencias en su capacidad de infiltración, lo cual puede ser debido a las diferencias que presentan en su tipo de rocas y formas de relieve, así como los porcentajes de humedad antecedente (Cuadros 4 y 5). Adicionalmente, es importante mencionar que los basaltos y andesitas son unidades que presentan una alta infiltración debido a su fracturación.

La segunda prueba de infiltración no se incluyó en ningún grupo debido a que fue muy diferente a las demás, de hecho fue la que presentó mayor contenido de humedad.

En general, se concluye que los depósitos superficiales junto con las planicies presentan una alta infiltración, además que los lomeríos con presencia de matorral-pastizal y pastizal presentan bajos contenidos de humedad, estas pruebas de infiltración se realizaron únicamente en Vertisoles, debido a que estos son los suelos más representados en la cuenca (80 %); cabe mencionar que alcanzar las áreas con otros tipos de suelos, menos representativos, fue difícil debido a la falta de accesibilidad asociada con la escasez de vías de comunicación, que permitieran trasladar el agua desde los sitios donde se encuentran los cuerpos de agua.

Subcuenca de Queréndaro.

En la subcuenca de Queréndaro se realizaron 6 pruebas de infiltración distribuidas en toda la subcuenca (Figura 3), las cuales se hicieron en el mes de enero.

La primera prueba de infiltración se realizó en laderas escarpadas de montaña, las cuales están formadas por basaltos y dacitas y sobre las que se desarrollan Acrisoles. La prueba se realizó en un tiempo de 144 min; en el primer minuto se registró una velocidad de infiltración moderada de 676 mm h⁻¹; en los siguientes minutos hasta el 15 aproximadamente se observó un descenso a 450 mm h⁻¹ (Figura 9S1, Cuadro 6). Posteriormente entre, los 20 a los 90 min, se comportó de manera uniforme, en el

tiempo restante el suelo se saturó debido a que la velocidad de infiltración se mantuvo constante.

La segunda prueba de infiltración se realizó en laderas muy suaves de colinas, formadas por depósitos de caída con Vertisoles. En los primeros dos minutos se midió una velocidad de infiltración relativamente alta de 1,147 y 705 mm h⁻¹. Posteriormente se presentó un descenso gradual hasta los 80 min (Figura 9S2, Cuadro 6); en el tiempo restante la velocidad fue casi constante, debido a que el suelo se saturó.

La tercera prueba se realizó en laderas muy suaves de colinas formadas por depósitos de caída, con Luvisoles. En el primer minuto se detectó una velocidad de infiltración de 1,080 mm h⁻¹; para el segundo min se registró un descenso muy marcado ya que se registró una infiltración de 588 mm h⁻¹. El segundo descenso se observó de los 3 a los 20 min (Figura 9S3, Cuadro 6). En el tiempo restante la infiltración fue muy uniforme hasta entrar en equilibrio.

Cuadro 6. Características biofísicas de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración en la subcuenca de Queréndaro.

No. Prueba	1		2		3		4		5		6	
Cobertura y densidad	Bosque de pino-encino Cerrado		Cultivos de temporal				Bosque de pino-encino					
			Cerrado		Semiabierto		Cerrado					
Suelo, textura y fase física	Acrisol		Vertisol		Luvisol		Luvisol		Andosol		Andosol	
	Media Lítica profunda		Fina		Media		Media				Media	
Geología	Basaltos y dacitas		Depósitos de caída				Domos andesíticos y riolíticos				Conos andesíticos	
	Montañas laderas escarpadas		Colinas laderas muy suaves				Lomeríos alto laderas muy suaves		Montañas laderas escarpadas			
Humedad %	28.2		10.7		11.2		17.5		17.7		51.5	
	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹	min	Infiltración mm h ⁻¹
	1	676.47	1	1147.06	1	1088.24	1	1588.24	1	882.35	1	1382.35
	2	382.35	2	705.88	2	588.24	2	1058.82	2	264.71	2	411.76
	3	294.12	3	558.82	3	382.35	3	941.18	3	235.29	3	411.76
	4	294.12	8	518.07	8	325.30	8	939.76	8	210.84	8	295.18
	14	206.59	13	343.37	13	228.92	13	861.45	13	174.70	13	228.92
	24	149.70	28	306.00	18	180.72	18	722.89	18	168.67	18	228.92
	44	124.62	43	228.00	33	132.00	28	670.66	33	168.00	33	216.00
	64	87.09	63	225.23	48	106.00	38	664.67	48	156.00	48	178.00
	84	72.07	83	174.17	68	85.59	48	625.75	68	124.62	68	168.17
	114	60	103	171.17*	88	78.08	58	625.75	88	115.62	88	168.17
	144	58*			108	48.05*	78	599.10	108	114.11	108	147.15
							98	596.10	128	111.11*	128	127.63*
						118	561.56					
						138	549.55					
						168	545.00*					

Nota: *corresponde a la infiltración básica

Cuadro 7. Porcentaje (%) de humedad de suelo presente en las muestras que se tomaron en la subcuenca de Queréndaro

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE SUELO			
No. De Prueba	Peso húmedo	Peso seco	% Humedad
1	151.44	118.11	28.20
2	156.23	141.18	10.70
3	151.57	136.35	11.20
4	134.47	114.49	17.50
5	132.83	112.82	17.70
6	133.86	88.34	51.50

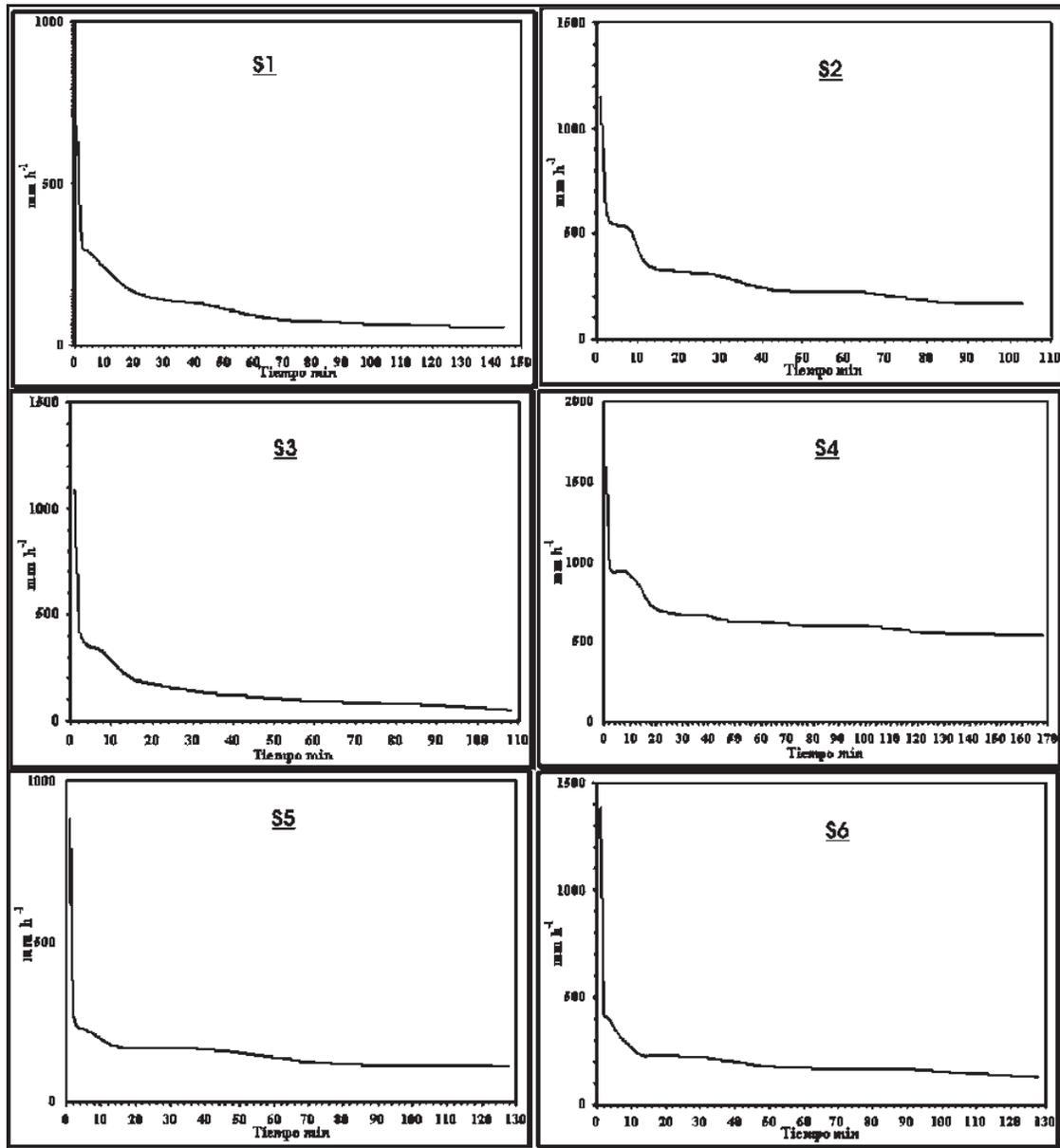


Figura 9. Curvas de capacidad de infiltración de la subcuenca de Queréndaro

La cuarta prueba se realizó en laderas muy suaves de lomerío alto formadas por domos andesíticos y riolíticos, sobre los que se desarrollan Luvisoles. Esta fue la prueba que más tiempo requirió y la que registró mayores velocidades de infiltración (Figura 9S4, Cuadro 6). En los dos primeros minutos la velocidad de infiltración registrada superó los $1,000 \text{ mm h}^{-1}$. Posteriormente se registró un descenso muy notorio hasta los 20 min. Finalmente tuvo un comportamiento muy gradual hasta que llegó a una velocidad de infiltración muy similar en los rangos de tiempo.

La quinta prueba se llevó a cabo en laderas escarpadas de montaña, sobre domos andesíticos y riolíticos con Andosoles. Esta prueba requirió de un tiempo de 128 min; del minuto 1 al 2 se registró una velocidad de infiltración de 882 mm h^{-1} la cual descendió a 250 mm h^{-1} , en el minuto 2 (Figura 9S5, Cuadro 6). Posteriormente se registró una velocidad de infiltración con un descenso muy gradual. En el minuto 90 se alcanzó la saturación de suelo.

La sexta prueba de infiltración tuvo lugar en una unidad geopedológica de montaña de laderas escarpadas con conos andesíticos y un tipo de suelo de Andosoles. La prueba requirió de un tiempo de 128 min, y una en la que se registró las mayores velocidades de infiltración, sin embargo esta se registró principalmente en los primeros 10 min (Figura 9S6, Cuadro 6). Los minutos restantes presentaron una infiltración muy uniforme.

Las pruebas realizadas en esta subcuenca pueden formar cuatro grupos de acuerdo a su capacidad de infiltración.

El primer grupo lo integraron las pruebas 2 y 3, la prueba 2 fue realizada en suelos de tipo Vertisoles con textura fina, mientras que la 3 en Luvisoles con textura media, su velocidad de infiltración fue muy similar; con respecto a los contenidos de humedad estos fueron semejantes presentándose una diferencia de 0.5% (Cuadro 7). Los tiempos empleados fueron: para la prueba 2 (103 min), y para la prueba 4 (108 min). La diferencia que presentan en su capacidad de infiltración se puede deber a los tipos de suelos ya que las Vertisoles presentaron mayor capacidad de infiltración (prueba 2, Figura 9S2) que los Luvisoles (prueba 3, Figura 9S3).

La prueba 5 y 6 se realizaron en suelos con textura y relieve semejantes (Figura 9S5 y S6, Cuadro 6). Lo que cambió fueron los tipos de rocas y la densidad de la cobertura vegetal (Cuadro 6). Tenemos que la prueba 5 presentó una menor capacidad de infiltración que la 6. En estas la capacidad de infiltración se midió con los mismos intervalos de tiempo y para el mismo tiempo, lo cual nos ayuda a entender que las diferencias se deben a la cobertura vegetal y al tipo de rocas presentes, ya que en la

prueba 5 tenemos una cobertura de bosque de pino-encino semiabierto, sobre una litología de domos andesíticos y riolíticos; mientras que la prueba 6 se realizó sobre una litología de conos andesíticos y una cobertura vegetal de bosque de pino-encino cerrado (Cuadro 6). Aunque no podemos realizar una comparación total ya que los porcentajes de humedad variaron significativamente (Cuadro 7).

La prueba 1 presentó una infiltración relativamente baja, (Figura 9S1). Esta fue la que presento la menor velocidad de infiltración de las 5 restantes Las diferencias en la capacidad de infiltración principalmente se deben a las características del suelo ya que presenta una fase física lítica profunda que es una capa de roca dura y continúa que impiden la penetración del agua.

La prueba 4 fue la que presentó mayor velocidad de infiltración y requirió mayor tiempo, se realizó en suelos Luvisoles con una textura media (Cuadro 6). Lo cual se puede deber a la acumulación de materia orgánica y el tipo de suelo.

4.3. CONCLUSIONES

En el mapa geopedológico de cada una de las subcuencas, los materiales parentales asociados a depósitos de caída complican la interpretación del origen de los suelos. Los modelos que ayudan a explicar las relaciones relieve-suelos, se basan en entender las características de los materiales parentales subyacentes; específicamente rocas alteradas. Sin embargo, las subcuencas estudiadas se caracterizan por la presencia de depósitos de caída que generalmente provienen de conos monogenéticos, los cuales pueden explicar el desarrollo de Andosoles; sin embargo, cuando este tipo de materiales volcánicos son diferenciados, la explicación anterior no puede aplicarse. Adicionalmente, la geometría (convexidad, concavidad) de las geoformas influencia la redistribución de los materiales de caída. Tal es el caso de las rampas de piedemonte de los volcanes semiescudo.

Uno de los mayores problemas de cartografía de suelos-relieve se localiza en aquellas formas de relieve positivo como laderas, mesas y superficies cumbrales cubiertos por Vertisoles. Estos suelos se caracterizan porqué su génesis se asocia a la re-depositación de materiales erosionados en las partes altas de una cuenca. Sin embargo, en muchos casos los Vertisoles en estas subcuencas presentan una fase física pedregosa, lo cual sugiere que quizá son suelos con propiedades vertícas, pero no necesariamente Vertisoles.

El uso de herramientas basadas en la percepción remota y los sistemas de información geográfica permitió caracterizar biofísicamente a las subcuencas de Umécuaro, San Marcos y Queréndaro. Las subcuencas mencionadas son unidades hidrológicas de origen volcánico, formada por rocas ígneas extrusivas intermedias a básicas, sobre las cuales se desarrollan suelos derivados de la intensa actividad volcánica (Andosoles, Luvisoles, Acrisoles) y suelos resultado de la re-depositación de materiales volcánicos (Vertisoles).

Los mapas geopedológicos de las tres subcuencas permitieron integrar la información de los tres temas diferentes (geomorfología, geología y suelos), lo anterior permitió realizar un análisis más detallado del medio físico y elegir los sitios para determinar la capacidad de infiltración de las unidades más representativas de las tres subcuencas. Las unidades definidas por este modelamiento tienen respuestas hidrológicas potenciales similares.

A pesar de que el ambiente volcánico reciente complica la interpretación del origen de los suelos, la conformación de los mapas geopedológicos resultó un mecanismo adecuado para la definición de respuestas hidrológicas potenciales similares.

Se realizaron 24 pruebas de infiltración en cuatro tipos de suelo con diferentes texturas, en 19 tipos de relieve y en 4 tipos de cobertura vegetal y uso de suelo.

La velocidad de infiltración depende principalmente de las condiciones de humedad previa en el suelo. Cuando el suelo se encontró seco la infiltración tuvo sus máximos valores y luego, conforme se humedeció, su capacidad de admitir más agua fue menor, hasta que en condiciones de saturación total alcanza un valor constante (Osuna y Padilla, 1998; Campos 1992)

En general los suelos de texturas gruesas presentaron una velocidad de infiltración más alta que los de texturas más finas, lo cual indica que para hacer penetrar una determinada lámina de agua, el tiempo de aplicación del agua será mayor en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso (Campos 1998; Aparicio 2004).

Las fases físicas jugaron un papel importante en la infiltración, las fases superficiales (pedregosas y gravosas), son las que permitieron mayor infiltración del agua. Las fases profundas (lítica y lítica profunda, petrogypsica y petrogypsica profunda y dúrica y dúrica profunda) complican la infiltración de agua así como las actividades humanas.

4.4. BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio M. F. J. 2004. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, S.A. de C.V. México D.F.
2. Birkeland, P. W., 1984. *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press, New York, 372 p.
3. Brady N.C., y Weil R.R. 2002. *The nature and properties of soils*. 13th Edition. Pearson Education. Delhi, India.
4. Campos A. D. 1998. *Procesos del ciclo hidrológico*. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luís Potosí. México.
5. Chávarri Velarde E, A. 2004. *Curso de Hidrología Aplicada*. Universidad Nacional Agraria La Molina – Facultad de Ingeniería Agrícola. España.
6. Chow V.T., Maidment R. D y Mays W. L. 1994. *Hidrología aplicada*. McGrawHill. Santafé de Bogotá Colombia.
7. ESRI. 1999. *ArcView 3.2*, GIS. Environmental Systems Research In statute, Inc.
8. Farshad A. 2005. *Introduction to geomorphology and geology for soil scientists*. ITC Lecture. Soil Science Division. Enschede, The Netherlands.
9. Freeze R. A., and Cherry A. J. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N. J.
10. Gallant, A.L., T.R. Whiter, D.P. Larsen, J.M. Omernik y R.M. Hughes, 1989. *Regionalization as a tool for managing environmental resources*. Environmental Protection Agency. Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon. USA: 152 p.
11. Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physical*. Academic press inc., New York, USA.
12. <http://es.wikipedia.org/wiki/pedolog%c3%ada>
13. Medina, O.L.E. 2006. *Pérdidas de suelo, agua y nutrimentos en parcelas experimentales con sistemas agrícolas de año y vez, y alternativos en un Acrisol de Michoacán*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados Montecillo, Edo. de México.
14. Meijerink, A.M.J., 1988. *Data acquisition and data capture through terrain mapping units*. ITC Journal. ITC Publication 7, 23 – 44. Enschede, the Netherlands.

15. Mendoza; M.E. y G. Bocco, 1998a. *El relieve y las políticas de uso de suelo: el caso de la costa sur de Sonora*. Jaina 9 (4): 2 -3.
16. Mendoza; M.E. y G. Bocco, 1998b. *La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica*. Serie Varia 17, 25 - 55. Instituto de Geografía; Universidad Nacional Autónoma de México.
17. Mendoza, M.E., 2002. *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica.
18. Naeth, M.A.; Chanasyk, D.S. y Bailey, A.W. 1991. *Applicability of the kostiakov equation to mixed prairie and fescue grassland of Alberta*. Journal of range management 44: 18-21
19. Osuna C. Padilla R. 1998. *Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelos de la zona semiárida de México*. Terra 16 (4): 293-302.
20. Pasquarè, G., L Ferrari, V.H. Garduño, A. Bibaldi y L. Vezzoli, 1991. *Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México*. Map and Chart Series MCH072. Geological Society of America.
21. Rossiter G. D. 2002. *Metodologías para el levantamiento del recurso suelo*. ITC Lecture Notes. Soil Science Division. Enschede, The Netherlands.
22. Sanders, L. 1998. *Manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall. 381 pp.
23. Santa Olalla Mañas, F. Martín De y J. de Juan Valero. 1993. *Agronomía del riego*. Ed. mundi- prensa, 732 pp.
24. Zinck, J.A., 1988 *Physiography & soils*. ITC Lecture Notes SOL 41. Enschede, The Netherlands.

4.5. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS

25. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Cuitzeo*. E14 A13, escala 1:50,000
26. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Morelia*. E14 A23, escala 1:50,000
27. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Tzitzio*. E14 A24, escala 1:50,000
28. INEGI. 1979. *Carta de edafología. Zinapécuaro*. E14 A14, escala 1:50,000

29. INEGI. 1982. *Carta de edafología. Coeneo de la Libertad*. E14 A12, escala 1:50,000

30. INEGI. 1982. *Carta de edafología. Villa Madero*. E14 A33, escala 1:50,000

31. INEGI. 1983. *Carta de edafología. Maravatio*. E14 A15, escala 1:50,000

5. ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO DE LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

5.1. INTRODUCCIÓN

La meteorología es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en la atmósfera. Como ciencia que es podría ocuparse fundamentalmente de entender como se producen esos fenómenos, sin embargo, desde el comienzo de la era moderna de la meteorología en la escuela de Bergen en 1918, la predicción del tiempo se constituyó en uno de los pilares fundamentales del desarrollo de la ciencia meteorológica. En sus inicios, la predicción meteorológica intentaba conocer con antelación aquellos fenómenos que podrían producir daños materiales o personales en la población, lo que se conoce con el nombre de fenómenos adversos (García, 2001).

Desde hace diez mil años aproximadamente, la Tierra experimenta una época cálida, que ha permitido la expansión de la humanidad a partir del desarrollo de la agricultura. Sin embargo, el clima durante estos últimos diez mil años no ha sido completamente uniforme; variaciones de temperatura han determinado ciclos cálidos o fríos, los cuales han durado pocos siglos y sus efectos cálidos han sido moderados, la temperatura en las dos últimas décadas ha resultado ser las más cálida del siglo pasado y los tres años más cálidos del siglo, han tenido lugar en la década de los 90's. Existen evidencias de que los patrones de precipitación también están cambiando en muchas partes del globo (Watson, 2001). A partir de la Revolución Industrial y especialmente en la segunda mitad del siglo pasado, la humanidad ha tenido capacidad para modificar el medio ambiente a escala global (Ludevid, 1997). Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, producto de las actividades humanas (principalmente, la quema de combustibles de origen fósil y los cambios en el uso de la Tierra y la cobertura vegetal), ha producido una alteración en el balance radiactivo que ha generado un incremento de la temperatura media global del aire. Este calentamiento ha modificado los elementos climatológicos, causando un cambio climático que ha afectado otros sistemas naturales (Euscategui 2002). Como consecuencia, un elemento importante de la investigación actual del cambio y variabilidad climática es el análisis de tendencias en variables hidroclimáticas de series de registros de datos (Molnár *et al*, 2001).

a. Objetivo

Analizar el comportamiento de las series de tiempo de los datos de precipitación, temperatura y escurrimiento de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las subcuencas de Cointzio, Queréndaro, y San Marcos.

b. Materiales y métodos

Primeramente se integraron los registros de precipitación, temperatura y escurrimientos de las estaciones hidrometeorológicas que se encuentran dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo (37 estaciones). De estas se decidió escoger las que presentaban el mayor número de años de registros y que se encontraran cercanas a las subcuencas de referencia (Figura 2). Algunas estaciones presentaban falta de datos en algunos meses para lo cual se decidió calcular un promedio de los doce registros que se encontraban cerca de este. Cuando se presentaban varios espacios continuos no bien definidos se dejaron sin datos ya que si se calculaba un promedio se podría sobreestimar o subestimar los datos; para los registros de precipitación cuando se presentaban periodos sin datos se dejaron así ya que la precipitación no se comporta como la temperatura. La precipitación es muy variable a lo largo de los meses y años, por lo cual para el análisis de precipitación se decidió eliminar los años que presentaban espacios en los meses, principalmente de lluvia y se dejaron únicamente los años con registros (Cuadro 1). Los datos de las estaciones se obtuvieron de los registros de la Comisión Nacional del Agua y del Servicio Meteorológico Nacional en la Delegación de Morelia, almacenados y actualizados en el manejador de datos CLICOM (Climatic Computing Project, CNA, 2005).

Se analizaron los datos de 11 estaciones (Figura 2), que permitieron elaborar los climogramas que son gráficos de doble entrada donde se representan los valores medios mensuales de precipitación y temperatura recogidos de una estación meteorológica (<http://ca.wikipedia.org/wiki/Climograma>), así como las gráficas de las series de tiempo de precipitación anual; finalmente se realizó un análisis de tendencia de cambio de las precipitaciones mensuales y anuales, así como de las temperaturas media, máxima y mínima mensual y anual. Igualmente se realizó un análisis de tendencia para los gastos mensuales y anuales de las estaciones localizadas en Santiago Undameo, Río Queréndaro y Arroyo Guadalupe. Por último, se realizó un análisis de los gastos de los Ríos Queréndaro, San Marcos y presa Umécuaro, así como la integración de datos de 7 nuevas estaciones hidrometeorológicas, instaladas durante la elaboración de este trabajo

dentro de las subcuencas de referencia en el año 2005, En la Figura 1 se muestra el diagrama de la metodología que se empleo para el análisis hidrometeorológico.

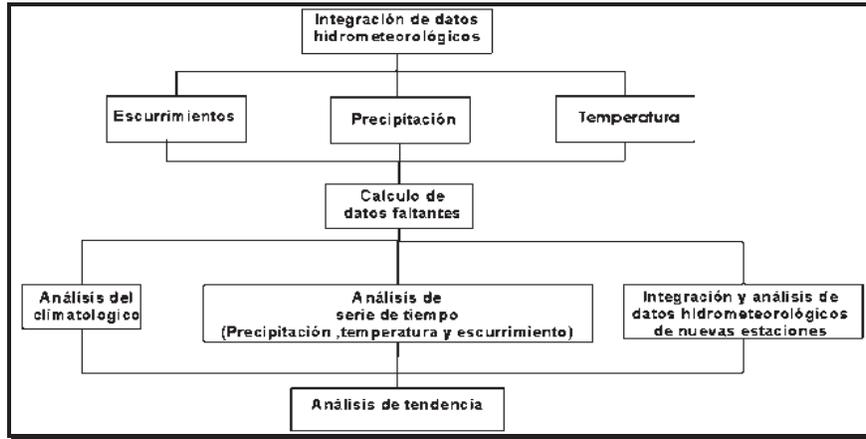


Figura 1 diagrama de la metodología del análisis hidrometeorológico

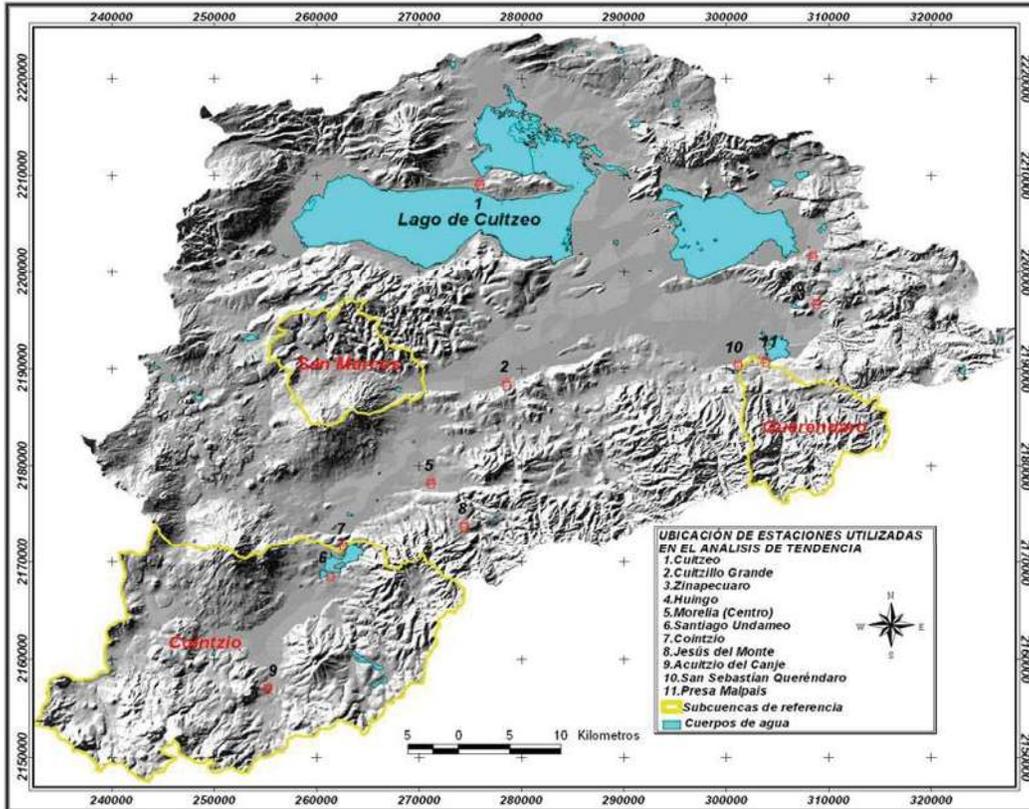


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de tendencia.

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones o variables hidrológicas colectadas de manera secuencial, cuyos valores ocurrieron en un intervalo de tiempo (Δt). El análisis de series de tiempo puede realizarse seleccionando valores de la variable X a intervalos de tiempo igualmente espaciados o a intervalos irregulares; una

característica de cualquier serie de tiempo de datos hidrológicos es la variabilidad sistemática o no-sistemática, el objetivo del análisis de las series de tiempo es desagregar estas dos variables (McCuen y Snyder, 1986). La media móvil es un método para la separación de la variación sistemática y no-sistemática, dado un sistema de observaciones de una variable hidrológica: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. La media móvil se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}, \quad \frac{X_2 + X_3 + \dots + X_{N+1}}{N}, \quad \frac{X_3 + X_4 + \dots + X_{N+2}}{N} \dots\dots\dots$$

La suma de cada grupo se llama media móvil de orden N . El orden N , puede ser cualquier valor pero si es pequeño, puede ser poco efectivo para minimizar la variabilidad aleatoria (Mendoza *et al.*, 2006).

Para realizar el análisis de tendencia de precipitación, temperatura y escurrimiento se realizó con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, con un valor crítico de 1.96 (Kendall, 1938). Esta técnica ha sido ampliamente utilizado para probar aleatoriedad contra tendencias en los datos climáticos de las series de tiempo (Zhang *et al.*, 2001). Este es un procedimiento lineal especialmente conveniente para los datos con distribución no normal, para los datos que contienen valores extremos y tendencias no lineares. La hipótesis nula H_0 es que los datos (x_1, x_2, \dots, x_n) son una muestra independiente e idénticamente distribuida (iid) de variables aleatorias. La hipótesis alterna H_1 es que la distribución de x_k y x_j no son idénticas para todos los $k, j \leq n$ con $k \neq j$. El análisis estadístico de la tendencia S se define como (Hirsch *et al.*, 1993):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

donde $\text{sgn}()$ es la función de muestra

Bajo H_0 la distribución S es normal en el límite como $n \rightarrow \infty$. La media de la varianza de S , considerando que puede haber nodos en las series x , son: $E[S] = 0$ y,

$$\text{var}[S] = \left[n(n-2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] \div 18$$

donde t es la longitud de alguna cola y \sum_t denota a la sumatoria sobre todos los nodos con longitud t . La asunción de normalidad para S se encuentra aún para una n pequeña

($n \approx 10$) con una correlación de ± 1 y la variación estándar típica es utilizada para

probar la hipótesis (Hirsch *et al.*, 1993):

$$Z = \begin{cases} \frac{[S - 1]}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{[S + 1]}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

En una prueba de dos lados para tendencias, la hipótesis nula es rechazada en un nivel de significancia de α si $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$, donde $Z_{(1-\alpha/2)}$ es el valor de la distribución normal que excede $\alpha/2$. Un valor positivo de Z indica una tendencia ascendente; un valor negativo indica una tendencia descendente en la serie de tiempo evaluada. En el presente trabajo las tendencias son identificadas a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La prueba estadística de tendencias Z es utilizada para indicar la tendencia significativa, pero no es una cuantificación de la magnitud de la tendencia (Molnár y Ramírez, 2001). Se aplicó la prueba de Mann-Kendall para evaluar únicamente datos no estacionales e independientes (precipitación, temperatura y escurrimientos).

5.2. RESULTADOS

Los registros de las estaciones que se utilizaron presentaron periodos con datos faltantes sobre todo en lo que se refiere a los datos de precipitación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones con periodos de registros de datos

Estación	Periodos de registro de temperatura	Periodos de registro de precipitación
Cuitzeo	1923-2005	1923-2004
Acuitzio del Canje	1961-2005	1961-1966, 1998-2004
Cointzio	1940-2005	1940-1985, 1992-2004
Cutzillo Grande	1970-2005	1969-1999, 2001-2003
Huingo	1941-2004	1942-2004
Jesús del Monte	1935-2005	1936, 1938, 1943-2003
Morelia	1947-2005	1947-2004
Presa Malpais	1940-2004	1944-1985, 1994, 1998-2004
San Sebastián	1969-1991	1969-1991
Santiago Undameo	1954-2004	1964-1999, 2003
Zinapécuaro	1923-2005	1924-1942, 1944-1954, 1956-1968, 1971-1978, 1980-1982, 1984-1992, 1998-1999, 2001-2004

a. Descripción climática

El clima general de las estaciones es de templado con lluvias en verano (Cb), donde su régimen de lluvias se caracteriza por presentar 10 veces más lluvia en el mes más húmedo del año que en el mes mas seco; la temperatura media de un mes, por lo menos, desciende por debajo de los 18°C, el régimen térmico es de una temperatura de cuatro meses o más superior a 10°C (w) y la temperatura del mes mas cálido es inferior a 22°C. El verano es templado, su rango de oscilación entre 5° y 7°C, presenta poca oscilación (i'); de > 14°C se refiere a una oscilación muy extrema (e), los porcentajes de precipitación invernal respecto a la total es menor de 5, la relación precipitación / temperatura (P/T) > 55.0 (w2), 3.2 < P/T < 55.0, (w1), P/T > 43.2 (w0). Las estaciones en la cuenca presentan una marcha anual de la temperatura tipo ganges, es decir el mes más calido es anterior al solsticio de verano (g) (Cuadro 2), (García, 2004).

Cuadro 2. Estaciones con los tipos de clima

Estación	Clima
Cuitzeo	Cb(wo)(w)(i')g
Acutzio del Canje	Cb(w2)(w)(i')g
Cointzio	Cb(w1)(w)(i')g
Cutzillo Grande	Cb(wo)(w)(i')g
Huingo	Cb(w1)(w)(i')g
Jesús del Monte	Cb(w1)(w)(i')g
Morelia	Cb(wo)(w)(i')g
Presa Malpais	Cb(wo)(w)(i')g
San Sebastián	Cb(wo)(w)(i')g
Santiago Undameo	Cb(w2)(w)(i')g
Zinapécuaro	Cb(w1)(w)(e)g

Las estaciones de Acutzio del Canje, Cointzio, Jesús del Monte y Santiago Undameo, localizadas en la porción SO de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura 2). Las estaciones mencionadas tienen climogramas, similares (Figuras 3 y 4). Las precipitaciones más importantes se presentan a partir del mes de junio terminando en el mes de septiembre, aunque en la estación de Acutzio del Canje y Cointzio la precipitación en los meses de julio, agosto y septiembre son muy similares, siendo las precipitaciones mayores en el mes de julio (Figura 3); mientras que para la estación de Jesús del Monte las mayores precipitaciones se concentran en los meses de julio y agosto (Figura 3).

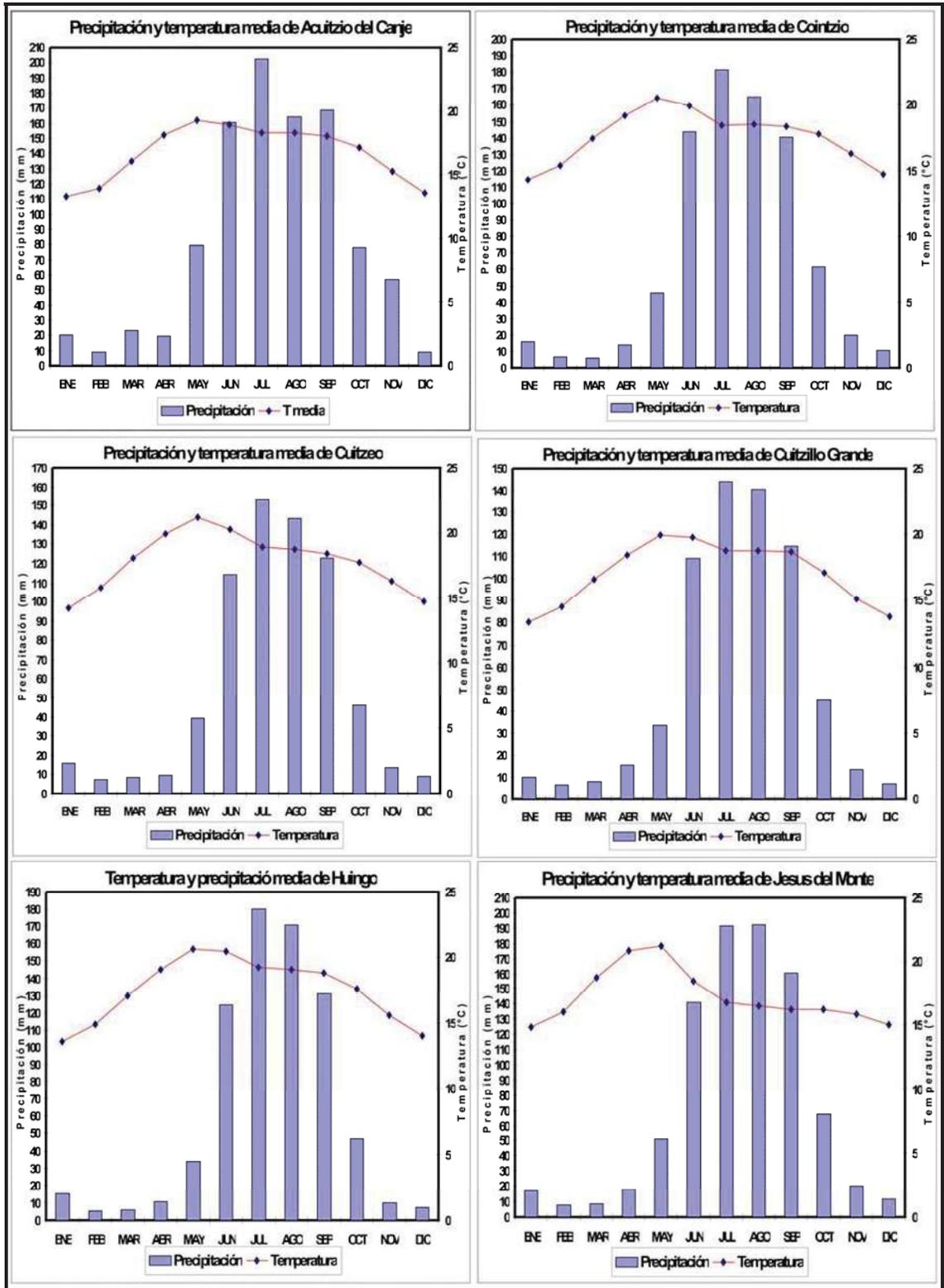


Figura 3. Climogramas de las estaciones de Acuitzio del Canje, Cointzio, Cuitzeo, Cuitzillo Grande, Huingo y Jesús del Monte

En la estación de Santiago Undameo la mayor precipitación se concentra en los meses de julio, agosto y septiembre. Las temperaturas en las estaciones de Acuitzio del Canje, Cointzio y Santiago Undameo son muy similares y van de los 12 a 20°C con un aumento a partir del mes de marzo y un descenso a partir del mes de julio y agosto (Figuras 3 y 4). En la estación de Jesús del Monte se observan los registros de temperatura mas alta de estas estaciones, variando de 15 a los 21°C presentando un aumento partir del mes de febrero y un descenso en el mes de junio (Figura 3).

Las estaciones que se encuentran en la parte E de la cuenca son: Zinapécuaro, Huingo, San Sebastián Queréndaro y Presa Malpais. En la estación de Zinapécuaro la precipitación se concentra en los meses de julio, agosto y septiembre, en este periodo se registra la precipitación mas alta que es aproximadamente de 215 mm, mientras que la temperatura varía de 15 a 22°C: la mayor temperatura registrada en la estación de Zinapécuaro es en los meses de mayo a junio (Figura 4). La estación de Huingo y Presa Malpais presentan una precipitación similar, observándose que los meses de junio, julio, agosto y septiembre, no supera los 180 mm en los meses lluviosos (Figuras 3 y 4), para estas estaciones la temperatura varía de los 14 a los 20°C (Figuras 3 y 4). La estación de San Sebastián es la que presenta menor precipitación en comparación con las cuatro estaciones anteriores. La precipitación no supera los 170 mm en los meses más lluviosos y se concentra en los meses de junio, julio, agosto y septiembre; las temperaturas registradas varían de 12.5 a 21°C, presentándose la más alta en los meses de abril, mayo y junio.

Las estaciones de Cuitzeo, Cuitzillo Grande y Morelia se encuentran en la planicie de la cuenca. Cuitzeo y Cuitzillo Grande son las que presentan precipitaciones similares, tanto en el tiempo como en la cantidad; su precipitación máxima 150-180 mm. La estación de Cuitzillo Grande presenta la menor precipitación de acuerdo con la media (Figuras 3 y 4) y la estación de Morelia registra las más altas temperaturas que van alrededor de los 25°C (Figuras 3 y 4).

b. Series de tiempo

La serie de tiempo de los datos anuales de precipitación sugieren que las estaciones de Acuitzio del Canje, Zinapécuaro y Jesús del Monte, presentan un comportamiento muy diferente a las estaciones restantes (Figura, 5, 6 y 8).

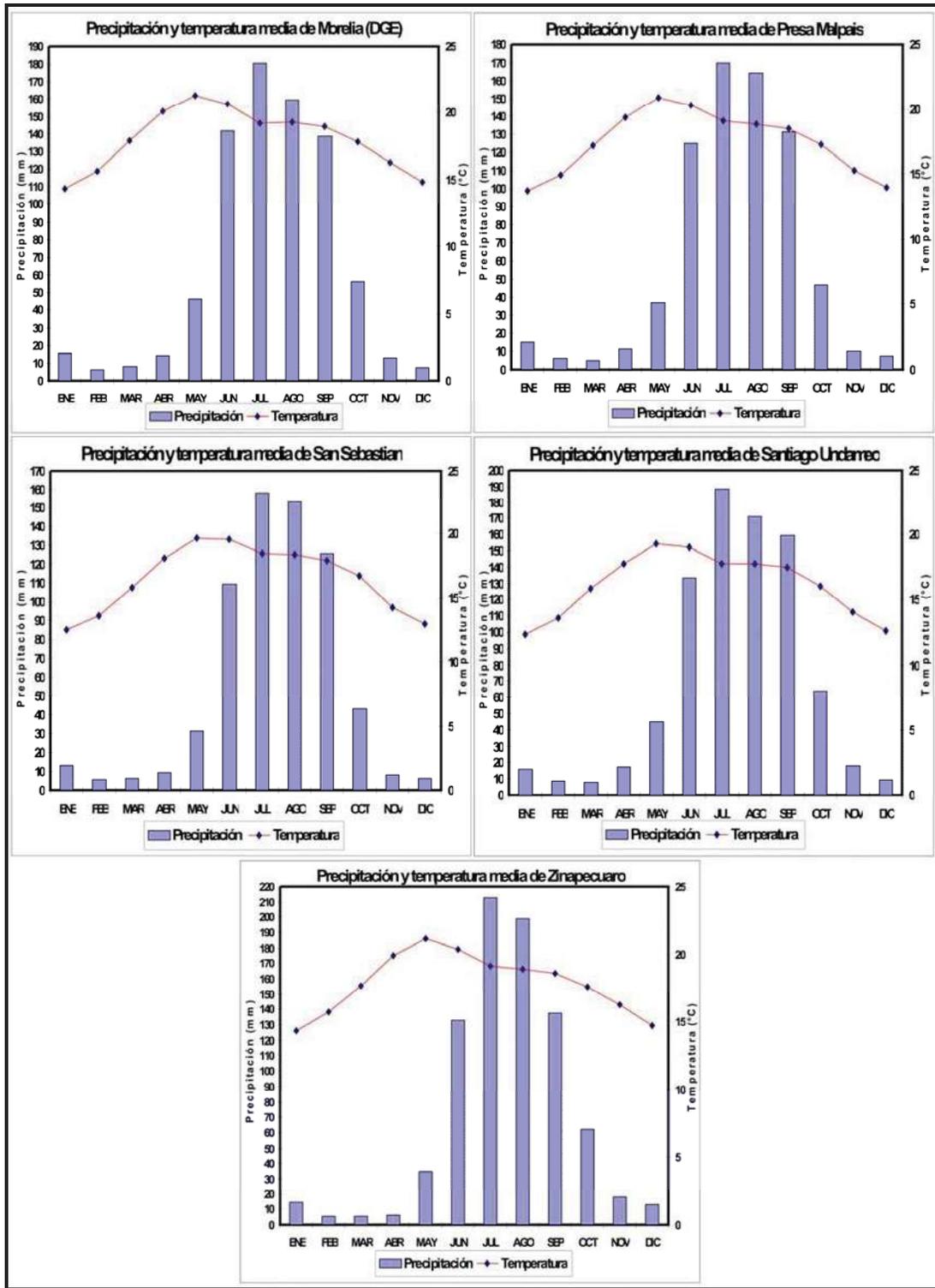


Figura 4. Climogramas de las estaciones de Morelia, Presa Malpais, San Sebastián, Santiago Undameo y Zinapécuaro.

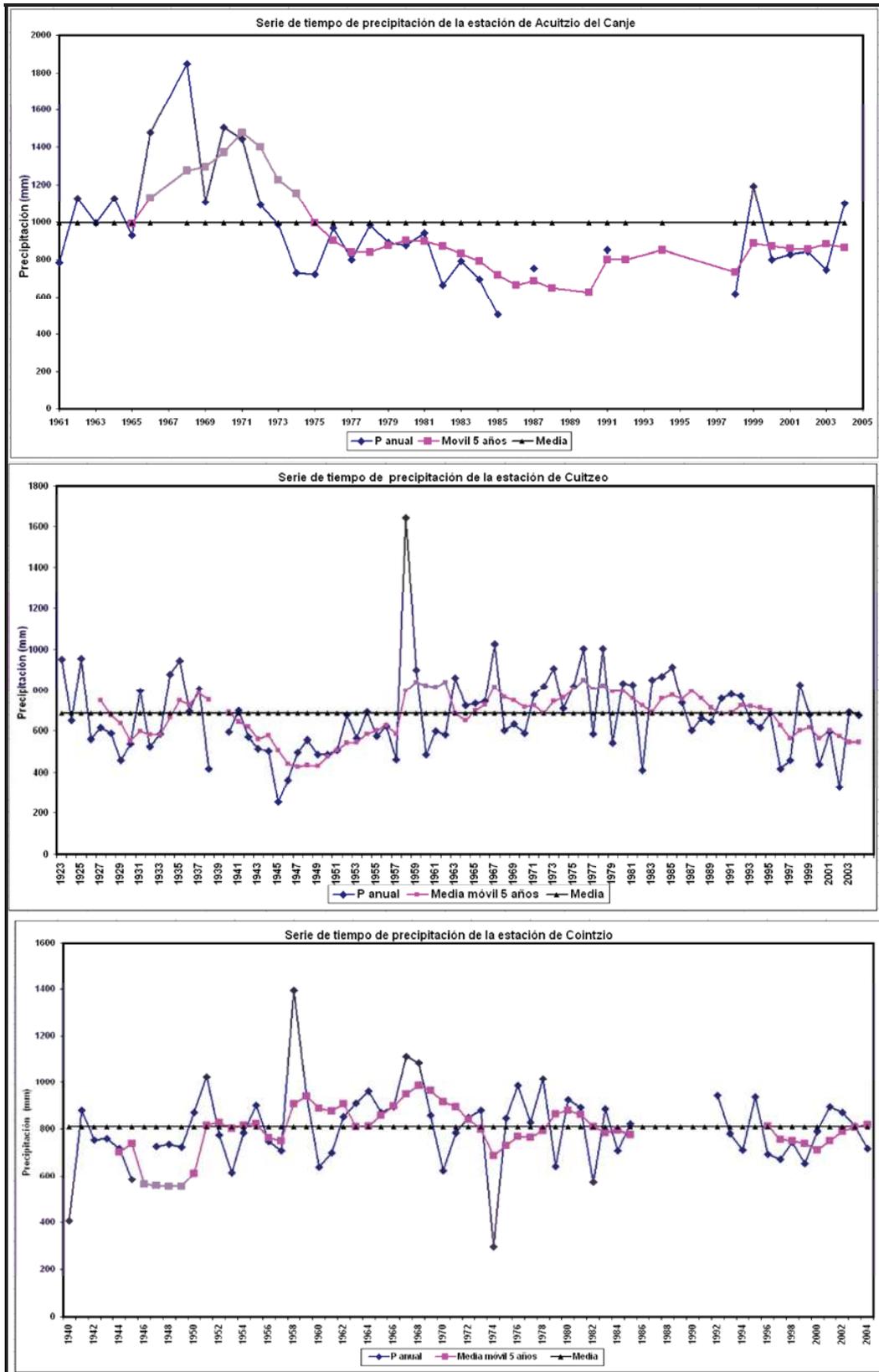


Figura 5. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Acuitzio del Canje, Coitizio y Cuitzeo

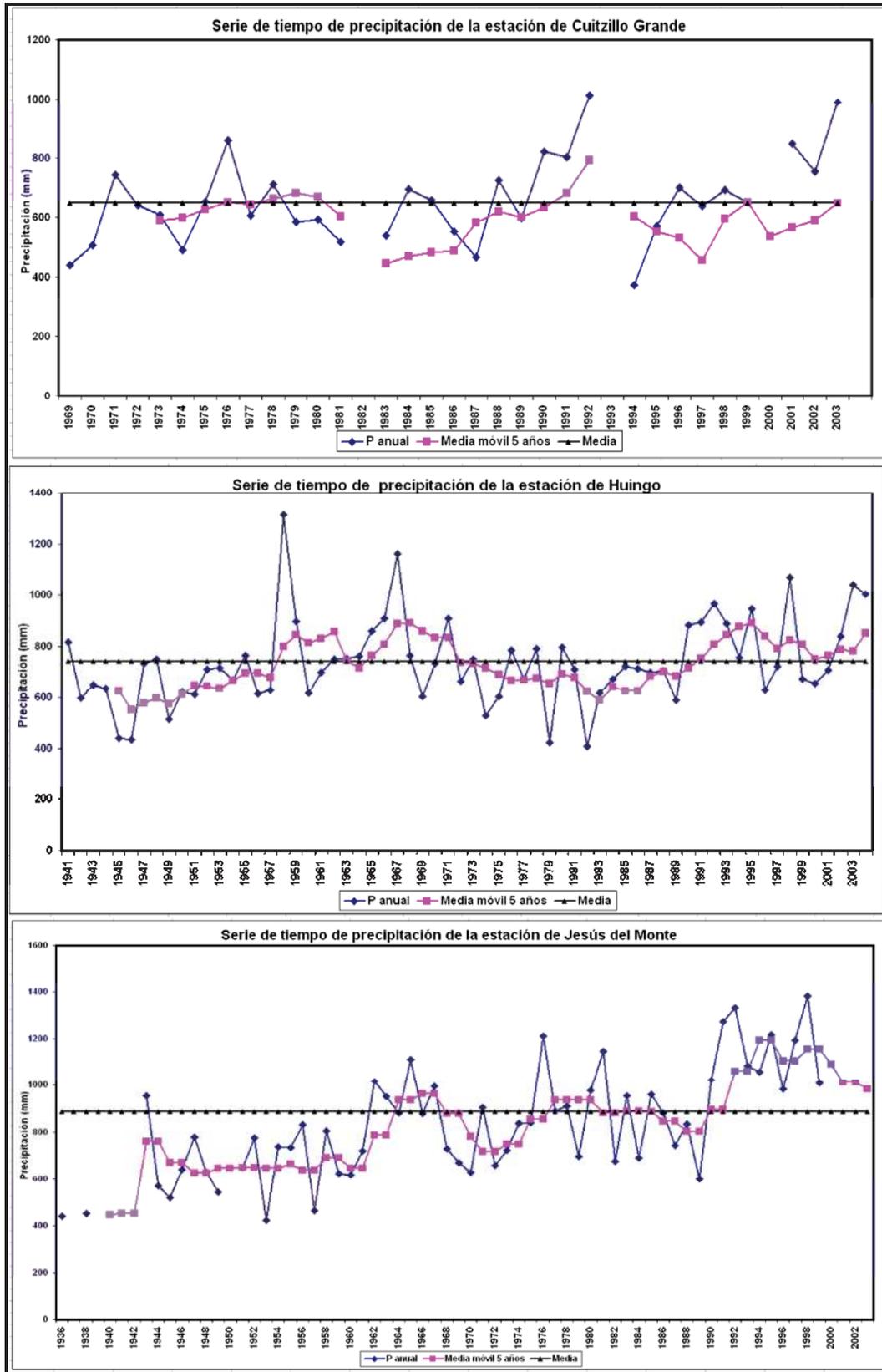


Figura 6. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Cuitzillo Grande, Huingo y Jesús del Monte

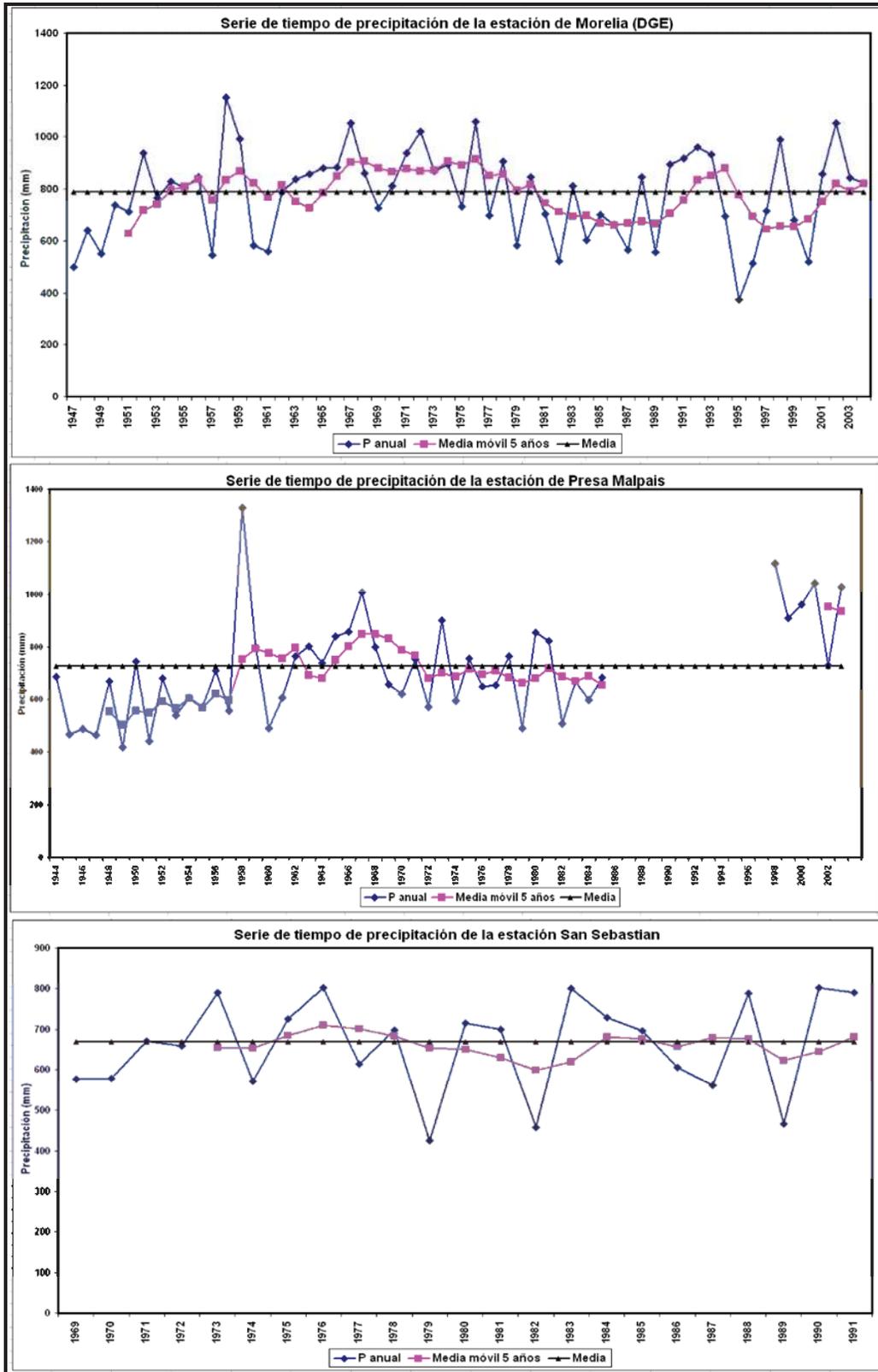


Figura 7. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Morelia, Presa Malpais y San Sebastián

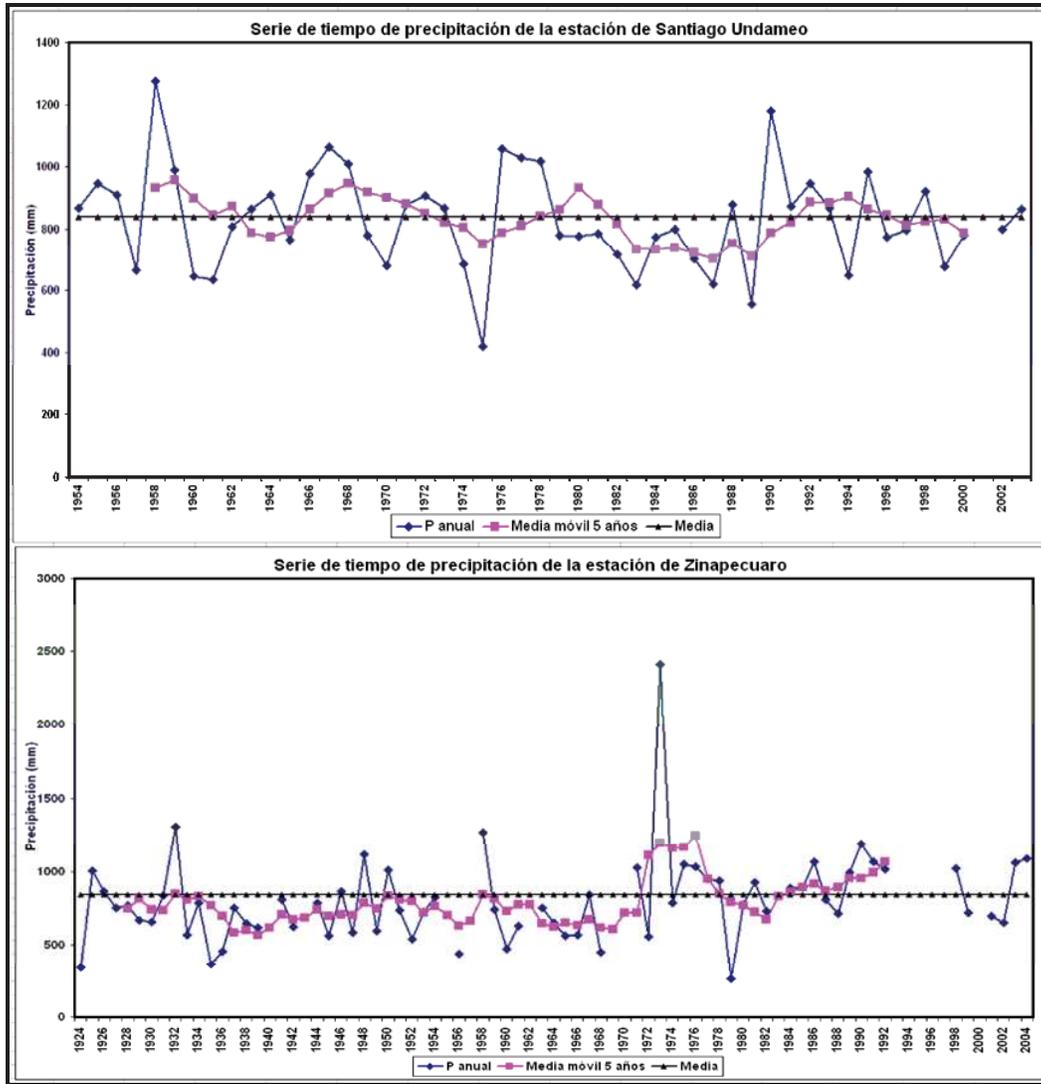


Figura 8. Series de tiempo de precipitación de las estaciones de Santiago Undameo y Zinapécuaro

Las estaciones de Cuitzeo, Cointzio, Cuitzillo Grande, Huingo, Morelia, Presa Malpais, San Sebastián y Santiago Undameo presentaron un comportamiento muy similar de los años 1958 a 1985, presentando un periodo húmedo para los años de 1957-1958 y posteriormente registran un descenso correspondiente a un periodo seco para 1960, manteniéndose en una tendencia cíclica hasta 1979, para sucesivamente presentar un periodo aun más seco, el cual se observó en los años de 1978 a 1987 (Figuras 5, 6, 7 y 8); algunos periodos de ascenso o descenso coinciden con presencia del fenómeno “niño y niña”. En los últimos 15 años, de acuerdo con los datos de las estaciones se presenta una precipitación muy inestable pero con mas tendencia a periodos secos, principalmente en las estaciones de Cuitzeo, Cuitzillo Grande, Cointzio, Morelia.

Mientras que para la estación de Acuizio, Jesús del Monte y Zinapécuaro tiende a aumentar (Figuras 5, 6, 7 y 8).

c. Análisis de tendencia

El análisis de tendencia de precipitación, temperatura y escurrimiento se realizó con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, con un valor crítico de 1.96 (Kendall, 1938), de las series de datos correspondientes a las temperaturas medias mínimas, medias máximas y medias mensuales, así como a las temperaturas media anuales; se realizó la misma prueba con los registros de datos de precipitaciones totales mensuales y anuales de las estaciones de Cointzio, Cuitzeo, Huingo, Jesús del Monte, Morelia, Presa Malpais, Santiago Undameo y Zinapécuaro (Figura 9). Un análisis similar se aplicó a los datos de escurrimiento mensual y anual de Santiago Undameo, Río Queréndaro y Arroyo Guadalupe (Figura 13).

El análisis de tendencia indica que la temperatura media en las estaciones de Morelia, Santiago Undameo, Zinapécuaro y Presa Malpais tienden a aumentar de manera significativa, tanto sus valores mensuales como en el valor medio anual; mientras que Cuitzeo y Huingo tienden a reducir sus temperaturas en forma significativa (Figura 9). Bajo una perspectiva espacial, las estaciones que tienden a aumentar se localizan en la zona sur de la cuenca, mientras que las estaciones localizadas en la porción norte de la cuenca son las que tienden a reducir sus temperaturas. Bajo una perspectiva temporal, la estación de Santiago Undameo sugiere que la temperatura ha aumentado en todos los meses, mientras que en las estaciones de Morelia y Presa Malpais las temperaturas tienden a incrementar en la estación seca. Por su parte la temperatura registrada en las estaciones de Huingo y Cuitzeo tienden a aumentar en algunos meses del año, tanto en la época de secas como en la de lluvias.

La temperatura máxima de las estaciones de Santiago Undameo y Zinapécuaro tienden a aumentar tanto es sus valores mensuales como en la anual. Los registros de la estación de Santiago Undameo tienden a aumentar en todos los meses del año. De acuerdo con los registros de los meses de marzo y abril de la estación de Presa Malpaís, la temperatura tiende a aumentar en los meses de marzo, abril, mayo y junio, mientras que los registros de algunos meses de las estaciones de Cuitzeo y Huingo tienden a disminuir. Nuevamente se presenta un patrón espacial similar de los cambios registrados con las temperaturas medias, no así en el patrón temporal (Figura 10).

Los registros de temperatura mínima de las estaciones de Morelia, Cuitzeo y Presa Malpais tienden a aumentar. La estación de Morelia registró este cambio durante un número mayor de meses (agosto a mayo); seguida por Presa Malpais (seis meses); la estación Cuitzeo presentó este cambio en abril y mayo, justo antes del inicio de las lluvias. El patrón espacial no es claro, porque en este grupo se incluyen estaciones localizadas tanto al norte como al sur de la cuenca. Las estaciones de Cointzio, Jesús del Monte, Huingo y Zinapécuaro tienden a disminuir en forma significativa de acuerdo con los valores de temperatura mínima registrados (Figura 11). Cabe resaltar que los cambios en las temperaturas mínimas se presentan principalmente durante la temporada invernal y en la época de lluvias. El patrón espacial, tampoco es claro.

El análisis de tendencias realizado para los registros de precipitación indica que existe un incremento significativo de lluvias en las estaciones de Cuitzeo, Huingo, Jesús del Monte, Presa Malpais y Zinapécuaro (Figura 12). La estación con mayor tendencia es Jesús del Monte, especialmente al principio de la temporada de lluvias. Sólo los registros de precipitación de la estación de Cuitzeo presentan una reducción significativa en el mes de noviembre; sin embargo, aunque no existen tendencias estadísticas significativas, se observa que la precipitación de todas las estaciones durante los meses de noviembre y diciembre, presentan una tendencia de reducción.

Los gastos medios, máximos y mínimos de la estación de Santiago Undameo tienden a aumentar significativamente en varios meses del año y el acumulado anual. Mientras que los registros de los gastos en Queréndaro y Guadalupe tienden a disminuir en forma significativa (Figuras 13, 14 y 15). La disminución se presenta al final de la época de lluvias y el inicio de la temporada de secas, lo cual podría estar asociado en la reducción del flujo base como consecuencia de un abatimiento de las aguas subterráneas que alimentan los escurrimientos permanentes; es importante mencionar que la disminución únicamente se presentó en algunos meses y que para el análisis de tendencia anual, no existe una tendencia a la reducción, estadísticamente significativa.

El patrón contrario se presentó en Santiago Undameo (aumento), puede ser debido al aporte de agua subterránea, ya que la estación registra los aforos provenientes de un distrito de riego, localizado aguas arriba, que se puede convertir en un factor importante de recarga para tener un incremento en el escurrimiento.

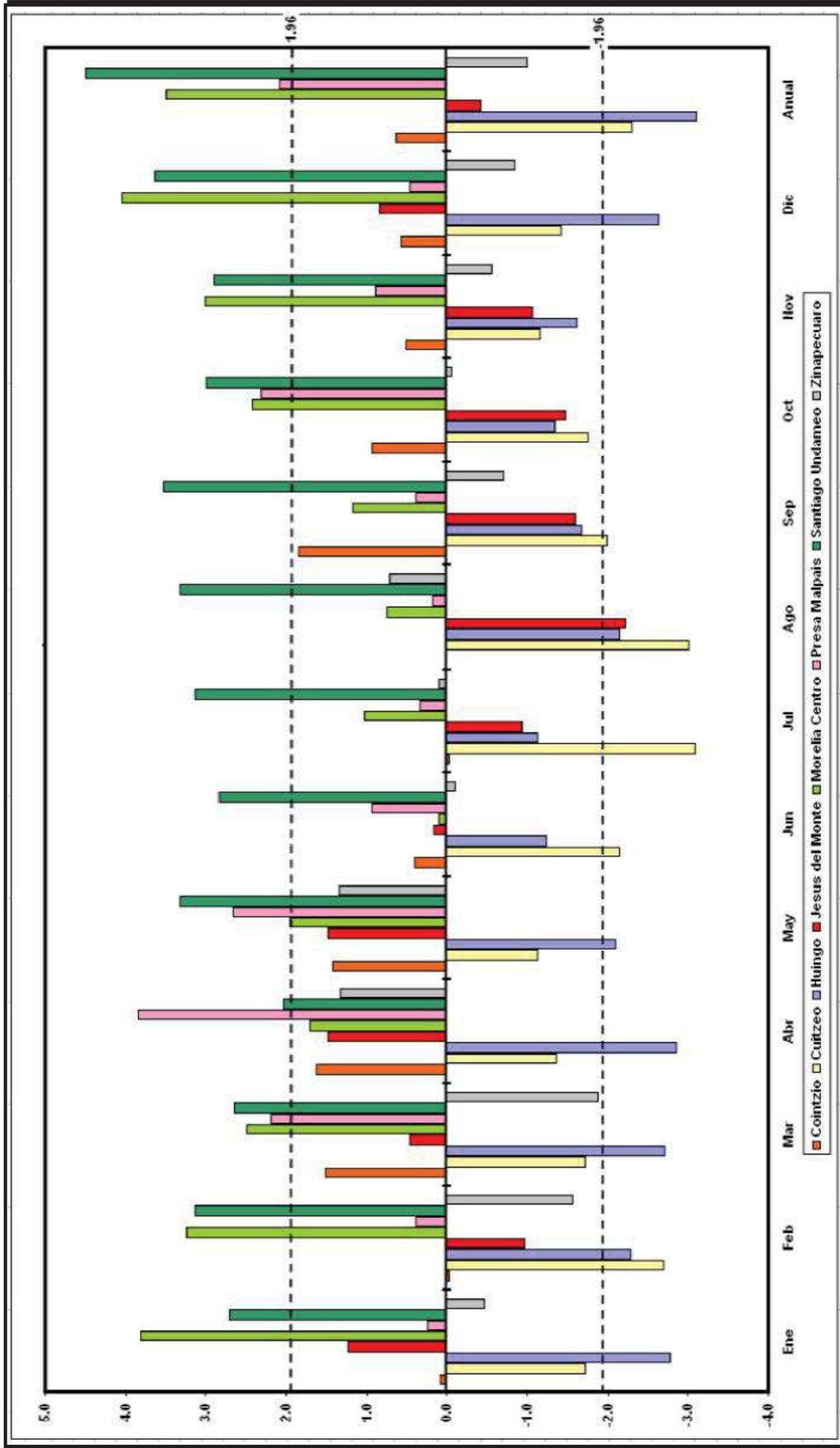


Figura 9. Análisis de tendencia de la temperatura media

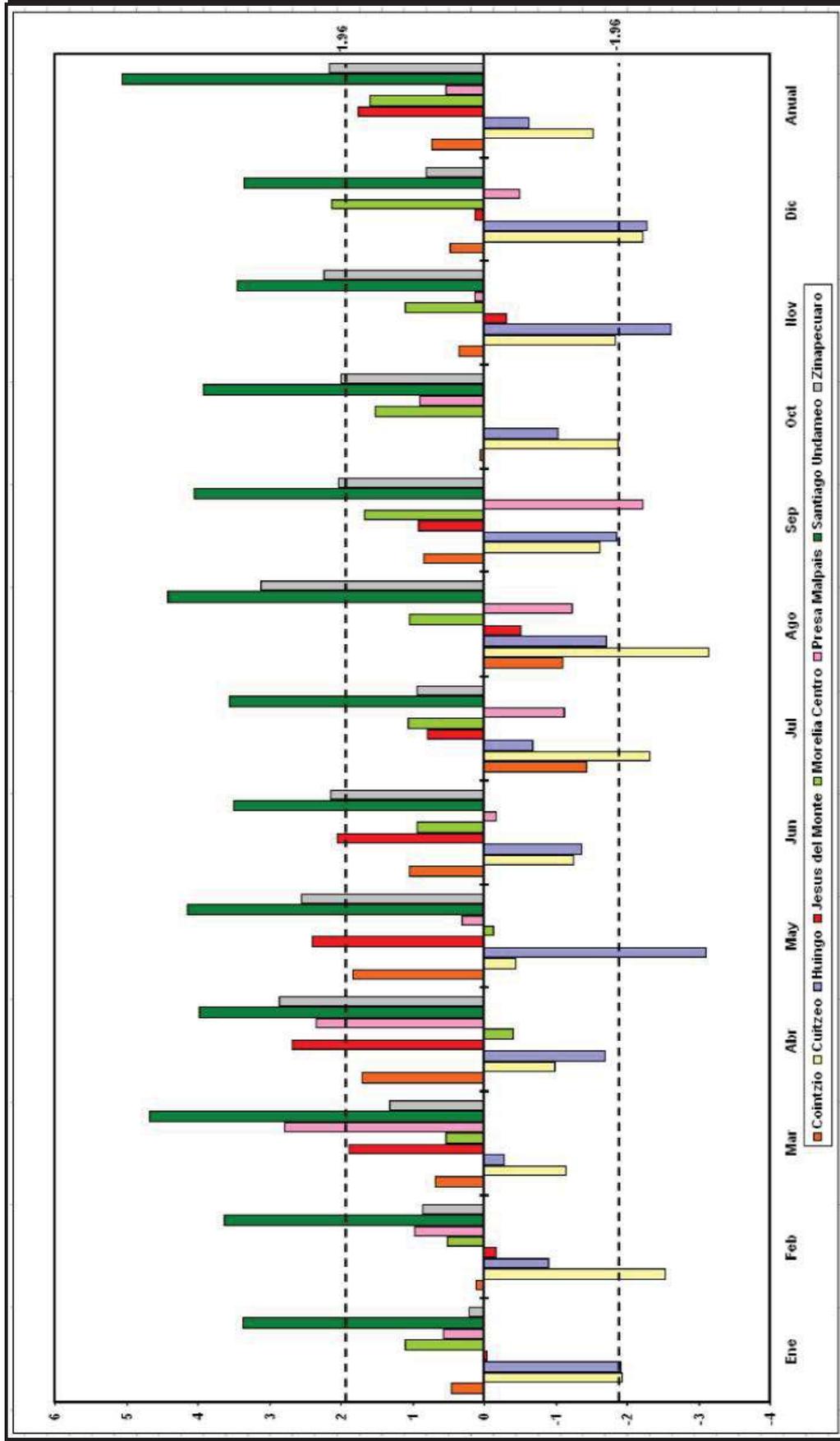


Figura 10. Análisis de tendencia de la temperatura máxima

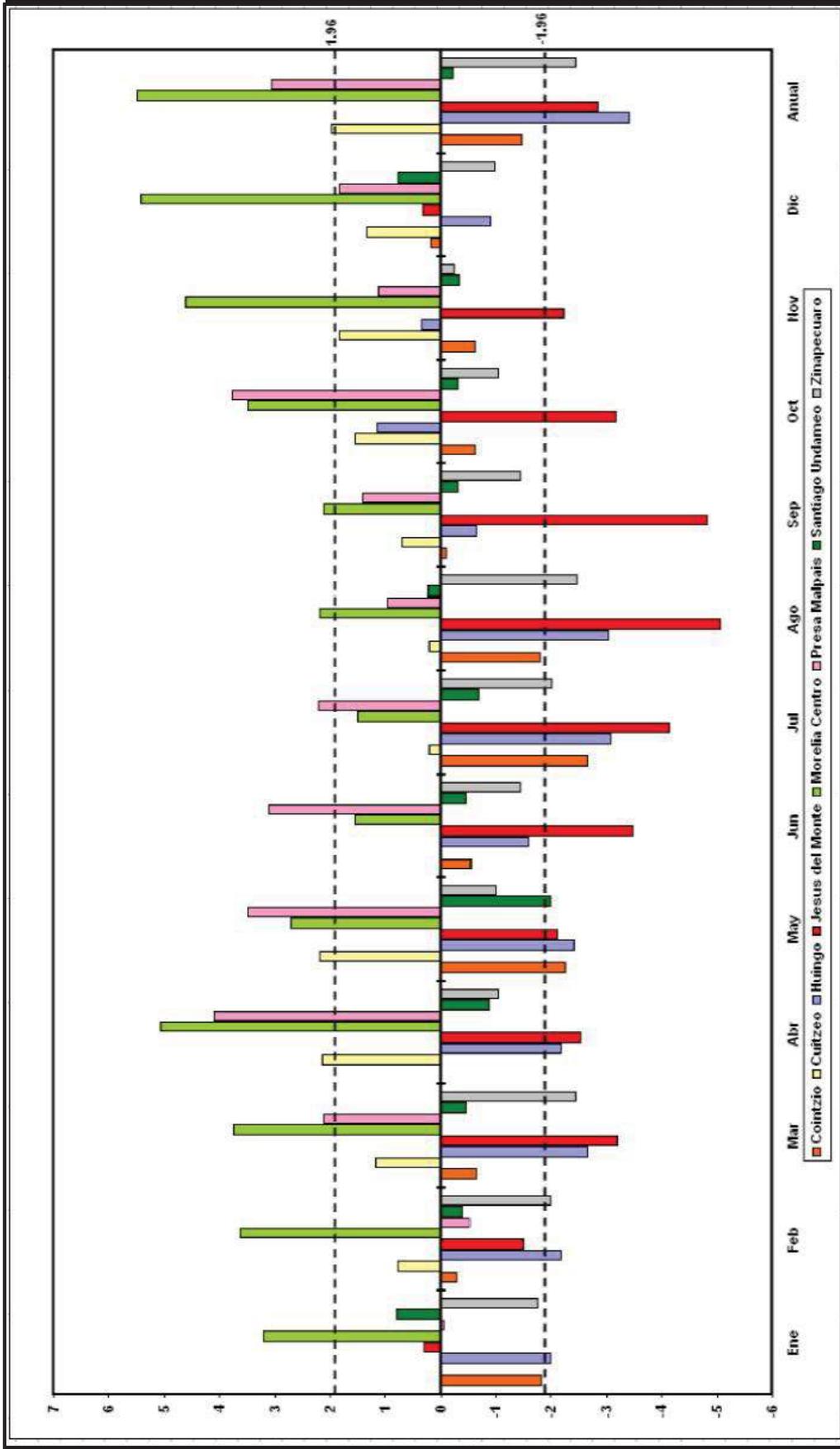


Figura 11. Análisis de tendencia de la temperatura mínima

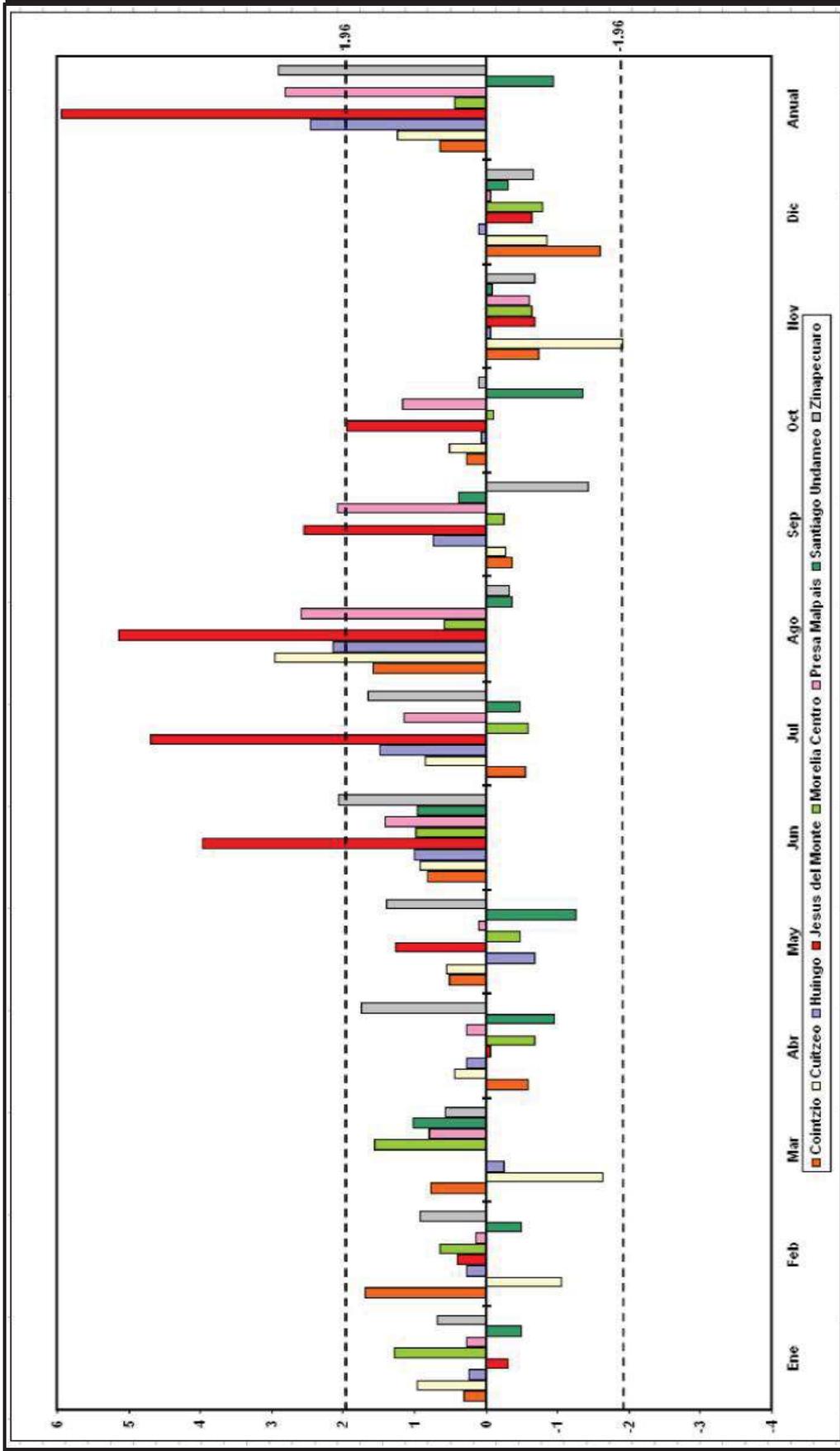


Figura 12. Análisis de tendencia de la precipitación.

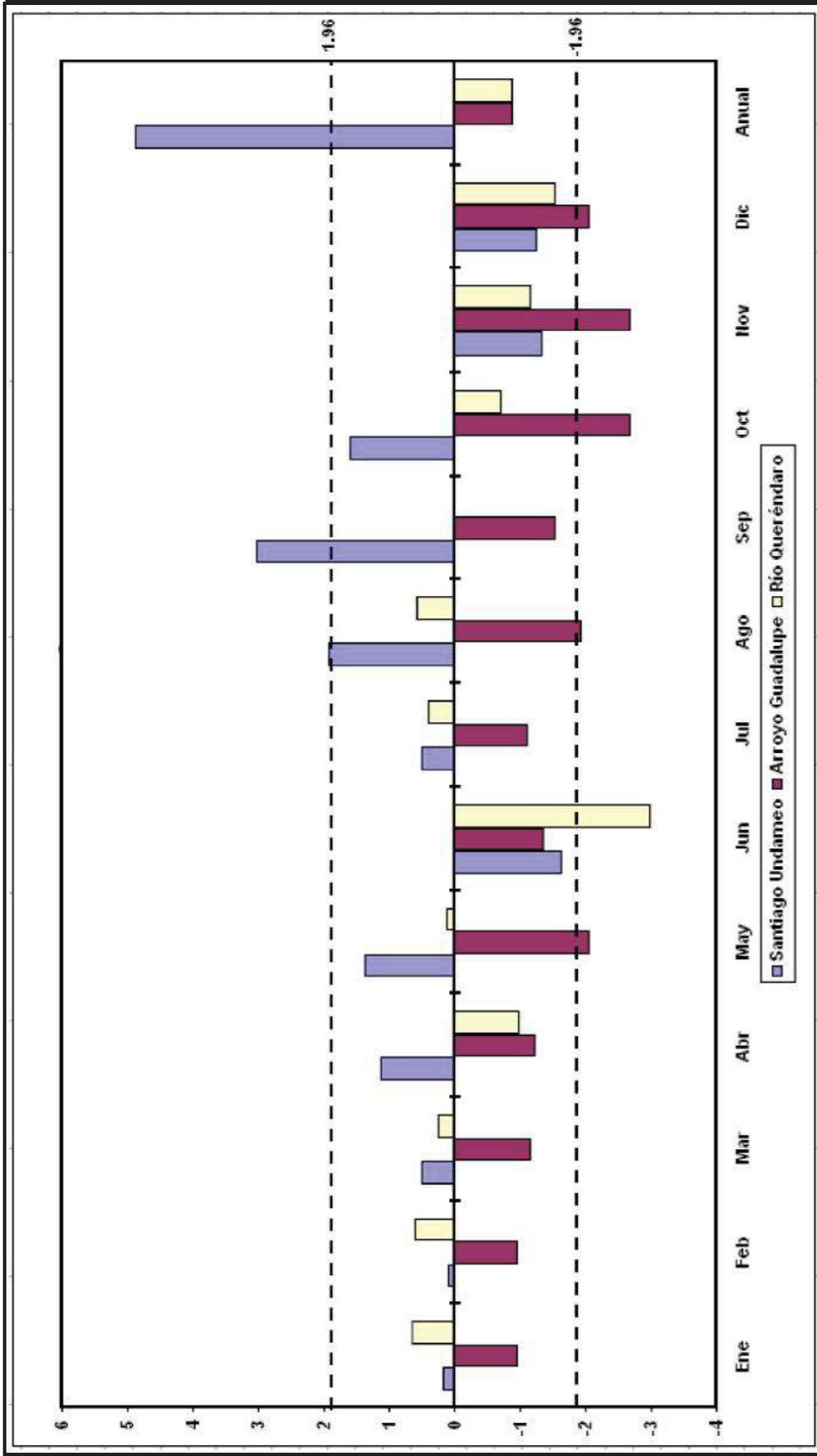


Figura 13. Análisis de tendencia de los gastos máximos

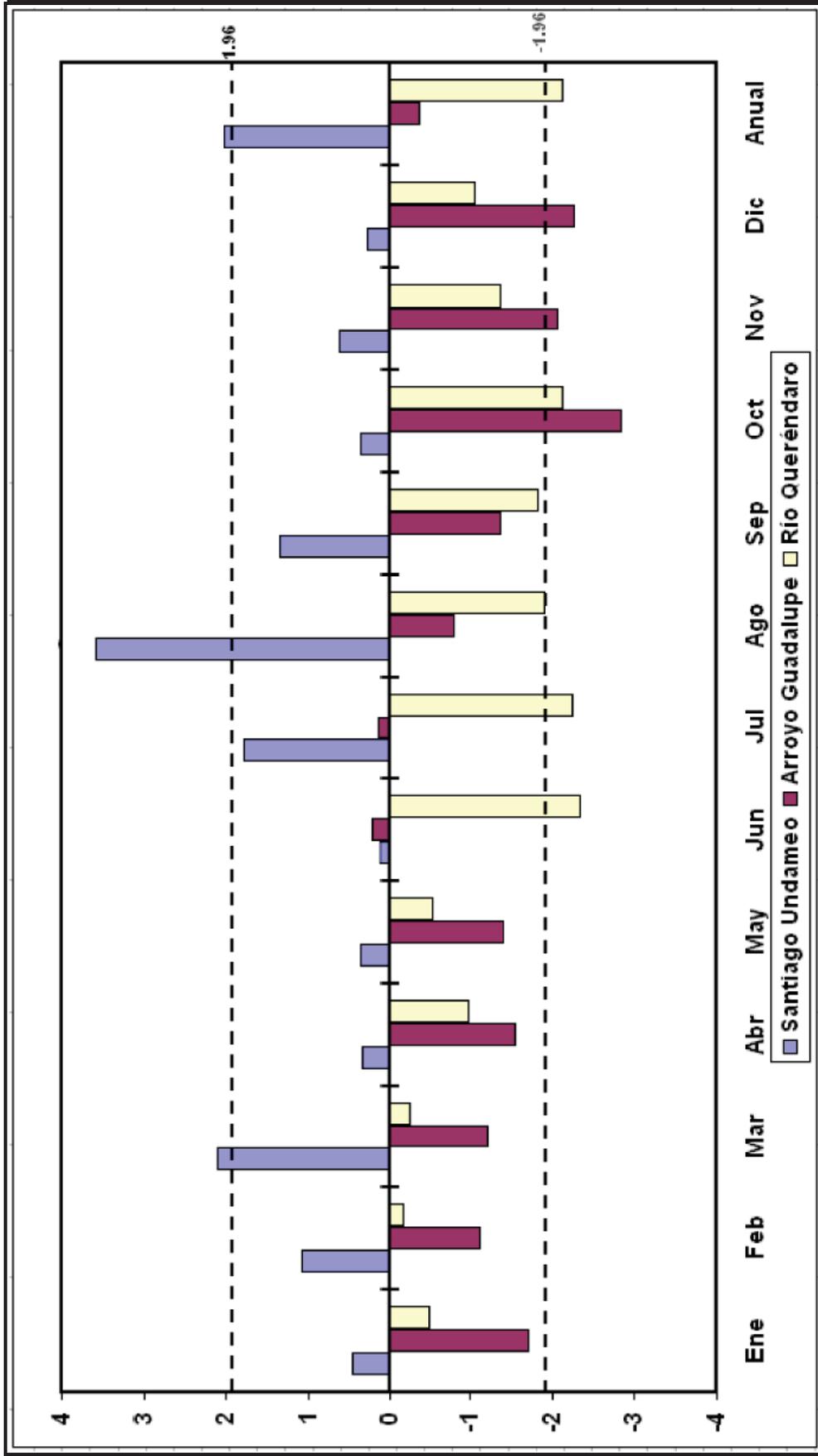


Figura 14. Análisis de tendencia de los gastos medios

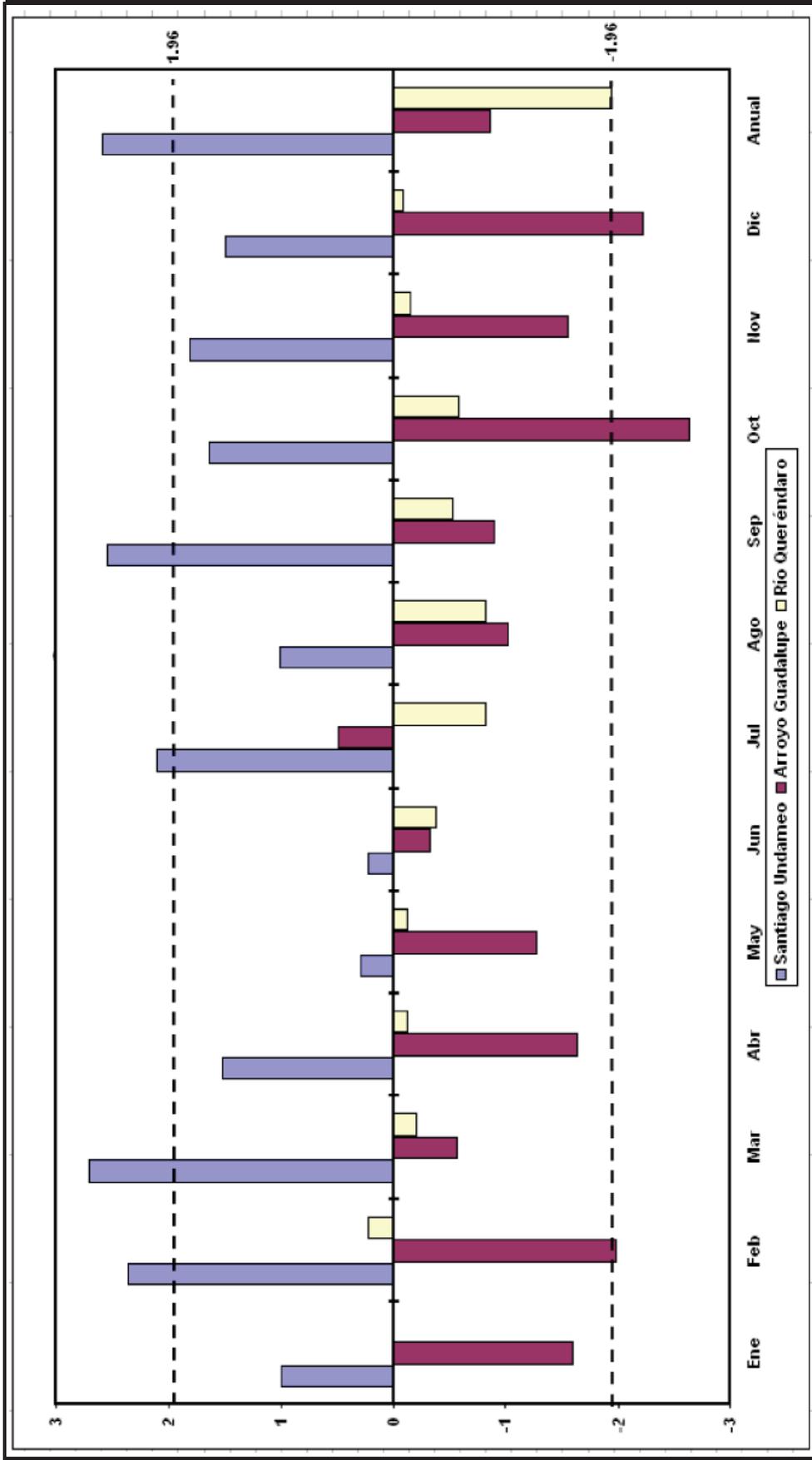


Figura 15. Análisis de tendencia de los gastos mínimos

d. Medición de gastos y monitoreo de registros automatizados

Durante el tiempo de esta investigación se han estado registrando datos hidrometeorológicos automatizados en las tres subcuencas de referencia. Los datos registrados sobre el nivel del agua en las tres corrientes se describen a continuación.

En la Presa de Umécuaro existe un retardo para que el agua que escurre tanto superficial como subterránea se almacene en la presa colmatándola. El nivel de la presa empieza a aumentar a partir del mes de septiembre alcanzado su máximo nivel entre el mes de noviembre y diciembre, ya entrado en la época seca (Figura 16); este retardo puede ser por la extensión de la presa o porque la fuente del agua que alimenta a la presa es principalmente sub-superficial, dadas las características de los Andosoles presentes en la cuenca.

Los datos registrados en las subcuencas de San Marcos y Queréndaro indican que las lluvias tienen un escurrimiento instantáneo, ya que el aumento del nivel del agua se manifiesta desde el inicio del periodo de lluvias (Figuras 17 y 18).

Los datos de las estaciones hidrométricas registrados son aproximadamente de un año; en los registros se observan espacios (Figuras 16, 17 y 18) sin datos los cuales se deben a la falta de cooperación de la sociedad y a fallas de los equipos.

Las estaciones de Chiquimitio y el Castillo registraron las temperaturas más altas los valores registrados van desde los 16 a los 30°C (Figuras 20 y 22). Mientras que en las estaciones de Umécuaro y el Castillo se observaron las mayores precipitaciones; en el caso de Umécuaro la precipitación se concentró en los meses de septiembre y octubre, mientras en el Castillo en los meses de julio y agosto (Figuras 19 y 22).

Es importante mencionar que con los datos registrados en este periodo, no se realizó ningún análisis para observar tendencias de cambio, dado el corto periodo de registro, lo único que se realizó fue recabar datos e integrarlos a un archivo y una breve descripción de las precipitaciones y temperaturas medias.

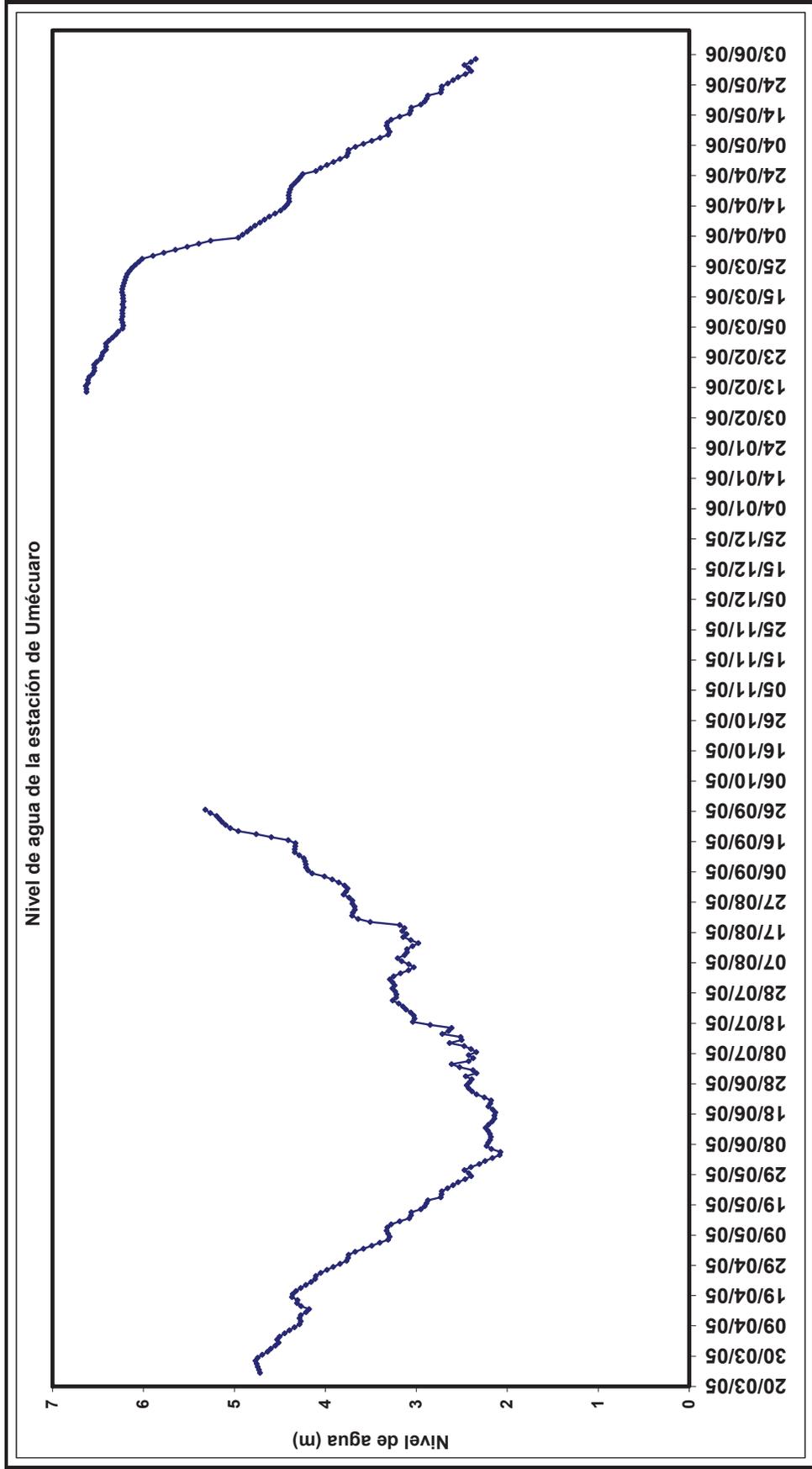


Figura 16. Comportamiento del nivel de agua de la Presa de Umécuaro.

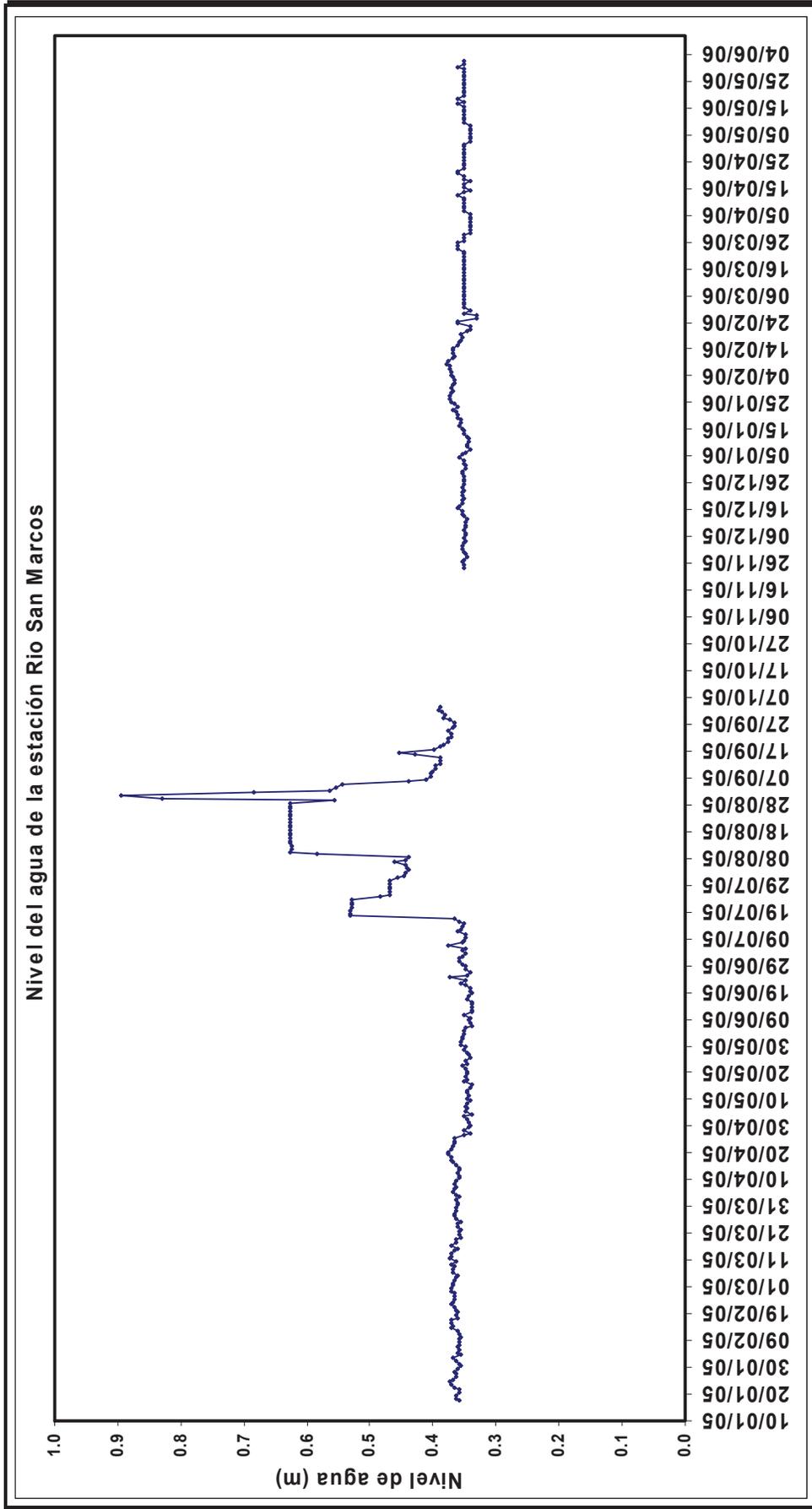


Figura 17. Comportamiento del nivel de agua del Río San Marcos

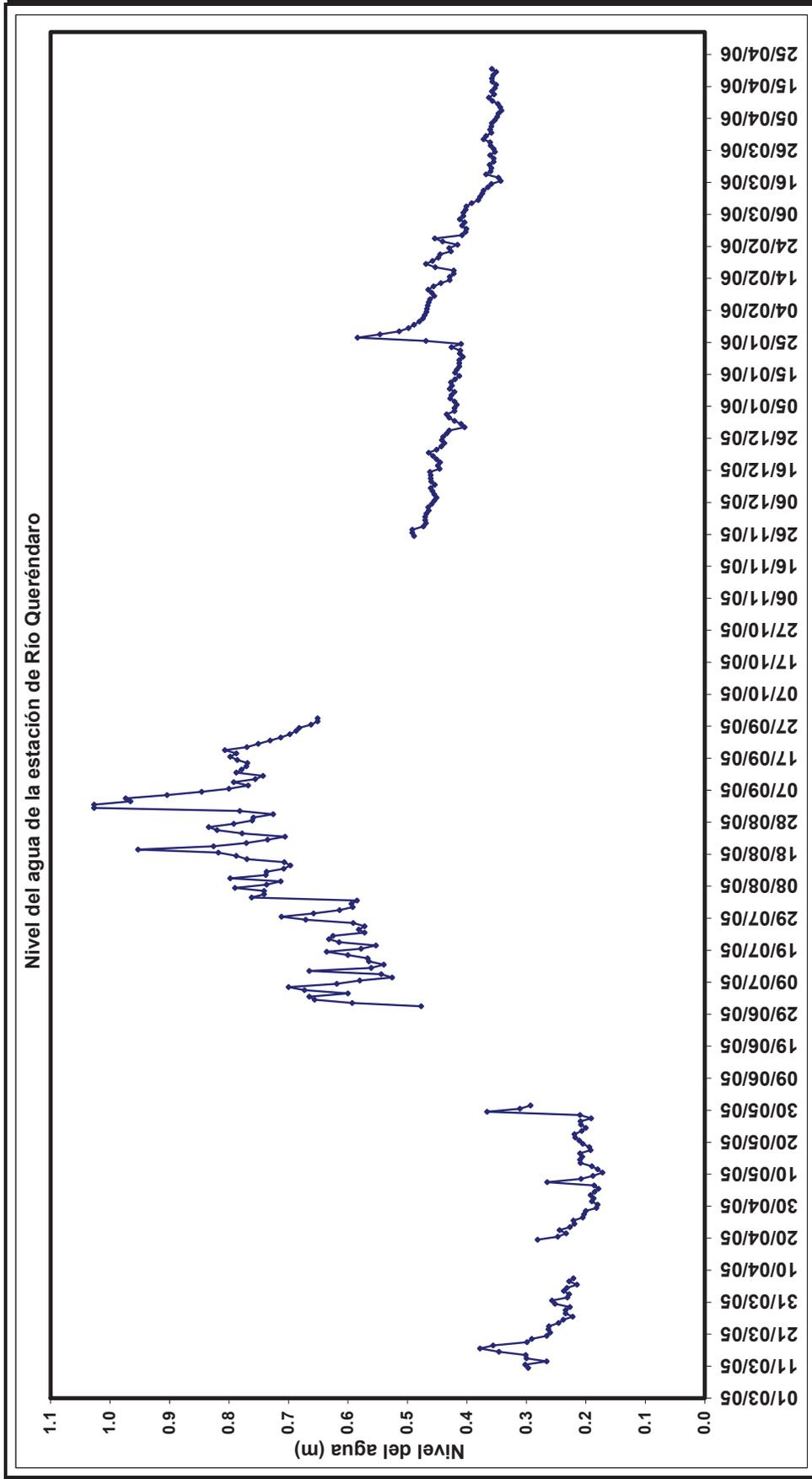


Figura 18. Comportamiento del nivel de agua del Río Queréndaro

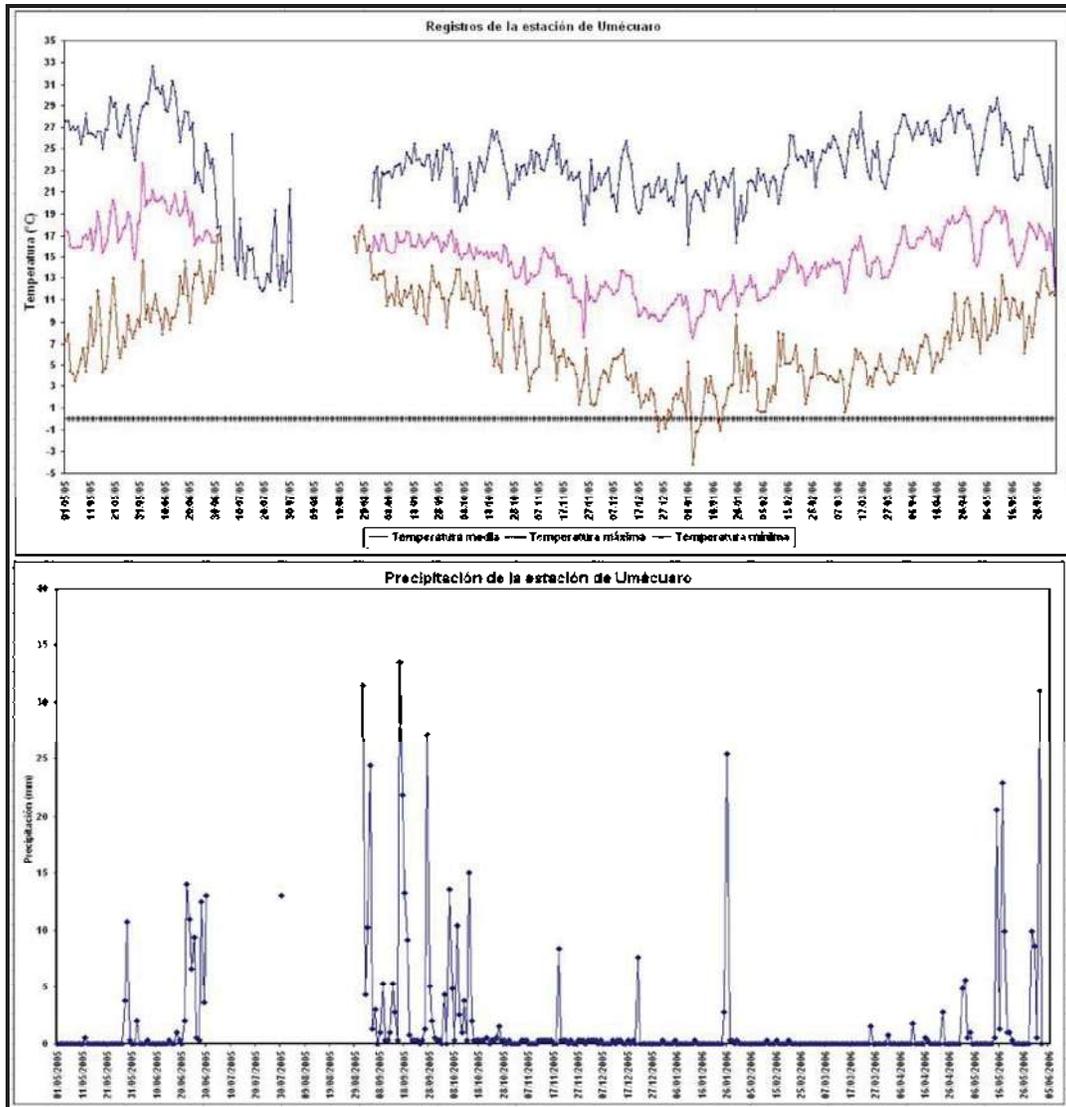


Figura 19. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación de Umécuaro

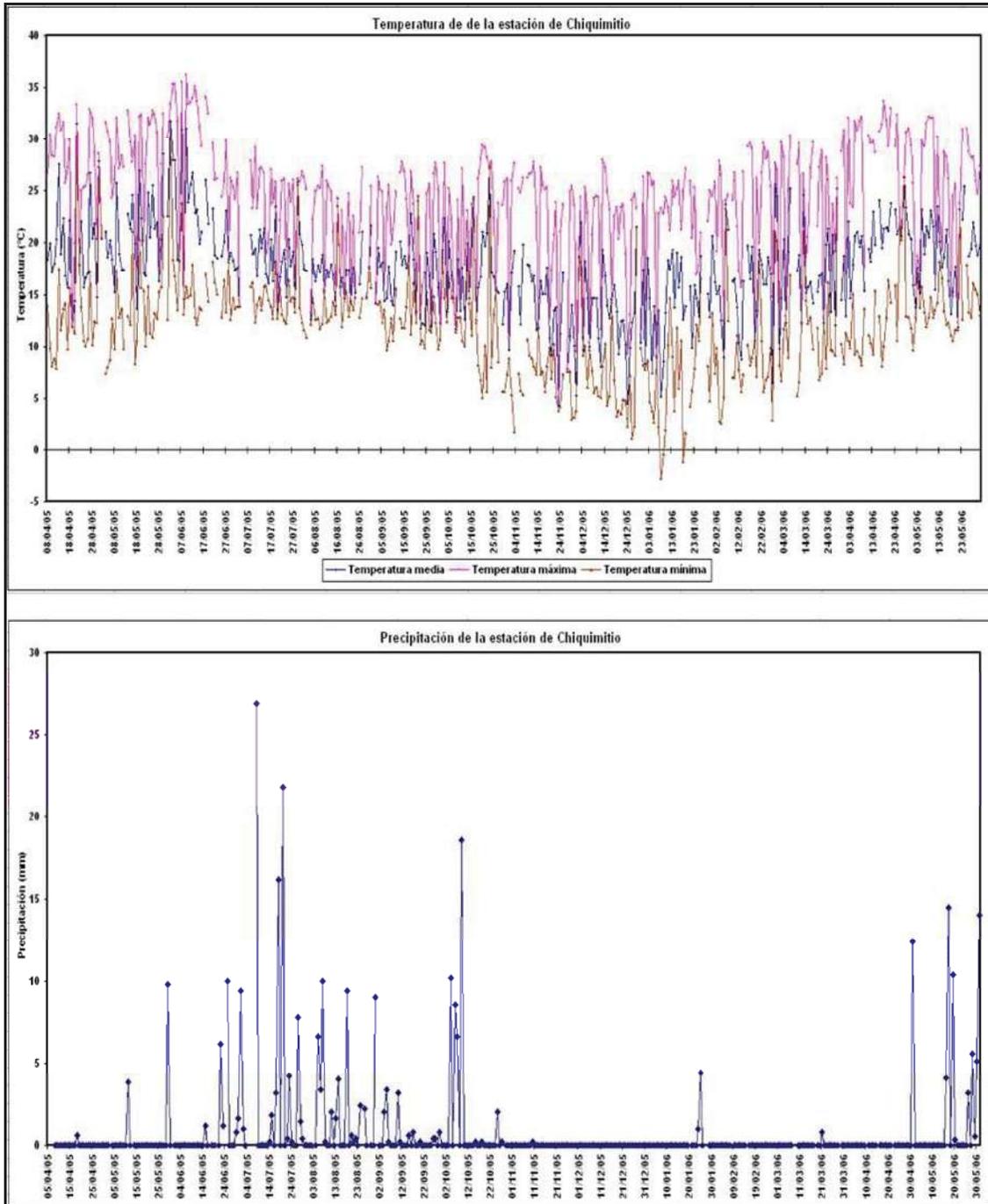


Figura 20. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación de Chiquimitio

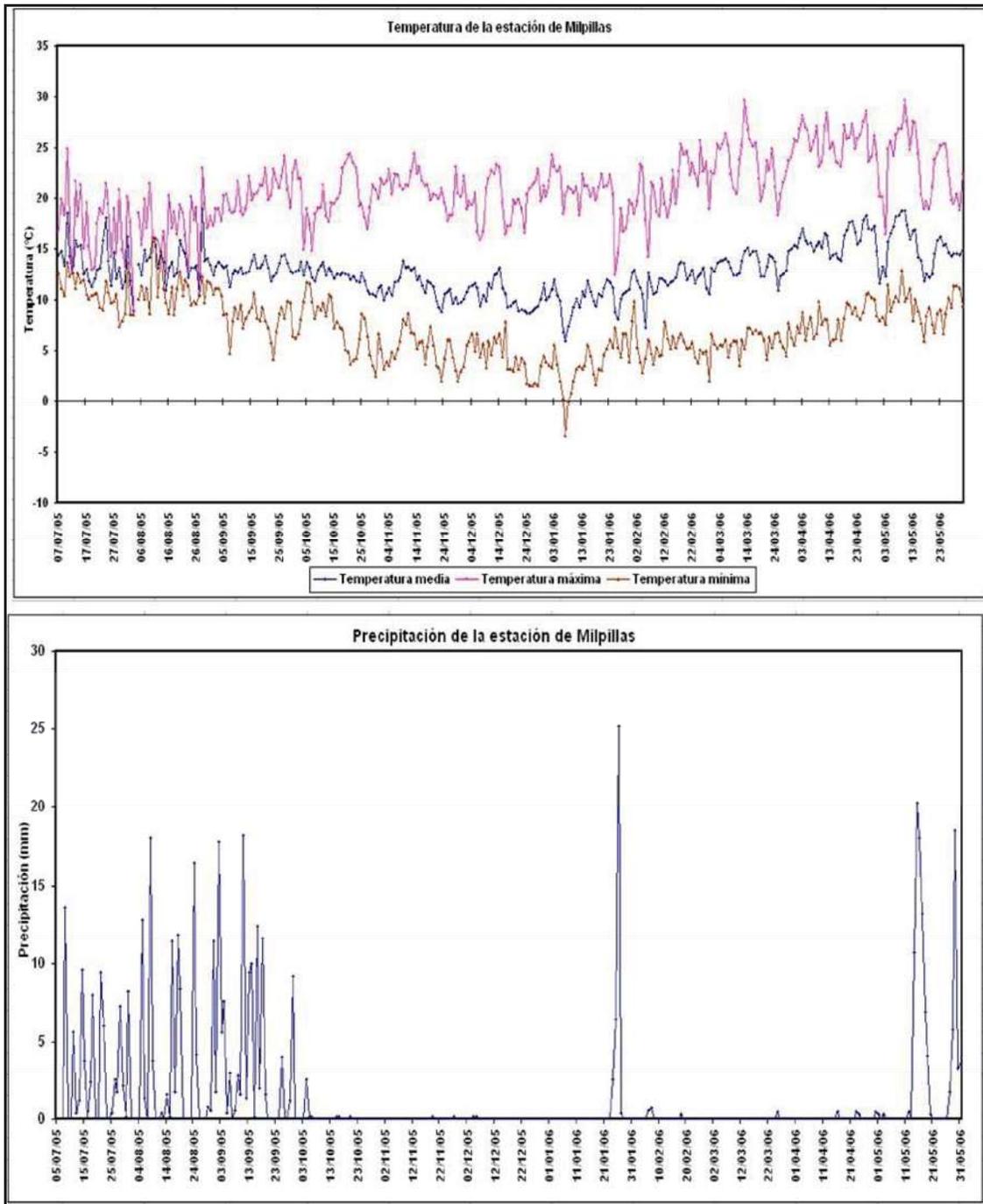


Figura 21. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación de Milpillas

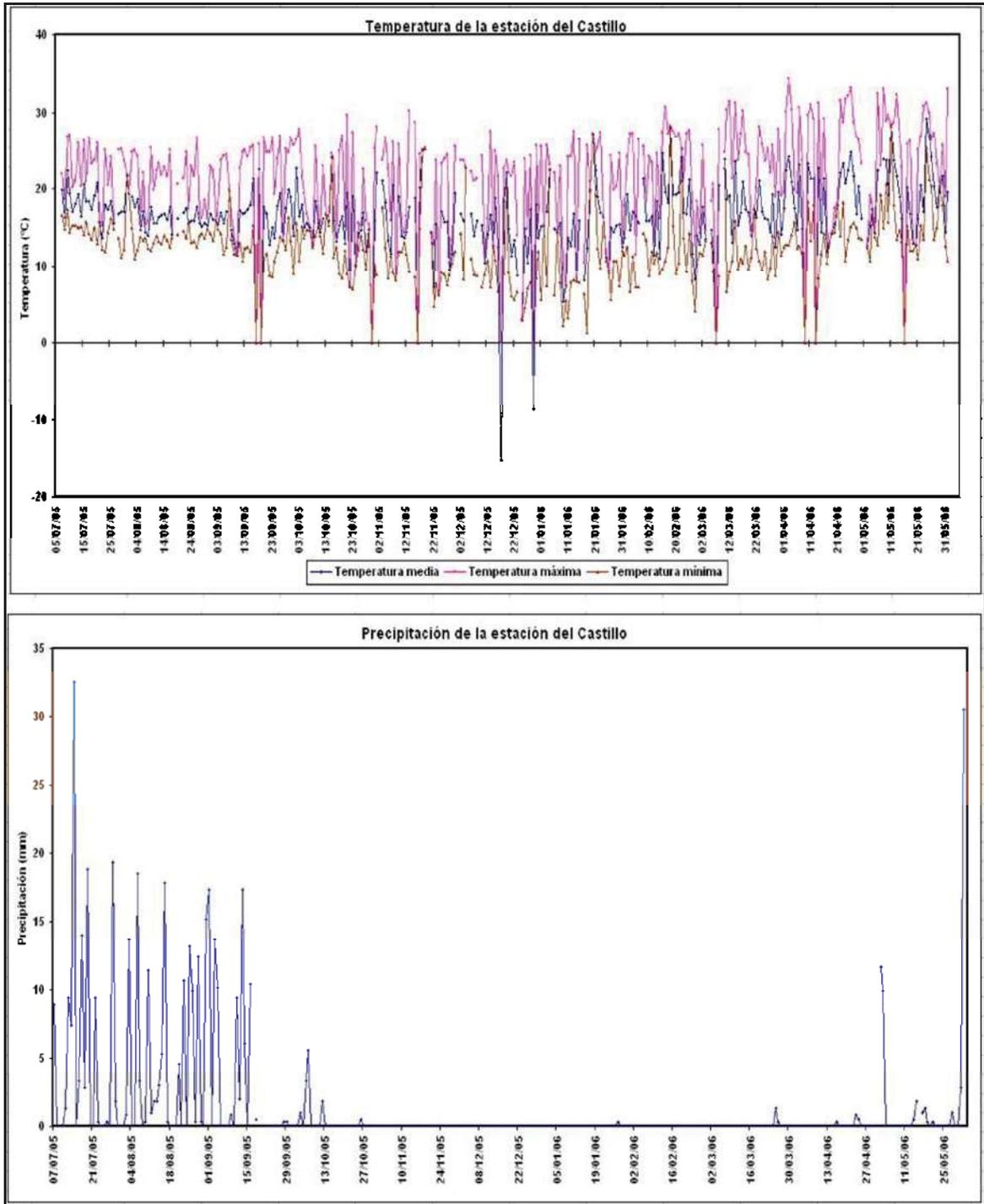


Figura 22. Comportamiento de la temperatura y las precipitaciones en la estación del Castillo

5.3. CONCLUSIONES

De acuerdo a los datos de los climogramas se puede concluir que prácticamente para todas las estaciones, las temperaturas más altas se registraron durante los meses de abril, mayo y junio. Mientras que las precipitaciones se concentran en los meses de

julio, agosto, septiembre y octubre, lo cual coincide con un descenso de las temperaturas registradas. La estación de Zinapécuaro registró la mayor precipitación, que se caracteriza por una concentración marcada en los meses de julio, agosto y septiembre.

El análisis de tendencias con la prueba Kenndall para las precipitaciones anuales indica que las estaciones de Huingo, Jesús del Monte, Presa Malpais y Zinapécuaro han presentado un aumento estadísticamente significativo (Figura 12). Aunque es notorio que en los últimos 7 años todas las estaciones tienden a incrementar sus precipitaciones, excepto la estación de Cuitzeo. En general los comportamientos son muy variables para todas las estaciones a lo largo de los años. Jesús del Monte, seguida por la estación Zinapécuaro son las estaciones más húmedas, se observan claros patrones cíclicos, antes de 1958 seco, 1958 extremadamente húmedo, 1960 a 1980 más húmedo, 1980-2000 relativamente seco y después un poco más húmedo.

Las estaciones que tienden a aumentar su temperatura de acuerdo a la prueba Kenndall de manera significativa tanto sus valores mensuales como en el valor medio anual son: Morelia, Presa Malpais, Zinapécuaro y Santiago Undameo; mientras que las que tienden a una disminución son las de Cuitzeo y Huingo (Figura 9). Lo cual sugiere tendencias de cambio climático, ya que de las 8 estaciones analizadas, 5 presentan cambios estadísticamente significativos.

El análisis de tendencia para gastos de la estación de Santiago Undameo con la prueba Kenndall tienden a aumentar significativamente en varios meses del año y el acumulado anual. Mientras que los registros de los gastos en Queréndaro y Guadalupe tienden a disminuir en forma significativa. Lo cual podría estar asociado en la reducción del flujo base como consecuencia de un abatimiento de las aguas subterráneas que alimentan los escurrimientos permanentes. El patrón contrario se presentó en Santiago Undameo (aumento), puede ser debido al aporte de agua subterránea, ya que la estación registra los aforos provenientes de un distrito de riego, localizado aguas arriba, que se puede convertir en un factor importante de recarga para tener un incremento en el escurrimiento.

La variabilidad interanual puede corresponder con las variaciones que se presentan en las variables año tras año; es decir, que la inestabilidad climática en estudio no es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o debajo de lo normal. Esta variabilidad climática podría estar asociada con el balance global de radiación (Montealegre, 1999). Como ejemplo de esta inestabilidad está la ocurrencia de los ciclos El Niño-La Niña. Ya que aún cuando el Niño esta solamente presente en el

Pacífico tropical, sus efectos se sienten indirectamente en otras partes del mundo interrumpiendo los patrones de la corriente y por lo tanto de la precipitación (Glantz, 2000).

Respecto a las estaciones hidrometeorológicas que fueron instaladas durante la presente investigación es posible indicar que aun cuando contribuyen al enriquecimiento de las bases de datos, no se puede realizar aún un análisis, dado que el periodo de tiempo que llevan registrando es muy corto. Es importante mencionar que los espacios que no presentan registros, se deben a cuestiones de falta de apoyo de parte de la sociedad, ya que se han presentado daños a los equipos.

5.4. BIBLIOGRAFÍA

1. CNA (Comisión Nacional del Agua), 2005. *Climatic Computer Program, Comisión Nacional del Agua*. Disco Compacto.
2. Euscategui, C. 2002. *Estado de los glaciares en Colombia y análisis de la dinámica glacial en el parque los nevados, asociada al cambio climático global*. Tesis de grado Magíster en Meteorología. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias-departamento de geociencias. Bogota Colombia.
3. García E. 2005. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. UNAM. Serie Libros, Núm. 6.
4. García M, Z. 2001. *Los modelos numéricos de predicción del tiempo*. TETHYS, Número 2, Art. 5.
5. Glantz, M. H. 2000. *Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society*. Cambridge Univ. Press, New York.
6. <http://ca.wikipedia.org/wiki/Climograma>
7. Hirsch, R.M., D.R. Hesel, T.A. Cohn y E.J. Gilroy (1993), “*Statistical analysis of hydrologic data*”, In: Maidment (editor), *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, New York.
8. Kendall, M. G. 1938. *A new measure of rank correlation*. Biometrika 30: 81–93.
9. Ludevid, M. (1997): *El Cambio Global en el medio ambiente*. Editorial Alfaomega, 332p. Barcelona, España.
10. McCuen, R. H. and Snyder, W. M., 1986, *Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., p. 563.

11. Mendoza, M.E., G. Bocco, M. Bravo, E. López, and R. Osterkanp. 2006. *Predicting Water-Surface Fluctuation of Continental Lakes: A RS and GIS Based Approach in Central Mexico*. Water Resources Management: 1-21.
12. Molnár, P. y Ramírez J. 2001. *Recent trends in Precipitation and Streamflow in the Rio Puerco Basin*. Journal of climate. 14 (10). 2317-2328.
13. Montealegre, J. E. 1999. *La influencia de los procesos de interacción oceano-atmósfera del Pacífico tropical y el Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia*. Tesis de Maestría en Meteorología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
14. Salas J. D. 1992. *Analysis and modeling of hydrological time series*. En Maidment. 1992. Handbook of Hydrology. McGraw Hill, New Cork.
15. Watson, R., Zinyowera M. & MOSS, R. 1997. *Resumen para responsables de políticas: Impactos Regionales del Cambio Climático: evaluación de la vulnerabilidad*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. 27 pp.
16. Watson, R. 2001. *Climate Change 2001*. Synthesis Report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra.
17. Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., and Yuzyk, T. R. 2001. *Trends in Canadian streamflow*. Water Resources Research 37(3), 987–998.

6. CARACTERIZACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO CON BASE EN UN ANÁLISIS DE CONGLOMERADO.

6.1. INTRODUCCIÓN

El análisis multivarido (AM) es la rama de las matemáticas que trata de prueba simultánea de numerosas variables. La necesidad del AM surge siempre que se mide más de una característica en cierto número de individuos, y el análisis de las relaciones entre dichas características, hace necesario que sean estudiadas simultáneamente (Orlóci, 1978; Greig-Smith, 1980; Gauch, 1979).

Una de los análisis que se practican con el AM es el análisis de conglomeración. El objetivo del análisis de conglomeración es clasificar una muestra de entidades (individuos o variables) en un número pequeño de grupos de forma que las observaciones pertenecientes a un grupo sean muy similares entre sí y muy disimilares del resto. A diferencia del Análisis Discriminante, en el Análisis conglomeración se desconoce el número y la composición de dichos grupos (Gauch, 1982; Goodall, 1978; Johnson, 2000).

El propósito del análisis de conglomerados es el agrupar las observaciones de forma que los datos sean muy homogéneos dentro de los grupos (mínima varianza) y que estos grupos sean lo más heterogéneos posible entre ellos (máxima varianza). De este modo obtenemos una clasificación de los datos multivariante con la que podemos comprender mejor los mismos (Gauch, 1982). Este análisis no hace ninguna distinción entre variables dependientes y variables independientes, sino que calcula las relaciones interdependientes de todo el conjunto de variables. La clasificación puede ser un éxito, si los atributos dentro del conglomerado están muy cercanos unos de otros, mientras que los conglomeración diferentes están muy apartados (Kunz, 1988).

a. Objetivo

Construcción de un modelo geográfico que agrupe las distintas subcuencas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

b. Materiales y métodos

El análisis de conglomeración se realizó con el propósito de regionalizar las subcuencas de acuerdo con sus características biofísicas presentes en las 52 subcuencas localizadas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Cuadro 1).

El análisis final incluyó la superficie de coincidencia de 65 variables dentro de cada subcuenca. Las variables seleccionadas fueron: 19 clases de relieve (geomorfología), 4 clases de pendiente, 3 clases de densidad de disección, 3 clases de textura de suelo, 16 clases de tipos de rocas, 21 clases de cobertura del año de 1975 y 19 clases para la cobertura del 2000 (Figura 2 y 3). Así como también un análisis individual de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo, con intención de observar los cambios entre los grupos formados mediante el análisis de conglomeración. Las variables utilizadas se ponderaron pasando su valor superficial a valores de porcentaje.

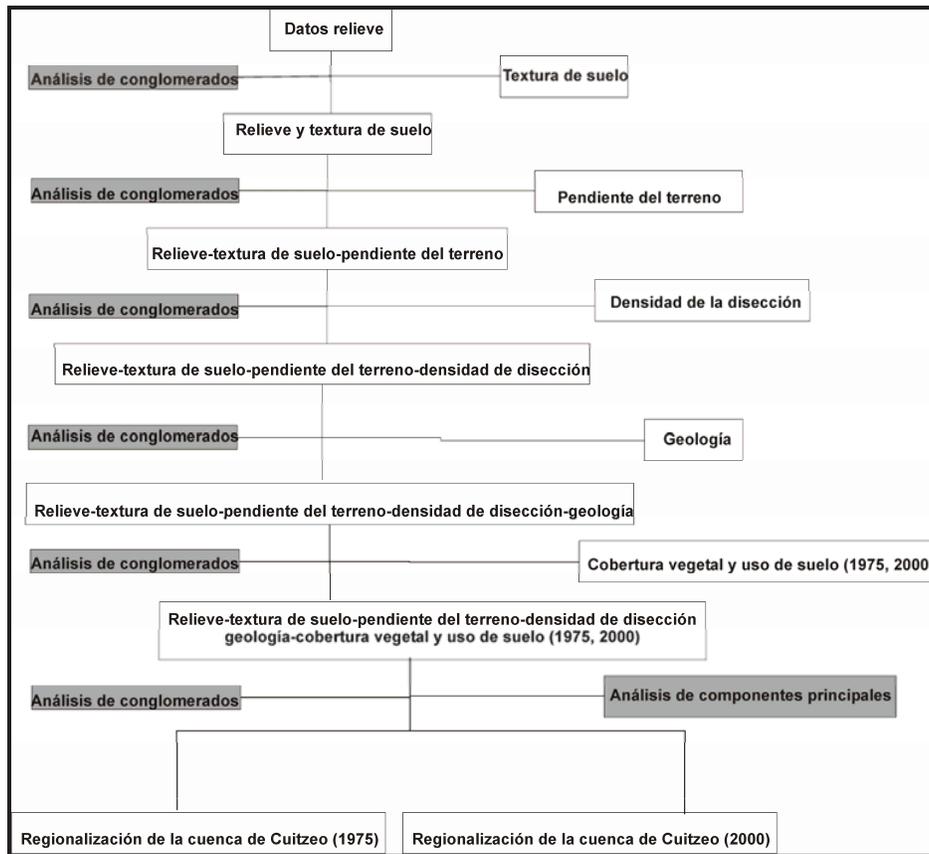


Figura 1. Diagrama de metodología

Consideramos a *priori*, que las tres subcuencas mencionadas son representativas de varias subcuencas en la cuenca del Lago de Cuitzeo; es decir, pueden considerarse a las subcuencas mencionadas como de referencia dentro del área de estudio. El producto de esta integración es un mapa que muestra los grupos de subcuencas y que subcuencas se agrupan a nuestras cuencas de referencia. Dentro de los grupos formados se realizó el análisis multicriterio, con base en su extensión territorial, nivel de contigüidad, porcentaje de bosques y matorrales y número de subcuencas con el objeto de ordenar

secuencialmente la importancia de cada región, como una función de su naturalidad, amplitud y significado geográfico.

Finalmente se realizó un análisis de componentes principales para saber los datos que más se relacionaban a los grupos formados y cuáles variables eran las que se encontraban más lejanas a nuestros grupos que se formaban con el análisis de conglomeración.

	VARIABLES	SIGNIFICADO	
UNIDADES DE RELIEVE	Cl	Colada de lava	
	Cv	Cono volcánico	
	Ca	Cuerpos de agua	
	Di	Depresión interfluvial	
	Ei	Elevación inclinada	
	Le	Laderas escarpadas	
	Li	Laderas inclinadas	
	Ls	Laderas suaves	
	L	Lago	
	M	Mesa	
	Pd	Piedemonte	
	Pdi	Piedemonte inclinado	
	Pdm	Piedemonte medio	
	Pds	Piedemonte superior	
	Pl	Planicie	
	Plf	Planicie fluvial	
	Sc	Superficie cumbre	
	V	Valle	
	Zi	Zona de inundación	
	TEXTURA DE SUELOS	Fina	Textura
Gruesa			
Media			
PENDIENTE	0-3	Pendiente	
	3-10		
	10-25		
	>25		
DENSIDAD DE DISECCIÓN	0-1 km ² /km ²	Densidad de disección	
	1-2 km ² /km ²		
	> 2 km ² /km ²		
UNIDADES GEOLOGICAS	B	Basaltos	
	BA	Basaltos y andesitas	
	BD	Basaltos y dacitas	
	CA	Conos andesíticos	
	CL	Conos de lava	
	C. agua	Cuerpos de agua	
	C.SvD	Cuerpos subvolcánicos dioríticos	
	DC	Depósitos de caída	
	DL	Depósitos lacustres	
	DS	Depósitos superficiales	
	DA	Domos andesíticos	
		Domos dacíticos y riolíticos	
	DDR	Domos dacíticos	
	DD	Domos riolíticos	
	DR	Domos riolíticos	
	I	Ignimbritas	
	VM	Volcanes monogenéticos	
	A	Acuicultura	
	COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO	AH	Asentamientos humanos
		B	Bordos
BA		Bosque abierto	
BC		Bosque cerrado	
BS		Bosque semiabierto	
		Cuerpos de agua naturales	
CAN			
		Cultivos estacionales de riego	
CER			
		Cultivos estacionales de temporal	
CET			
H		Huertas	
MC		Matorral cerrado	
MPA		Matorral pastizal abierto	
		Matorral pastizal semiabierto	
MPS			
P		Pastizal	
PA		Plantaciones abiertas	
PC		Plantaciones cerradas	
		Plantaciones semiabiertas	
PS			
SD	Suelo desnudo		
TB	Terranos baldíos		
VA	Vegetación subacuática		

Figura 2. Variables utilizadas para el análisis

Cuadro 1. Códigos dados a las subcuencas en los dendrogramas

Subcuencas	Código
Araró	A1
Arroyo Blanco	A2
Arroyo Colorado	A3
Arroyo el Moral	A4
Arroyo el Timbinales	A5
Atécuaro	A6
Bordo Prieto	B1
Buenavista	B2
Bueyadero	B3
Cerro Pelón	C1
Charo	C2
Chucándiro	C3
Chupícuaro	C4
Copándaro	C5
Cápula	C6
Cuanajo	C7
Cuto de la Esperanza	C8
Cuto del Porvenir	C9
El Derramadero	E1
El Fresnito	E2
El Pedregal	E3
El Rocío	E4
El Sauz	E5
El Tlacuache	E6
Fontezuelas	F1
Huandacareo	H1
Irámuco	I1
Jaripeo	J1
La Estancia	L1
Lago	L2
Lagunillas	L3
Las Cruces	L4
Las Pilas	L5
Los Naranjos	L6
Los Pirules	L7
Mesón Nuevo	M1
Nicolás Tumbiscatio	N1
Ojos de Agua	O1
Piñícuaro	P1
Queréndaro	Q1
Quinceo	Q2
Río Chiquito	R1
Río Grande	R2
San Andrés	S1
San Juan Tarárameo	S2
San Lucas Pío	S3
San Marcos	S4
San Pedro Bogan	S5
San Sebastián	S6
Santa Inés	S7
Santa Rita	S8
Tarímbaro-Queréndaro	T1
Umécuaro	U1
Zinapécuaro	Z1
Zona de Inundación	Z2

6.2. RESULTADOS

El análisis primeramente se llevó a cabo de manera escalonada, donde el primer análisis fue de las diferentes unidades geomorfológicas (Figuras 4 y 5), presentes en la cuenca del Lago de Cuitzeo, integrada por 52 subcuencas. Posteriormente, se integró la

información de las texturas del suelo, los tipos de roca, pendiente del terreno, densidad de disección y la cobertura vegetal y uso del suelo (1975 y 2009). Es decir, el análisis integró los diferentes componentes del medio biofísico (paisaje).

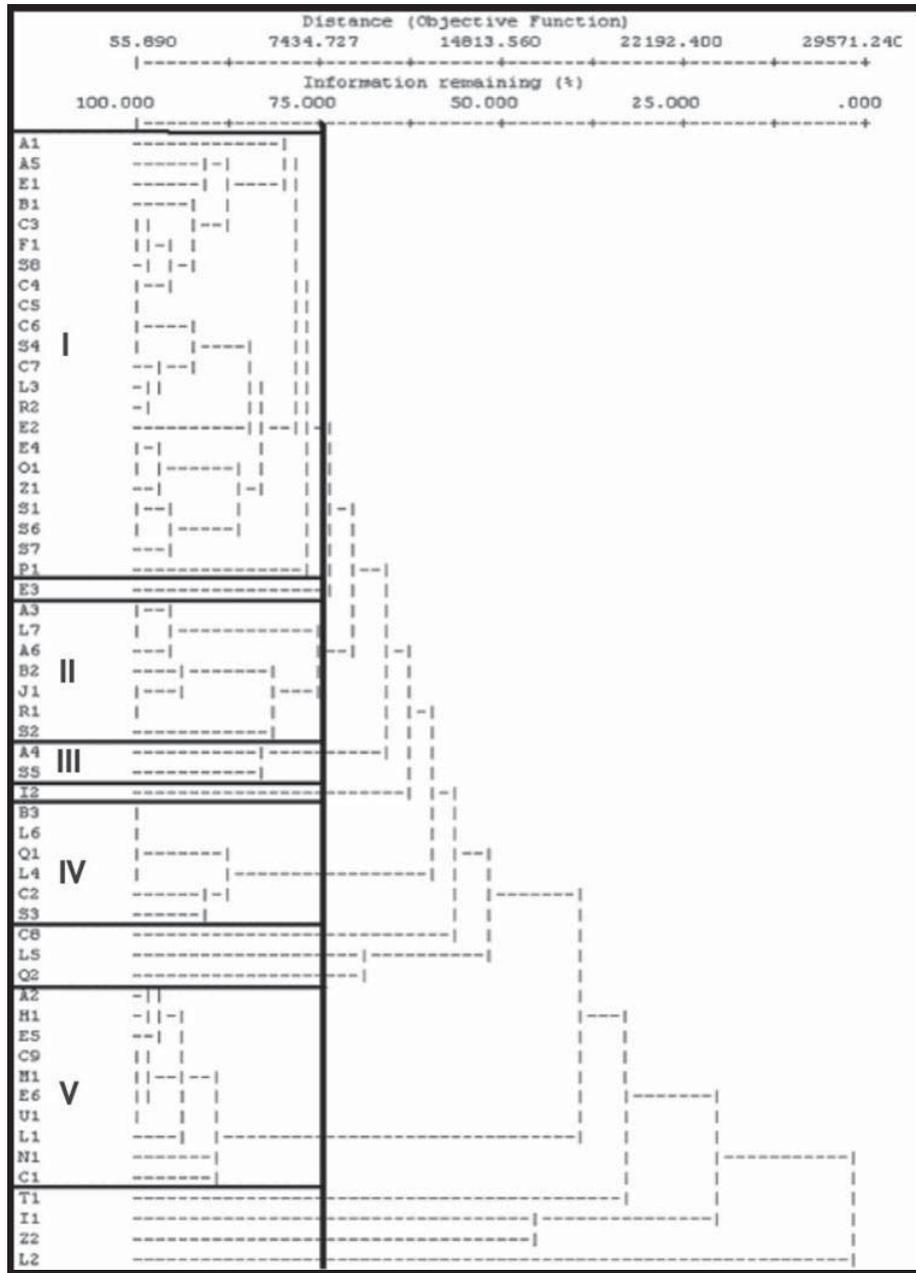


Figura 4. Dendrograma del análisis de conglomeración para los atributos de unidades de relieve

a. Análisis de unidades de relieve

El análisis de las unidades de relieve generó cinco grupos (Figura 4, Cuadro 2). El grupo con el mayor agrupamiento fue el I: dentro de este grupo las subcuencas más semejantes son: Chucándiro, Fontezuelas, Santa Rita y Chupícuaro con un nivel de

agrupamiento cercano a 95%; el siguiente subgrupo incluyó a las subcuencas de El Rocío, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Andrés, San Sebastián y Santa Inés, las cuales presentan una semejanza igual al grupo anterior. Mientras que las subcuencas de Copándaro, Cápula, San Marcos, Cuanajo, Lagunillas y Río Grande, presentaron un agrupamiento del 90% (Figuras 4 y 5).

Cuadro 2. Subcuencas agrupadas en el análisis de Conglomeración de las unidades de relieve

Grupo	Subcuencas
I	Araró, Arroyo el Timbinales, El Derramadero, Bordo Prieto, Chucándiro, Fontezuelas, Santa Rita, Chupícuaro, Copándaro, Cápula, San Marcos, Cuanajo, Lagunillas, Río Grande, El Fresnito, El Rocío, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Andrés, San Sebastián, Santa Inés y Piñicuaro
II	Arroyo Colorado, Los Pirules, Atécuaro, Buenavista, Jaripeo, Río Chiquito y San Juan Tarárameo
III	Arroyo el Moral y San Pedro
IV	Bueyadero, Los Naranjos, Queréndaro, Las Cruces, Charo y San Lucas Pío
V	Arroyo Blanco, Huandacareo, El Sauz, Cuto del Porvenir, Mesón Nuevo, El Tlacuache, Umécuaro, La Estancia, Nicolás Tumbiscatio y Cerro Pelón
No agrupadas	Cuto de la Esperanza, Las Pilas, El Pedregal y Quinceo

El grupo II presentó un nivel de agrupamiento de 75% (Figuras 3 y 4, Cuadro 2). Dentro de este grupo se encuentran tres subgrupos. El primero lo integran las subcuencas de Arroyo Colorado, Los Pirules y Atécuaro, las cuales presentan un agrupamiento de 90%. El segundo subgrupo incluyó las subcuencas de Buenavista, Jaripeo y Río Chiquito. Este subgrupo integró posteriormente a un tercer subgrupo al que pertenece la subcuenca de San Juan Tarárameo. En conjunto los tres subgrupos presentaron un agrupamiento de 75% (Figuras 4 y 5).

El grupo III es el que menos subcuencas agrupó (2 subcuencas) (Cuadro 2). El grupo IV incluyó 6 subcuencas (Cuadro 2), se conforma por las subcuencas de Bueyadero, Los Naranjos, Queréndaro y Las Cruces, que son muy semejantes; éstas posteriormente se integraron a un segundo subgrupo constituido por las subcuencas de Charo y San Lucas Pío. El agrupamiento del grupo fue de 88%, aproximadamente, (Figuras 4 y 5).

El grupo V integró 10 subcuencas (Cuadro 2, Figuras 4 y 5). Este grupo se formó por cinco subgrupos, pero los más importantes por la cantidad de subcuencas que agrupan son dos (Figuras 3 y 4). El primero incluyó a las subcuencas de Arroyo Blanco, Huandacareo y El Sauz; el otro subgrupo se integró por las subcuencas de Mesón Nuevo, El Tlacuache y Umécuaro, estos posteriormente se unieron a los otros tres subgrupos, que finalmente presentaran una semejanza de 85%, (Figuras 3 y 4).

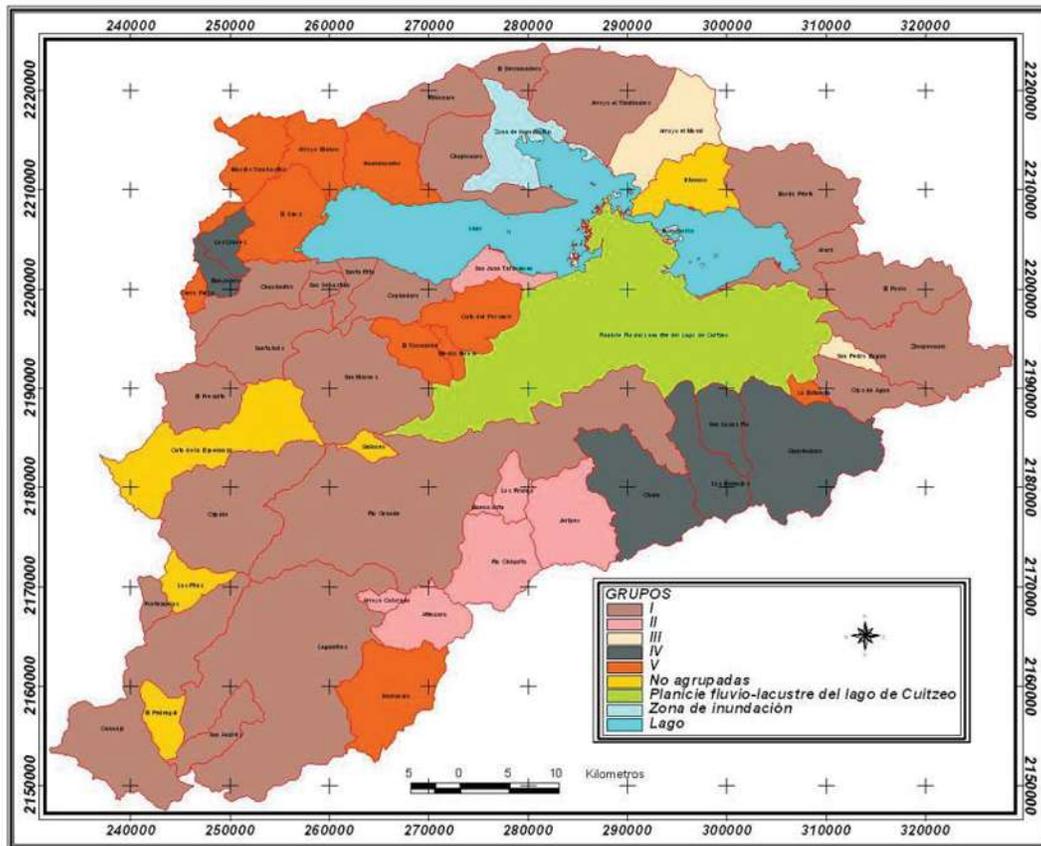


Figura 5. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve

El análisis de conglomeración basado en las características geomorfológicas, generó cinco grupos, con un nivel de agrupamiento superior al 75%, agrupando 47 subcuencas. Los grupos con mayor superficie fueron el I, V y III (Figuras 4 y 5). Cuatro subcuencas no pudieron ser agrupadas (Cuto de la Esperanza, Las Pilas, El Pedregal y Quinceo).

b. Análisis de unidades de relieve y texturas de suelos

El análisis de conglomeración basado en las unidades de relieve y texturas de suelos incluyó un total de 22 variables; se formaron seis grupos (Figuras 6 y 7, Cuadro

3). Los grupos con un menor nivel de agrupamiento fueron el II, V y VI que agruparon únicamente ocho subcuencas entre los tres (Figuras 6 y 7, Cuadro 3). Los grupos con un mayor nivel de agrupamiento fueron el I, III y IV.

Cuadro 3. Subcuencas agrupadas en el análisis de conglomeración con las variables de unidades de relieve y textura de suelos

GRUPOS	SUBCUENCAS
I	Cápula, Cuanajo, El Rocío, Fontezuelas, Ojos de agua, Zinapécuaro, San Andrés, El Pedregal, San Pedro Bogan
II	Jaripeo, Los Pirules, Río Chiquito
III	Arroyo Blanco, Huandacareo, La Estancia, Atécuaro, Cerro Pelón, Bordo Prieto, Lagunillas, Chucándiro, Santa Inés, El Fresnito, Río Grande, San Marcos.
IV	Arroyo el Moral, San Juan Tarárameo, Arroyo el Timbínales, El Derramadero, Chupícuaro, Copándaro, Santa Rita, San Sebastián, Cuto del Porvenir, Mesón Nuevo, El Tlacuache, El Sauz, Nicolás Tumbiscatio, Piñicuaro.
V	Bueyadero, Las Cruces, Charo, San Lucas Pío.
VI	Los Naranjos, Queréndaro.
No agrupadas	Irámuco, Cuto de la Esperanza, Quinceo, Araró, Umécuaro, Arroyo Colorado, Buenavista, Las Pilas.

El grupo I formó dos subgrupos principales; el primero agrupó cuatro subcuencas con un agrupamiento de 88%, que posteriormente se unió al segundo subgrupo que está conformado por tres subcuencas con un agrupamiento de 92%. Posteriormente se unen dos subcuencas más para presentar un agrupamiento final de 80% (Figuras 6 y 7).

El grupo III formó dos subgrupos principales. El primero conformado por 4 subcuencas con un agrupamiento de 88% aproximadamente; y posteriormente se unió un segundo subgrupo conformado por siete subcuencas con un agrupamiento de 84% aproximadamente (Figuras 6 y 7).

El grupo IV agrupó 14 subcuencas las cuales formaron tres subgrupos principales, el primero lo formaron las subcuencas de Arroyo el Timbínales, El Derramadero y Chupícuaro con un agrupamiento prácticamente del 100%; el segundo subgrupo lo formaron las subcuencas de Copándaro, Santa Rita y San Sebastián con un agrupamiento del 90% aproximadamente; el tercer subgrupo formado por las subcuencas de Cuto del Porvenir, Mesón Nuevo, El Tlacuache, El Sauz y Nicolás Tumbiscatio con un agrupamiento aproximado del 93%; las tres subcuencas restantes se integraron posteriormente y que juntas todas presentaron un agrupamiento del 75% (Figuras 6 y 7).

En general, para este análisis de unidades de relieve y texturas de suelos, se formaron VI grupos. Los grupos IV y V estuvieron muy relacionados, ya que son los que posteriormente se unen. Aunque también se integraron a estos grupos el III el cual es muy representativo por la cantidad de subcuencas que agrupó (Figura 7). Cinco subcuencas no se agruparon, entre ellas se encuentra la subcuenca de la presa de Umécuaro.

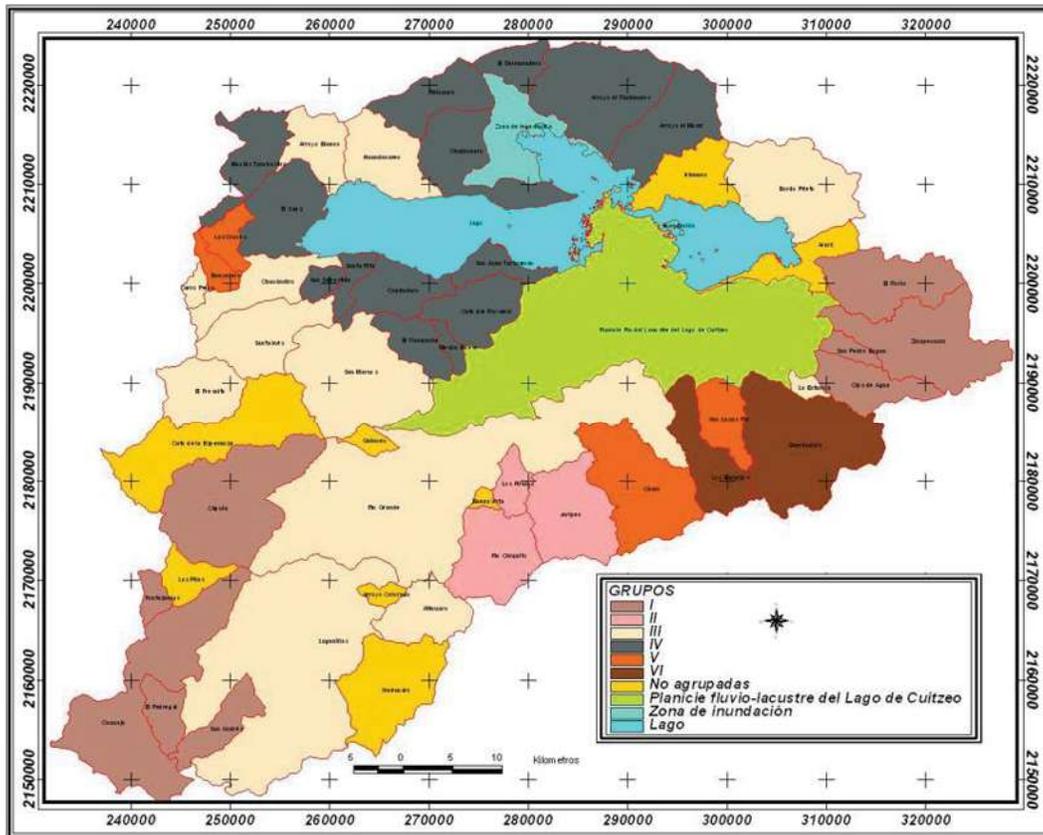


Figura 6. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve y texturas de suelo.

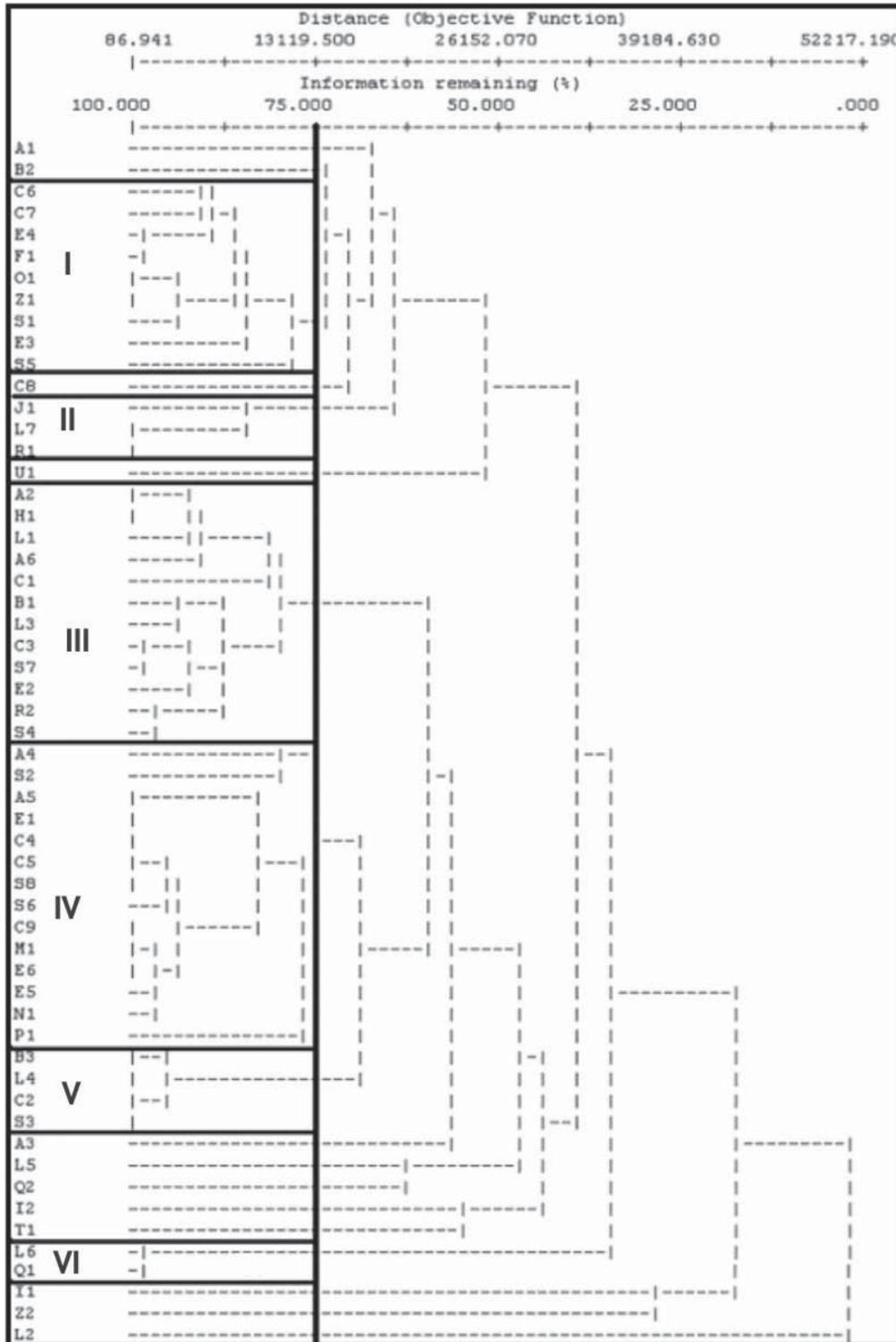


Figura 7. Análisis de conglomeración de unidades de relieve y texturas suelos

c. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos y pendiente del terreno.

Las variables analizadas con este procedimiento fueron 26; el resultado del análisis fue la formación de ocho grupos (Figura 8, Cuadro 4). Los grupos con un menor

nivel de agrupamiento fueron el II, VIII, III, VII y IV. Los grupos II y VIII agruparon únicamente dos subcuencas cada uno, mientras que el grupo III agrupó tres subcuencas, los grupos VII y IV agruparon cuatro subcuencas cada uno (Figuras 8 y 9, Cuadro 4).

Cuadro 4. Subcuencas agrupadas en el análisis de conglomeración con las variables de relieve, textura de suelos y pendiente

GRUPOS	SUBCUENCAS
I	Cápula, Cuanajo, Cuto de la Esperanza, Fontezuelas, El Rocío, El Pedregal, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Andrés, San Pedro Bogan.
II	Atécuaro, Jaripeo.
III	Buenavista, Los Pirules, Río Chiquito.
IV	Arroyo Blanco, Huandacareo, La Estancia, Cerro Pelón.
V	Copándaro, Santa Rita, Cuto del Porvenir, El Sauz, Nicolás Tumbiscatio, San Sebastián, El Tlacuache, Mesón Nuevo.
VI	Arroyo el Moral, Arroyo el Timbínales, Chupícuaro, El Derramadero, Piñicuaro, Bordo Prieto, Lagunillas, Chucándiro, Santa Inés, El Fresnito, Río Grande, San Juan Tarárameo, San Marcos.
VII	Bueyadero, Las Cruces, Charo, San Lucas Pío.
VIII	Los Naranjos, Queréndaro.
No agrupadas	Irámuco, Aráro, Quinceo, Las Pilas, Arroyo Colorado, Umécuaro.

Los grupos más importantes por el nivel de semejanza y la cantidad de subcuencas agrupadas fueron: I, V y VI.

El grupo I formó dos subgrupos importantes por la cantidad de subcuencas agrupadas. El primer subgrupo estuvo conformado por Cápula, Cuanajo, Cuto de la Esperanza, Fontezuelas y El Rocío que presentaron un agrupamiento del 85%. El segundo subgrupo se formó por las subcuencas de El Pedregal, Ojos de Agua, Zinapécuaro y San Andrés con 88%; estos dos subgrupos posteriormente se unieron a la subcuenca de San Pedro Bogan; juntos presentaron un agrupamiento del 82% (Figura 8).

El grupo V formó dos subgrupos importantes. El primero se formó por las subcuencas de Copándaro, Santa Rita, Cuto del Porvenir, San Sebastián y El Sauz con un agrupamiento del 88%. El segundo subgrupo lo formaron las subcuencas de El Tlacuache y Mesón Nuevo. Estos subgrupos al unirse presentaron un agrupamiento de 82% (Figura 8).

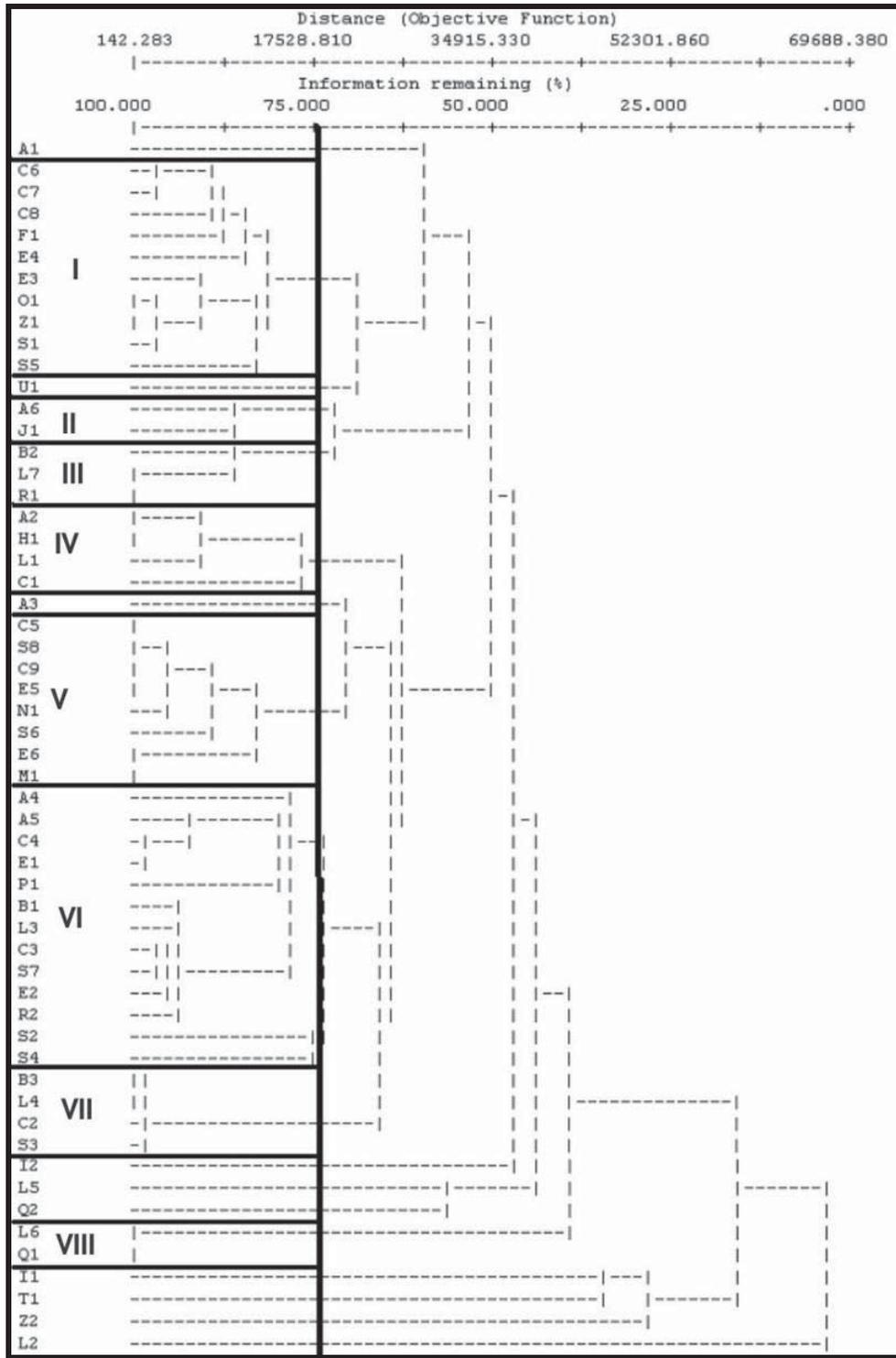


Figura 8. Dendrograma con grupos formados con los tipos de relieve, textura de suelo y pendiente del terreno

El grupo VI es el que más subcuencas agrupó (Cuadro 4). El grupo VI incluyó dos subgrupos importantes. El primer subgrupo lo formaron las subcuencas de Arroyo

el Timbínales, Chupícuaro y El Derramadero con un agrupamiento del 88% aproximadamente; mientras que el segundo subgrupo lo formaron las subcuencas de Lagunillas, Chucándiro, Santa Inés, El Fresnito y Río Grande con un agrupamiento del 90%. Las subcuencas de Arroyo el Moral y Piñicuaro se integraron al primer subgrupo. Finalmente se integraron las subcuencas de San Juan Tarárameo y San Marcos (Figuras 8 y 9). Los grupos restantes (II, VIII, III, VII y IV), agruparon pocas subcuencas (Cuadro 4, Figuras 8 y 9).

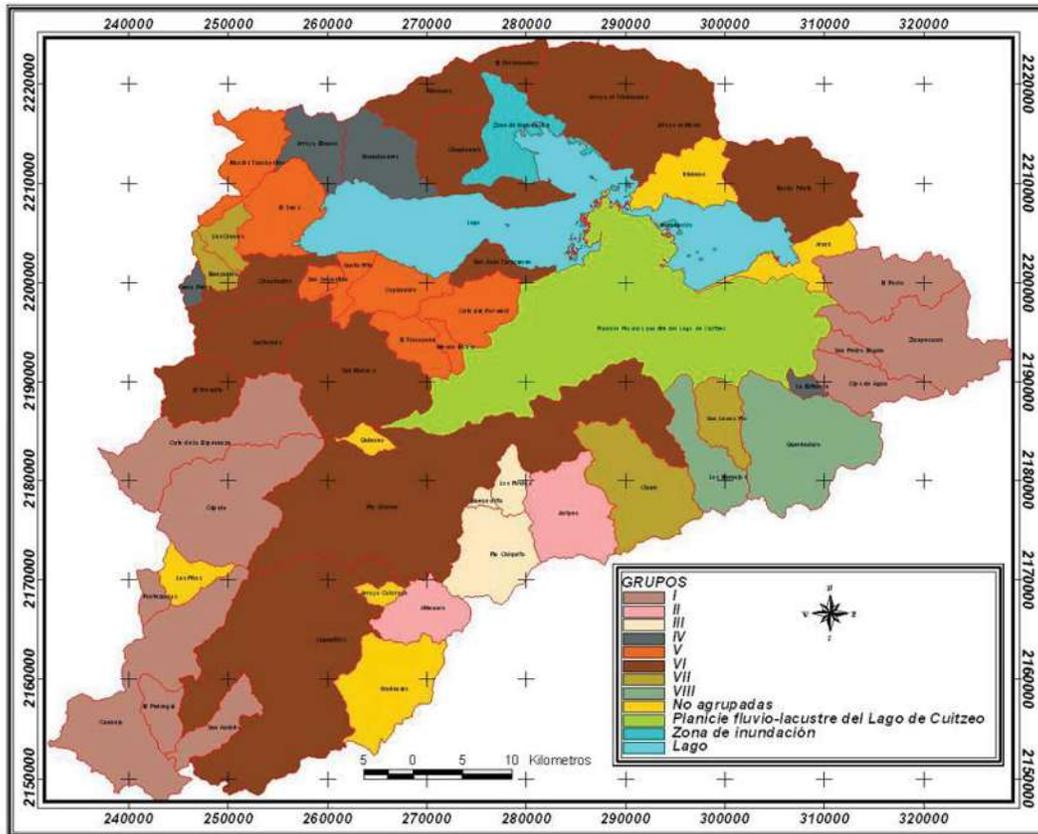


Figura 9. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve y texturas de suelo y pendiente del terreno.

d. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno y densidad de disección.

Se analizaron 29 variables, el análisis formó nueve grupos con un nivel de agrupamiento superior al 75% (Figura 10, Cuadro 5). Los grupos con un menor nivel de agrupamiento fueron el IX, V, I, II, III, VIII. Los grupos IX y V agruparon únicamente dos subcuencas cada uno, mientras que los grupos I, II, III, VIII agruparon cuatro subcuencas cada una (Figuras 10 y 11). Los grupos que agruparon más subcuencas

fueron el IV, VI y VII. Ocho subcuencas no se agruparon, la subcuenca de la presa de Umécuaro, en este caso se integró al grupo II.

Cuadro 5. Subcuencas que se agrupa el análisis de conglomeración con las variables de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno y densidad de disección

GRUPOS	SUBCUENCAS
I	Cápula, Cuanajo, Cuto de la Esperanza, Fontezuelas.
II	Arroyo Blanco, Huandacareo, La Estancia, Umécuaro.
III	Atécuaro, Jaripeo, Los Pirules, Río Chiquito.
IV	El Pedregal, San Andrés, El Rocío, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Pedro Bogan.
V	San Juan Tarárameo, San Marcos.
VI	Arroyo el Timbínales, Chupécuaro, El Derramadero, Piñicuaro, Bordo Prieto, Lagunillas, Chucándiro, Río Grande, El Fresnito, Cerro Pelón.
VII	Copándaro, El Sauz, Santa Rita, Cuto del Porvenir, Nicolás Tumbiscatio, San Sebastián, El Tlacuache, Mesón Nuevo.
VIII	Bueyadero, Charo, Las Cruces, San Lucas Pío.
IX	Los Naranjos, Queréndaro.
No agrupadas	Arroyo Colorado, Quinceo, Santa Inés, Las Pilas, Buenavista, Arroyo el Moral, Irámucu, Aráro.

El grupo IV agrupó seis subcuencas, las cuales formaron dos subgrupos. El primer subgrupo lo formaron las subcuencas de El Pedregal, San Andrés y El Rocío, que presentan un agrupamiento del 80% aproximadamente. El segundo subgrupo lo componen las subcuencas de Ojos de Agua, Zinapécuaro y San Pedro Bogan que presentaron un agrupamiento del 90% aproximadamente.

El grupo VI agrupó diez subcuencas, las cuales formaron dos subgrupos importantes. El primero lo formaron las subcuencas de Arroyo el Timbínales, Chupécuaro y El Derramadero con un agrupamiento del 91%. El segundo subgrupo lo formaron las subcuencas de Bordo Prieto, Lagunillas, Chucándiro y Río Grande las cuales presentaron un agrupamiento del 92%, aproximadamente (Figuras 10 y 11).

El grupo VII presentó un subgrupo muy representativo ya que alcanzó un agrupamiento del 95% aproximadamente, lo integraron las subcuencas de Copándaro, El Sauz, Santa Rita, Cuto del Porvenir y Nicolás Tumbiscatio mismas que presentaron un agrupamiento del 95%, aproximadamente; a este subgrupo se unieron otras subcuencas para que juntas tuvieran un nivel de agrupación del 80% (Figuras 10 y 11).

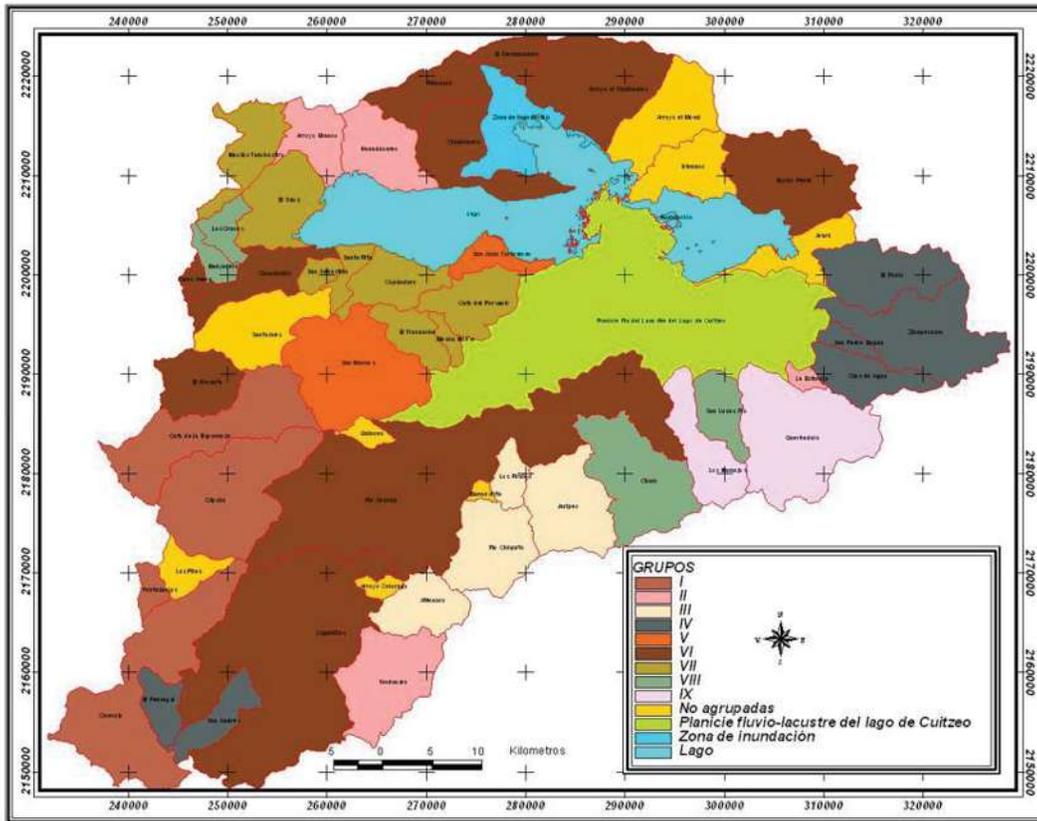


Figura 11. Grupos formados de acuerdo al análisis de conglomeración de las unidades del relieve y texturas de suelo, pendiente del terreno y densidad de disección.

e. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección, tipos de rocas.

En este ejercicio se analizaron 45 variables y se formaron once grupos con un nivel de agrupamiento superior al 75% (Figura 12, Cuadro 6). Los grupos con un menor nivel de agrupamiento fueron el III, V, VIII, IX, XI los cuales agruparon dos subcuencas cada uno. Los grupos VII y X agruparon tres subcuencas cada uno, y el grupo VI agrupó cuatro subcuencas. Los grupos con mayor agrupamiento fueron I, II y IV (Figuras 12 y 13, Cuadro 6). Doce subcuencas no se agruparon, entre ellas se encuentra la subcuenca de la presa de Umécuaro, que es una de las subcuencas de referencia.

El grupo II formó tres subgrupos bien marcados. El primero lo integraron las subcuencas de Arroyo el Moral y Arroyo el Timbinales los cuales presentaron un agrupamiento de 80% aproximadamente; a éste se unieron el segundo subgrupo constituido por las subcuencas de Chupícuaro y El Derramadero las cuales presentaron

una semejanza de 100%. Finalmente tenemos un subgrupo constituido por las subcuencas de Bordo Prieto, Chucándiro, Río Grande y Lagunillas que presentaron un agrupamiento del 97% (Figura 12).

Cuadro 6. Subcuencas agrupadas de acuerdo al análisis de conglomeración

GRUPOS	SUBCUENCAS
I	Cápula, Cuto de la Esperanza, Cuanajo, El Pedregal, San Andrés, Fontezuelas.
II	Arroyo el Moral, Arroyo el Timbínales, Chupícuaro, El Derramadero, Bordo Prieto, Chucándiro, Río Grande, Lagunillas.
III	El Sauz, Nicolás Tumbiscatio.
IV	Copándaro, Santa Rita, San Sebastián, Cuto del Porvenir, El Tlacuache, Mesón Nuevo.
V	Atécuaro, Huandacareo.
VI	El Rocío, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Pedro Bogan.
VII	Jaripeo, Los Pirules, Río Chiquito.
VIII	Charo, San Lucas Pío.
IX	Los Naranjos, Queréndaro.
X	Cerro Pelón, El Fresnito, Piñicuaro.
XI	Bueyadero, Las Cruces.
No agrupadas	La Estancia, Irámuco, Santa Inés, Las Pilas, Buenavista, Arroyo Colorado, Umécuaro, San Marcos, Arroyo Blanco, Aráro, Quinceo, San Juan Tarárameo.

El grupo I formó dos subgrupos. El primero lo constituyeron las subcuencas de Cápula y Cuto de la Esperanza que presentaron un agrupamiento del 89% aproximadamente. El segundo subgrupo lo integraron las subcuencas de Cuanajo, El Pedregal y San Andrés las cuales presentaron un agrupamiento de 92%, aproximadamente. A los dos subgrupos anteriores se unió la subcuenca de Fontezuelas, con un nivel de agrupamiento del 75% (Figura 12).

El grupo IV integró seis subcuencas las cuales formaron dos subgrupos. El primero lo formaron las subcuencas de Copándaro, Santa Rita y San Sebastián, presentando un agrupamiento aproximado de 90%. El segundo subgrupo presentó un agrupamiento del 90% y se formó por las subcuencas de Cuto del Porvenir, El Tlacuache y Mesón Nuevo (Cuadro 6, Figura 12).

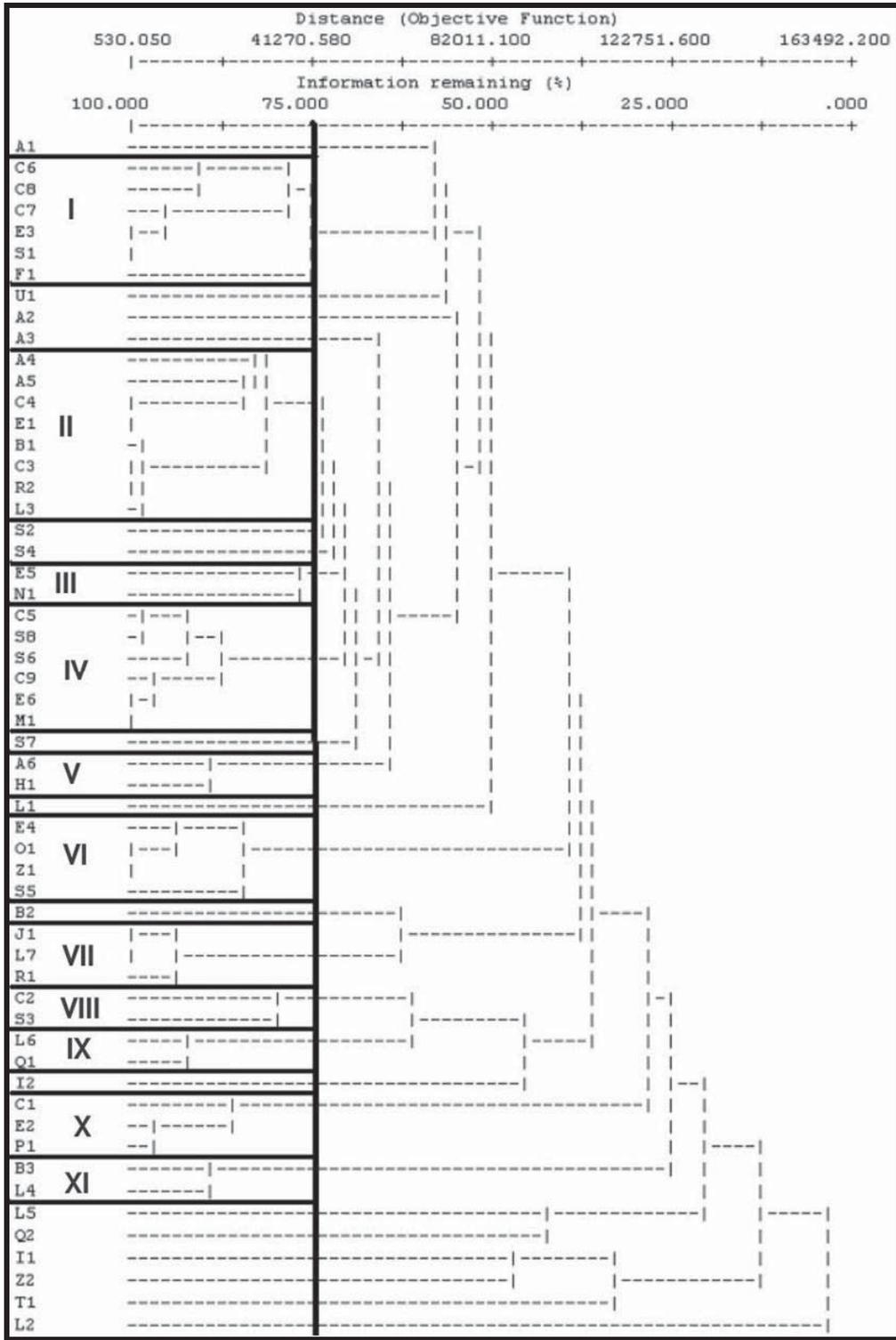


Figura 12. Dendrograma de las unidades de relieve, textura de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección y tipos de roca.

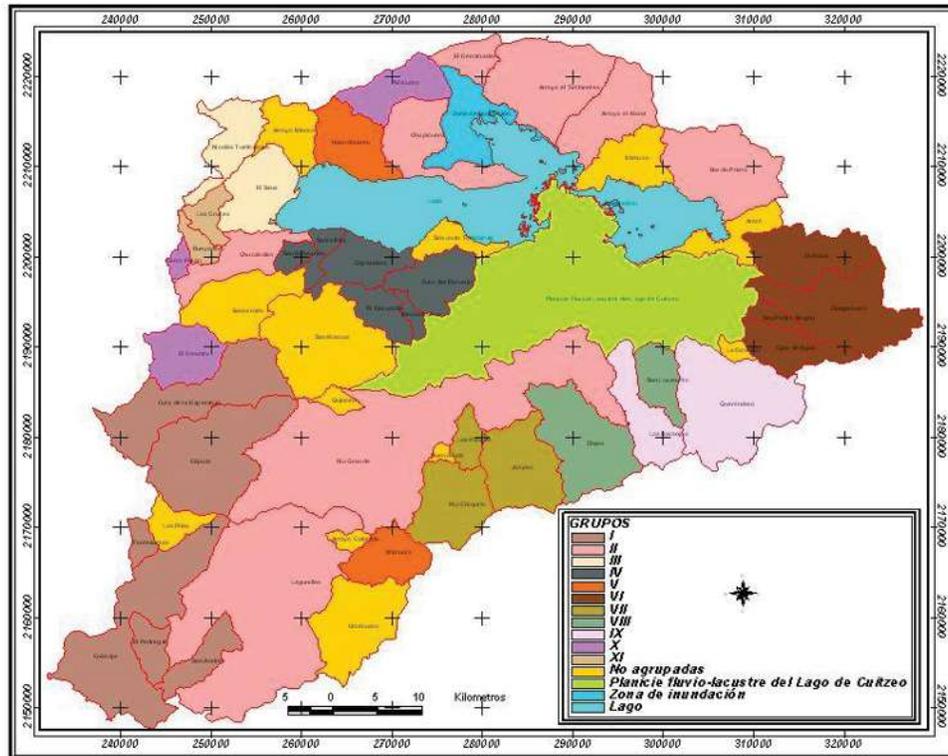


Figura 13. Grupos formados con los atributos de unidades del relieve, texturas de suelo, pendiente del terreno, densidad de disección y tipo de rocas.

f. Análisis de unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección, tipos de rocas y cobertura vegetal y uso de suelo del año 1975 y 2000.

El análisis con estos temas incluyó 65 variables, formando nueve grupos con un nivel de agrupamiento superior al 75% (Figuras 14 y 15, Cuadro 7).

Los grupos con un menor nivel de agrupamiento fueron el V, VI y IX los cuales agruparon dos subcuencas cada uno. Mientras que los grupos IV y VII, agruparon tres subcuencas cada uno. Los grupos II y VIII agruparon cuatro subcuencas cada uno (Figuras 14 y 15, Cuadro 7). El grupo con mayor agrupamiento fue el I y III (Figuras 14 y 15, Cuadro 8). El grupo I formó dos subgrupos, el primero constituido por las subcuencas de Cápula y Cuanajo, las cuales presentaron un agrupamiento del 90% aproximadamente; mientras que el segundo subgrupo lo integraron las subcuencas de Cuto de la Esperanza, El Pedregal y San Andrés las cuales presentaron un agrupamiento del 93% aproximadamente; posteriormente estos subgrupos se unieron y presentaron un agrupamiento aproximado de 80% (Figuras 14 y 15). El grupo III se formó por tres subgrupos; el primer subgrupo lo formaron las subcuencas de Bordo

Prieto, Chucándiro, Río Grande y Lagunillas, las cuales presentaron un agrupamiento aproximado de 97%. El segundo subgrupo lo formaron las subcuencas de Copándaro, Santa Rita y San Sebastián las cuales presentaron un agrupamiento del 90%, mientras que el subgrupo tres lo integraron las subcuencas de Cuto del Porvenir, El Tlacuache y Mesón Nuevo las cuales presentaron un agrupamiento aproximado de 100%. Las subcuencas restantes que se integraron posteriormente a los tres subgrupos fueron las de Huandacareo, San Marcos y San Juan Tarárameo. Finalmente se integraron las 13 subcuencas que presentaron un agrupamiento del 80% (Figuras 14 y 15).

El análisis final con todas las variables, permitió integrar a 38 de las 52 subcuencas en nueve grupos con niveles de agrupamiento superiores a 75%. Se aprecia que los grupos II, III y IV están estrechamente relacionados, así como también los grupos V, VI y VII (Figura 14). Respecto a las subcuencas de referencia, es posible indicar que la subcuenca San Marcos se integró a un grupo con 12 subcuencas (Figuras 14 y 15), con un nivel de agrupación superior al 75%. Mientras la subcuenca de Queréndaro se integró a un grupo conformado por 2 subcuencas con un nivel de agrupación aproximado de 88% (Figuras 14 y 15). La subcuenca de Umécuaro no se agrupó con ninguna otra subcuencas (Figuras 14 y 15), lo cual muestra que no presenta agrupamiento con ninguna otra cuando se analizan el total de atributos (relieve, textura, pendiente, densidad, tipo de rocas y cobertura); sin embargo, cabe aclarar que esta subcuenca si comparte algunas semejanzas con otras subcuencas. En términos de sus formas de relieve, cobertura vegetal y uso del suelo y densidad de disección.

Cuadro 7. Subcuencas agrupadas con el análisis de conglomeración con las variables relieve, texturas de suelos, pendiente, densidad de disección, rocas y cobertura vegeta del año 2000

GRUPOS	SUBCUENCAS
I	Cápula, Cuanajo, Cuto de la Esperanza, El Pedregal, San Andrés.
II	Arroyo el Moral, Arroyo el Timbínales, Chupícuaro, El Derramadero,
III	Bordo Prieto, Chucándiro, Río Grande, Lagunillas, Huandacareo, Copándaro, Santa Rita, San Sebastián, Cuto del Porvenir, El Tlacuache, Mesón Nuevo, San Marcos, San Juan Tarárameo.
IV	Cerro Pelón, El Fresnito, Piñicuaro.
V	Charo, San Lucas Pío
VI	Los Naranjos, Queréndaro.
VII	Jaripeo, Los Pirules, Río Chiquito.
VIII	El Rocío, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Pedro Bogan,
IX	Bueyadero, Las Cruces.
No agrupadas	La Estancia, Irámuco, Fontezuelas, Las Pilas, Buenavista, Arroyo Colorado, Atécuaro, Umécuaro, Nicolás Tumbiscatio, Arroyo Blanco, Aráro, Quinceo, El Sauz, Santa Ines.

El análisis de Conglomeración basado en las unidades de relieve, texturas de suelos, pendiente del terreno, densidad de disección, tipo de rocas y cobertura vegetal del año 1975 incluyó un total de 63 variables y 52 subcuencas; el análisis formó ocho grupos con un nivel de agrupamiento superior al 75% (Figuras 16 y 17, Cuadro 8).

Los grupos con un menor nivel agrupamiento son el IV, V y VIII los cuales agruparon dos subcuencas cada uno. Mientras que los grupos III y VII incluyeron tres subcuencas cada uno. El grupo VI agrupó cuatro subcuencas (Figuras 16 y 17, Cuadro 8).

Los grupos con un mayor nivel de agrupamiento fueron el II y I (Figuras 16 y 17, Cuadro 8). El grupo II formaron tres subgrupos importantes por la cantidad de subcuencas y su semejanza. El primer subgrupo lo constituyeron las subcuencas de Arroyo el Moral, Arroyo el Timbínales, Chupícuaro y El Derramadero los cuales presentan un agrupamiento de 81%, aproximadamente. El segundo subgrupo lo integraron las subcuencas de Bordo Prieto, Chucándiro, Río Grande y Lagunillas, los cuales presentan un agrupamiento del 100%, aproximadamente; el tercer subgrupo lo integraron las subcuencas de Copándaro, Santa Rita, San Sebastián, Cuto del Porvenir, El Tlacuache y Mesón Nuevo los cuales presentaron un agrupamiento aproximado del 85%. Estos subgrupos se unieron y presentaron una semejanza aproximada del 77% (Figuras 16 y 17).

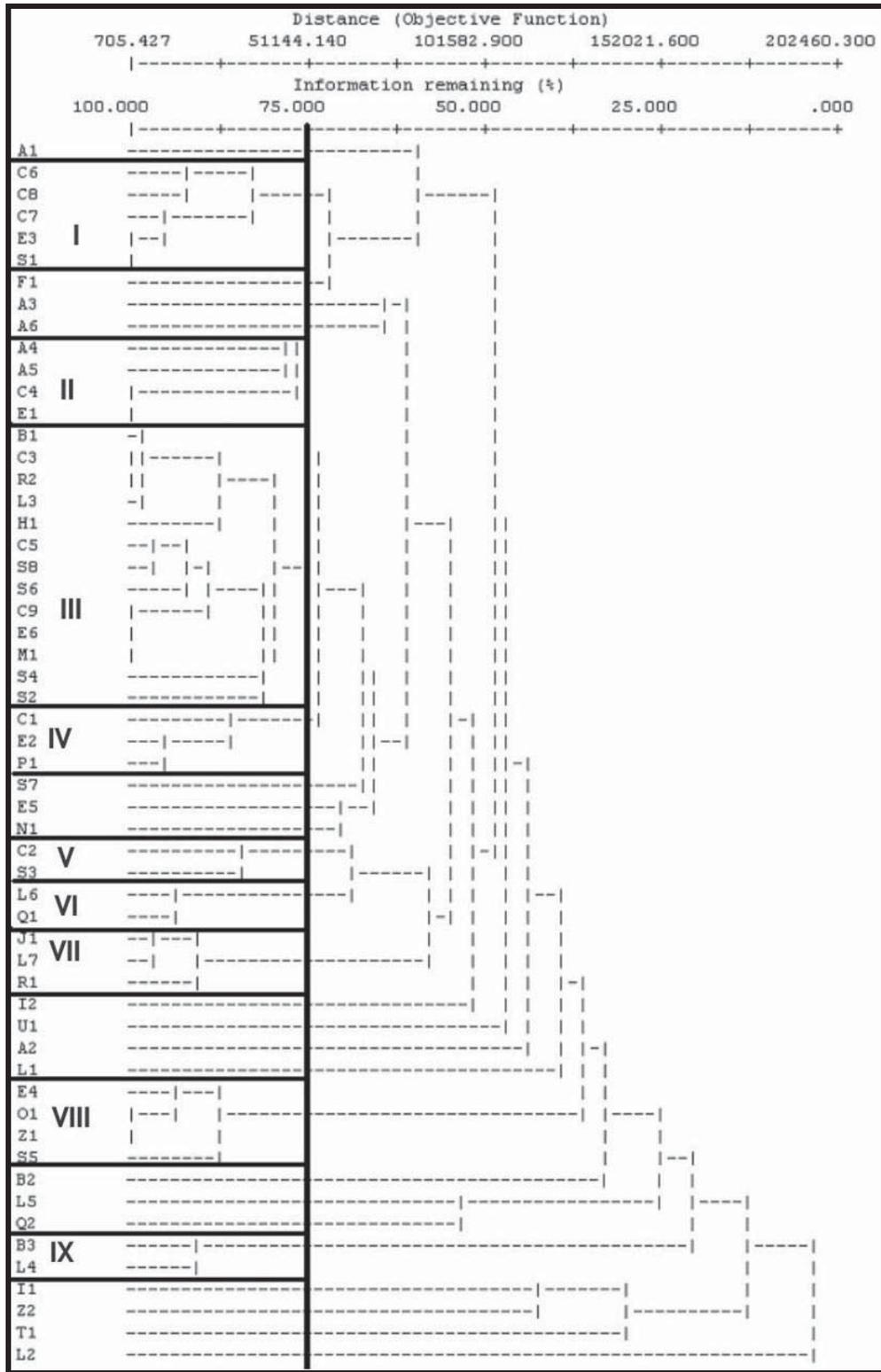


Figura 14. Dendrograma del análisis de Conglomeración de unidades de relieve, textura de suelo, pendiente, densidad de disección, tipos de rocas y cobertura vegetal del año 2000.

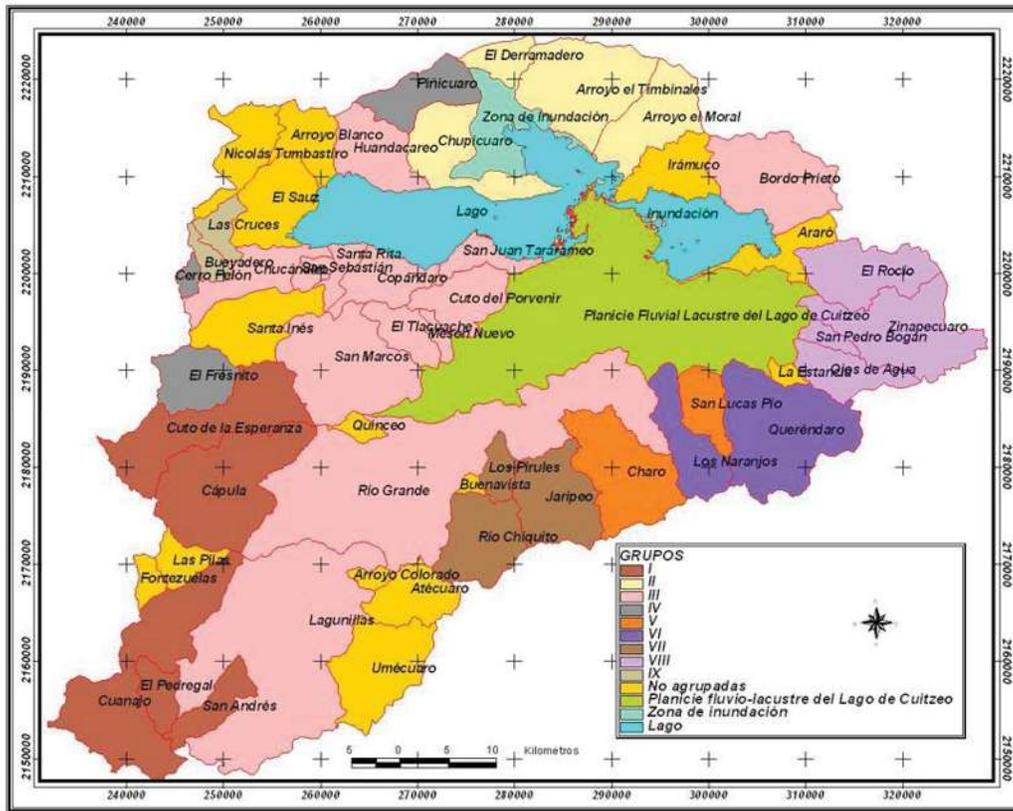


Figura 15. Grupos formados con los atributos de unidades del relieve, texturas de suelo, pendiente del terreno, densidad de disección, tipo de rocas y cobertura vegetal del año 2000.

Cuadro 8. Subcuencas agrupadas de acuerdo al análisis de Conglomeración para el año 1975

GRUPOS	SUBCUENCAS
I	Cápula, Cuto de la Esperanza, Cuanajo, El Pedregal, San Andrés.
II	Arroyo el Moral, Arroyo el Timbinales, Chupícuaro, El Derramadero, Bordo Prieto, Chucándiro, Río Grande, Lagunillas, Huandacareo, Copándaro, Santa Rita, San Sebastián, Cuto del Porvenir, El Tlacuache, Mesón Nuevo, San Marcos, San Juan Tarárameo
III	Jaripeo, Los Pirules, Río Chiquito.
IV	Charo, San Lucas Pío.
V	Los Naranjos, Queréndaro.
VI	El Rocío, Ojos de Agua, Zinapécuaro, San Pedro Bogan.
VII	Cerro Pelón, El Fresnito, Piñicuaro.
VIII	Buyadero, Las Cruces.
No agrupadas	La Estancia, Irámucu, Fontezuelas, Las Pilas, Buenavista, Arroyo Colorado, Atécuaro, Umécuaro, Nicolás Tumbíscatio, Arroyo Blanco, Aráro, Quinceo, El Sauz, Santa Ines.

El grupo I presentó dos subgrupos. El primero lo integraron las subcuencas de Cápula y Cuto de la Esperanza las cuales presentaron una agrupación aproximada de 89%. El segundo subgrupo lo integraron las subcuencas de Cuanajo, El Pedregal y San

Andrés presentando un agrupamiento del 98% aproximadamente. Estos dos subgrupos se unieron con un nivel de agrupamiento de 81% aproximadamente.

Las subcuencas de referencia agruparon 19 subcuencas, de las cuales la subcuenca de San Marcos se integró a un grupo con otras 16 subcuencas, mientras que la subcuenca de Queréndaro se integró con otra subcuenca; la subcuenca de Umécuaro no se agrupó (Figuras 16 y 17).

Este análisis formó VIII grupos, un grupo menos, en comparación al análisis realizado con cobertura y uso de suelo del año 2000. Los grupos formados fueron muy similares al análisis con los atributos del año 2000. Es decir, prácticamente no presentaron cambios en los grupos, pero si se presentó un cambio en los tipos de cobertura con respecto a la del año 1975. En la porción noreste de la cuenca, durante el año 1975 se desarrollaba un uso de suelo agrícola de temporal, mientras que en el año 2000 se encontraba cubierto por matorrales, con las mismas proporciones que la agricultura del año de 1975.

Adicionalmente, en el año de 1975 la cobertura y uso del suelo presente fue más semejante entre si a la parte noreste de la cuenca, mientras que para el año 2000 se observó una cobertura y uso de suelo un poco más diversa, y es por eso el cambio en el agrupamiento ya las áreas cubiertas para los dos años se tiene que no se presentó el cambio en las mismas proporciones de agricultura a matorral (Figuras 15 y 17).

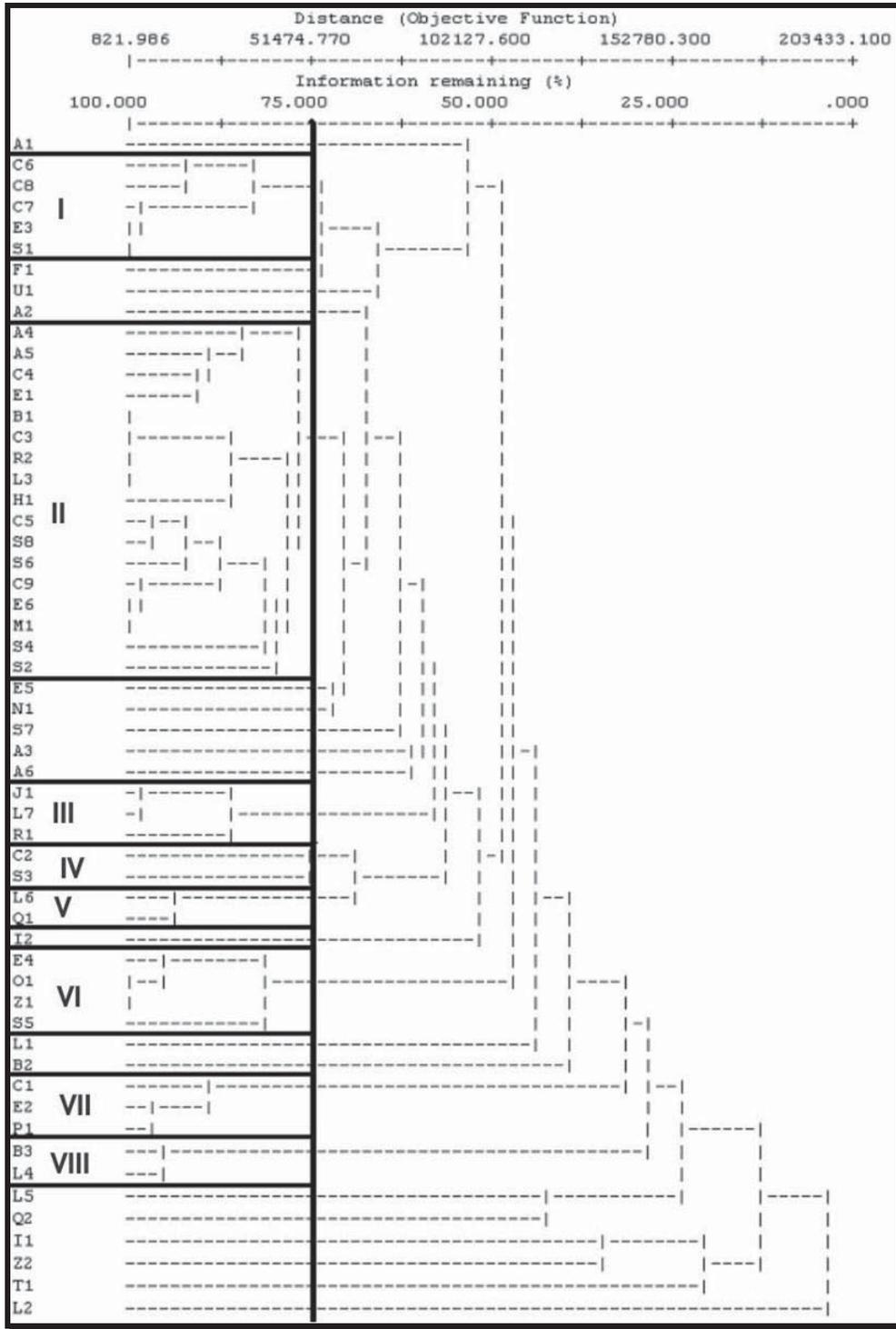


Figura 16. Dendrograma del análisis de Conglomeración de unidades de relieve, textura de suelo, pendiente, densidad de disección, tipos de rocas y cobertura vegetal del año 1975.

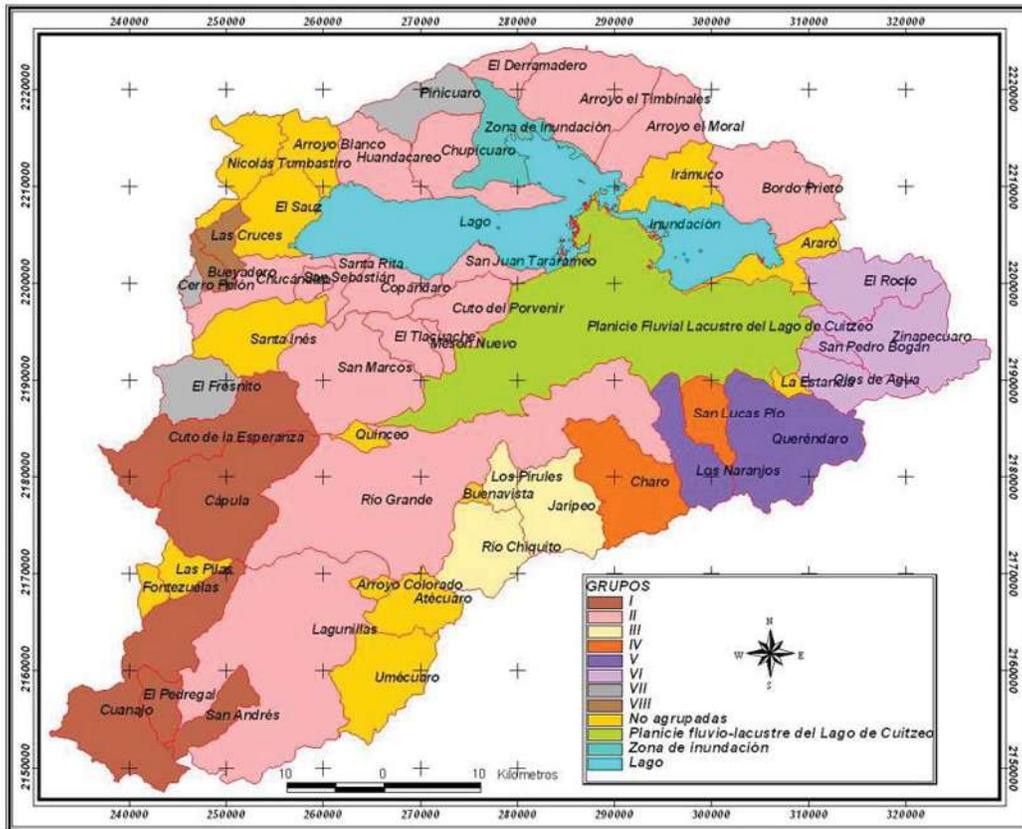


Figura 17. Grupos formados con los atributos de unidades del relieve, texturas de suelo, pendiente del terreno, densidad de disección, tipo de rocas y cobertura vegetal del año 1975.

Las subcuencas que no se agruparon con el análisis fueron las mismas para las dos fechas (Cuadros 7 y 8), lo cual nos muestra que los cambios que se presentaron fueron muy similares. Desde el punto de vista espacial, alrededor del 11 % de la superficie dedicada a la agricultura de temporal en 1975 cambio a matorral, en consecuencia, la conformación de los grupos ya que el análisis de conglomeración está evaluando agrupamiento en los atributos biofísicos.

Las nueve regiones semejantes se jerarquizaron en términos de su extensión territorial, contigüidad, % de bosques y matorrales, y número de subcuencas agrupadas. Estas variables se asocian a su naturalidad y características geográficas, el ordenamiento permitió definir el orden en el cual los recursos financieros pueden ser utilizados en la medición y monitoreo hidrológico (Cuadro 9).

Cuadro 9. Importancia de los grupos o regiones de acuerdo a superficie, nivel de contigüidad, número de subcuencas y % de bosque o matorral para el año 2000

Regiones o grupos	Superficie km ²	Nivel de contigüidad	No. de subcuencas	%		Orden
				Bosque	Matorral	
I	448	Alto	5	32.8	23.4	3
II	265	Medio	4	5.7	36.5	8
III	1173	Medio	13	13.0	31.2	1
IV	101	Bajo	3	7.3	38.6	9
V	128	Medio	2	40.9	27.7	7
VI	187	Alto	2	56.4	19.2	4
VII	157	Alto	3	43.2	17.3	6
VIII	225	Alto	4	53.5	10.6	2
IX	32	Alto	2	32.8	48.9	5

g. Análisis de agrupamiento de subcuencas para la cobertura del año 1975 y 2000

El análisis de agrupamiento de las subcuencas, considerando únicamente las coberturas vegetales y usos del suelo, reflejó que los cambios no fueron notorios. En el año de 1975 se presentaron V grupos, los cuales integraron 45 subcuencas y en el año 2000 se generaron VI grupos, los cuales agregaron 47 subcuencas (Figuras 18, 19, 20 y 21).

En el año 1975 no se agruparon las subcuencas de Copándaro, San Lucas Pío, Río Chiquito, Las Pilas, El Derramadero, Quinceo y Arroyo Colorado; en el año 2000 no se agruparon las subcuencas de Quinceo, Las Cruces, Santa Inés, Buenavista y Araró (Figuras 18, 19, 20 y 21). Es decir, en ambos años la subcuenca de Quinceo no se agrupó.

Las subcuencas no agrupadas se debe a los cambios presentes en las coberturas vegetales y usos de suelo posiblemente porque la regionalización es sensible a los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, y por lo tanto, esto nos demuestra que no ocurrieron en la misma proporción espacial los cambios para los dos años.

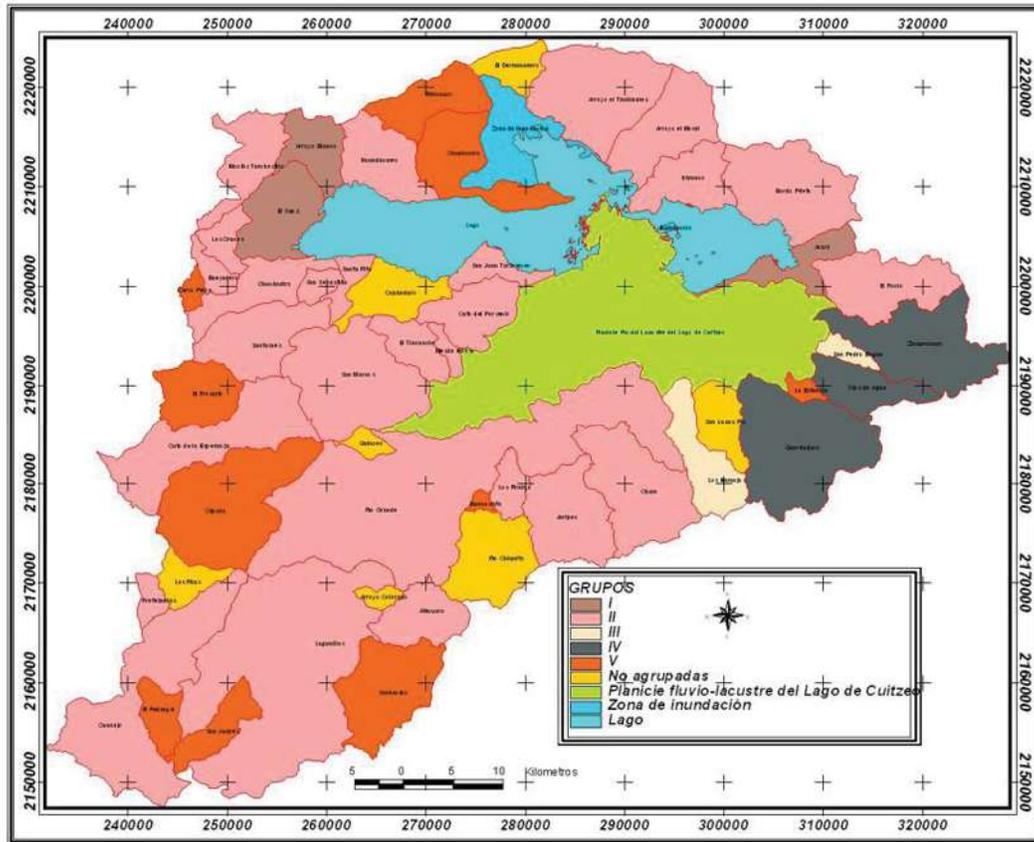


Figura 18. Mapa de análisis de agrupamiento de cobertura vegetal y uso de suelo para el año de 1975

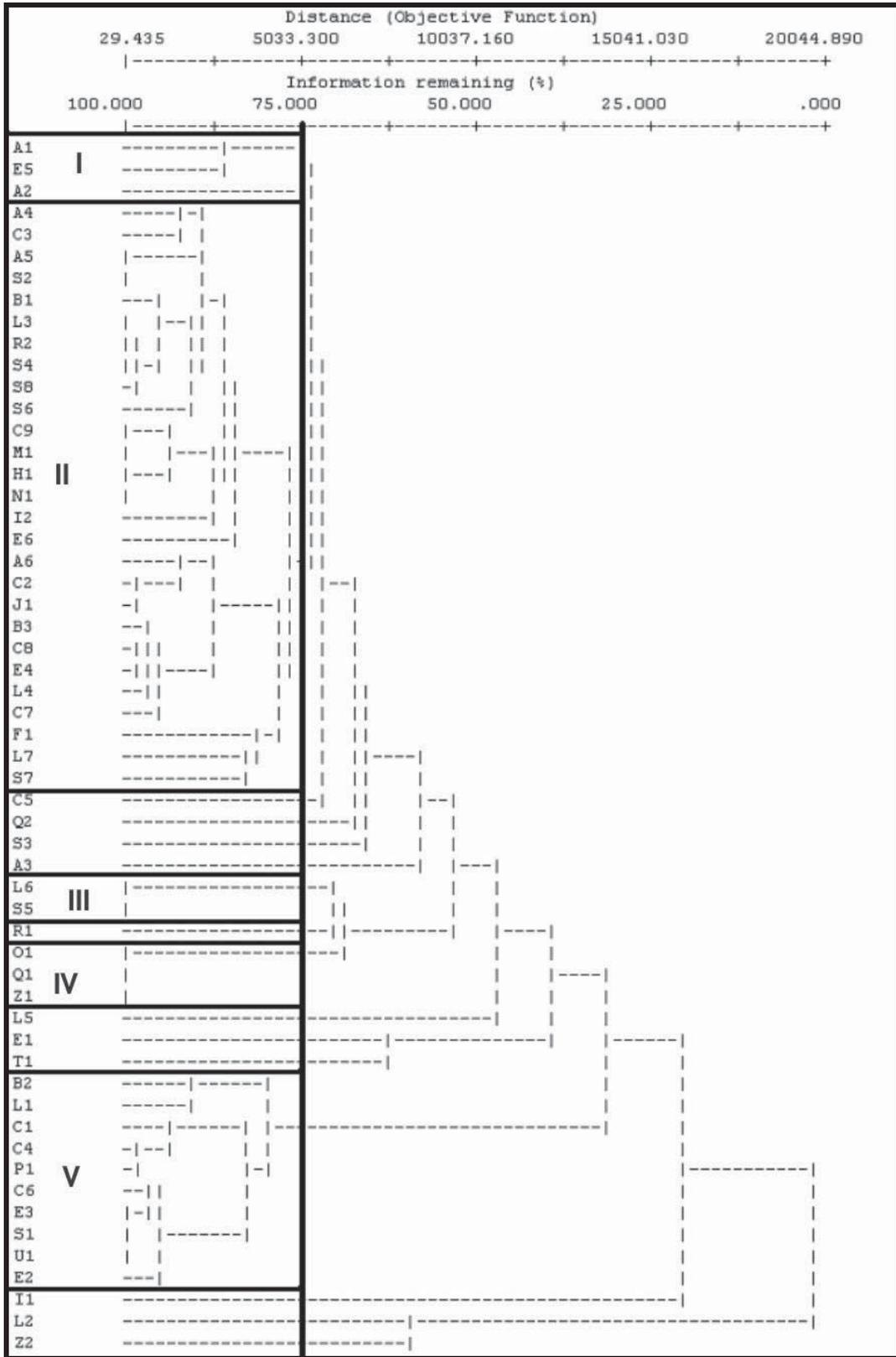


Figura 20. Análisis de la cobertura vegetal para el año de 1975

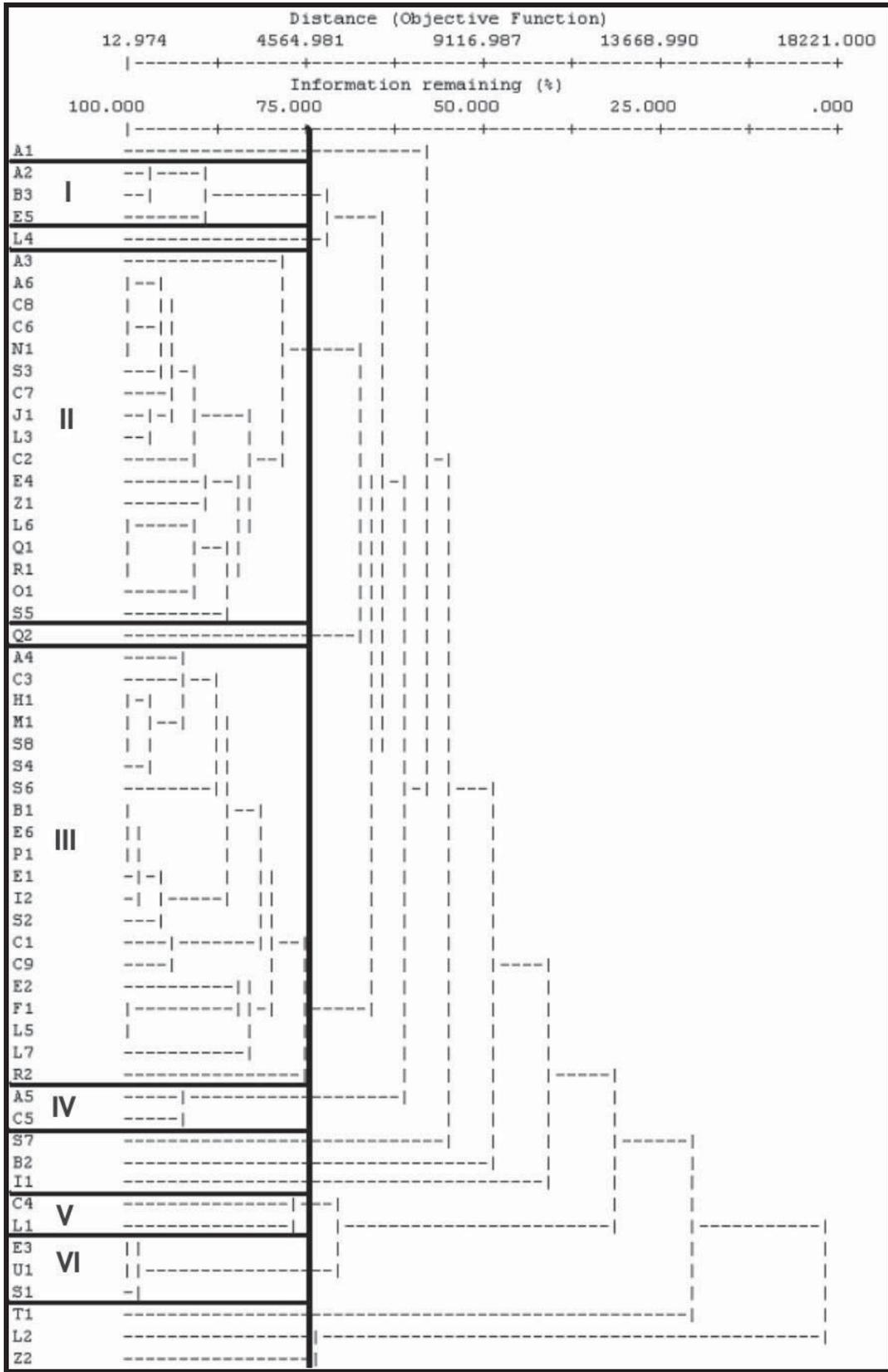


Figura 21. Análisis de cobertura vegetal para el año 2000

h. Análisis de componentes principales (PCA)

En este análisis las variables que tuvieron fuertes relaciones en el primer eje principal fueron: textura del suelo fino (Fina), ignimbritas (I), pendiente (0-3), basaltos y andesitas (BA) y matorral cerrado (MC). Mientras que los de una dependencia negativa fueron: textura media (Media), bosque cerrado (BC), densidad de disección ($>2\text{km/k}^2$), depósitos de caída (DC) (Cuadro 10).

Para el segundo eje las variables más importantes son: densidad de disección ($>2\text{km/k}^2$), pendiente de (3-10 y 10-25), densidad de disección (1-2 km/k^2) e ignimbritas (I). Los de dependencia negativa fueron: densidad de disección (0-1 km/k^2), depósitos superficiales (DS), pendiente (0-3), textura (media) y Planicie (PI) (Cuadro 10).

El tercer eje principal lo integraron las variables: laderas suaves (Ls), densidad de disección (1-2 km/k^2), ignimbritas (I), basaltos y andesitas (BA), cultivos estacionales de temporal (CET). Las variables más importantes de forma negativa fueron: laderas escarpadas (Le), conos de lava (CL), basaltos y dacitas (BD), densidad de disección ($>2\text{km/k}^2$) y pendiente (>25) (Cuadro 10).

Las (I) corresponden a la variable más representativa, ya que se encuentra presente de forma positiva en los seis componentes; los (BA) son muy representativas, ya que se encuentran en los componentes 1, 3, 5 y 6; la tercera variable importante es la textura fina ya que es muy consistente en el componente 1 y 2, (Cuadros 10 y 11).

Para el análisis de los PCA para las subcuencas (scores, Cuadro 10), se tuvieron 6 ejes de los cuales, las subcuencas que presentan valores más bajos fueron las que se agruparon en el análisis de conglomeración, mientras que las que presentaron valores más altos son las que presentaron menor agrupamiento. Es importante mencionar que en este caso no es el mejor análisis ya que esto puede mejorar en el análisis de Conglomeración o incluso en el análisis de componentes principales de las variables.

Cuadro 10. Análisis de componentes principales

FIRST 6 EIGENVECTORS						
Varia	Eigenvector					
	1	2	3	4	5	6
Cl	-.0174	-.0249	.0028	.0335	-.0204	.0084
Cv	-.0133	-.0048	.0154	.0087	-.0251	.0497
Ca	.0009	-.0018	.0008	-.0006	.0017	.0020
Di	-.0044	-.0115	.0046	.0220	-.0503	.0029
Ei	.0063	-.0547	-.0361	-.0339	.0469	-.0366
Le	-.0510	.1484	-.3960	-.3468	-.2035	.1939
Li	-.0863	.0967	-.0017	.1421	.1811	-.4005
Ls	.0946	.1224	.5987	-.0389	-.1849	.0913
L	.0006	-.0010	-.0002	-.0009	.0020	-.0004
M	.0078	-.0165	.0684	.0561	-.0211	.1319
Pd	-.0051	.0014	-.0482	-.0427	.0837	.0602
Pdi	-.0277	-.0127	-.0016	.0448	-.0181	-.0109
Pdm	-.0055	-.0127	-.1222	.2658	-.0163	-.0210
Pds	-.0030	-.0096	-.0304	.0710	-.0118	.0022
Pl	.0786	-.1271	-.0299	-.1150	.1220	-.0182
Plfl	.0030	.0037	.0048	.0063	.0040	.0026
Sc	.0025	.0061	.0151	-.0077	.0131	-.0211
Y	-.0033	.0046	.0076	-.0073	.0096	.0037
Zi	.0227	-.1061	-.0520	-.0566	.0876	-.0400
Fina	.6330	.1496	-.1433	.0117	.0032	.0429
Gruesa	-.0079	-.0038	-.0024	-.0103	.0050	.0138
Media	-.6263	-.1450	.1451	-.0011	-.0102	-.0565
0-3	.1136	-.3201	-.0343	-.1361	.1164	-.0063
3-10	-.0361	.2764	.0518	.0519	.0941	-.1579
10-25	-.0361	.2764	.0518	.0519	.0941	-.1579
>25	-.0443	.0856	-.1525	-.1734	.0070	.0319
0-1 km/k	.0975	-.4962	-.0372	.0577	.0105	-.0193
1-2 km/k	.0345	.1771	.2381	-.0430	-.0265	-.2450
> 2 km/k	-.1320	.3191	-.2009	-.0146	.0160	.2643
B	.0704	-.0149	.0983	-.0258	.1226	.2157
BA	.1068	.0906	.1816	.0666	.1530	.1197
BD	-.0914	.1505	-.2119	-.2322	.3191	-.1443
CA	.0958	.0738	-.0538	-.2428	-.6214	-.4466
CL	-.0244	-.0059	-.3182	.6809	-.1331	-.0322
C. agua	.0009	-.0015	.0007	-.0006	.0027	.0002
CSvD	-.0007	-.0012	-.0113	-.0083	.0083	.0026
DC	-.1148	.0656	.0298	-.1221	.0370	.3949
DL	-.0369	.0125	-.0249	-.0625	.2619	-.1714
DS	.0568	-.3528	.0028	-.2156	.0465	-.1825
DA	-.0267	-.0350	.0129	.0482	-.0189	-.0133
DDR	-.0651	.0052	.0261	-.0191	-.0466	.0418
DD	-.0017	-.0021	-.0003	.0040	-.0022	.0010
DR	-.0453	-.0001	.0122	-.0301	.0102	.0851
I	.1167	.1520	.2142	.0510	.1705	-.0292
VM	-.0402	-.1367	.0418	.1083	-.3097	.1584
A	.0000	-.0001	.0000	.0000	.0002	.0001
AH	-.0057	-.0086	.0065	-.0121	.0657	-.0329
B	.0020	-.0020	.0006	-.0013	.0006	.0036
BA	-.0235	.0151	-.0201	.0199	-.0491	-.0261
BC	-.1726	.1061	-.0993	-.1004	-.1170	-.0037
BS	-.0300	.0459	-.0535	.0618	-.0609	-.0438
CAN	.0109	-.0395	-.0181	-.0268	.0211	-.0244
CER	.0758	-.0718	-.0238	-.0531	.1178	.0126
CET	-.0419	-.0360	.1678	.0067	-.1629	.1530
H	-.0147	.0033	.0035	-.0070	.0001	.0266
MC	.1067	.0225	-.0100	-.0122	-.0523	.0675
MPA	.0537	.0111	.0101	.0474	.0008	.0290
MPS	.0769	-.0052	.0164	.0639	.0179	.0251
P	-.0122	.0012	.0333	.0686	.0320	-.0092
PA	-.0059	.0044	-.0008	-.0017	.0221	-.0249
PC	-.0064	.0043	.0042	-.0028	.0110	-.0090
PS	-.0124	.0148	.0049	-.0036	.0478	-.0775
SD	-.0018	.0020	.0033	.0006	-.0047	-.0035
TB	-.0084	.0037	.0030	-.0024	.0406	-.0386
VA	.0094	-.0711	-.0278	-.0456	.0693	-.0239

Cuadro 11. Valores de los componentes de los ejes.

COORDINATES (SCORES) OF Subc						
Subc	Axis (Component)					
	1	2	3	4	5	6
1 A1	-22.0505	-54.6488	9.1134	-10.1654	22.8851	10.2827
2 A2	13.1296	8.4790	41.1524	-5.5540	12.1758	2.1917
3 A3	43.4901	63.0318	12.3618	-2.5789	-18.8313	-37.4798
4 A4	49.4976	-28.8214	-21.9980	-23.2773	15.7620	14.9185
5 A5	70.9948	-72.2850	-3.0338	-12.5875	7.7934	13.8228
6 A6	-8.3261	39.7356	21.0294	-15.0086	-42.8168	-49.2742
7 B1	3.5597	-31.6278	1.0345	-19.8024	-1.2354	-5.5204
8 B2	-71.3935	12.2087	-1.7762	-1.9321	53.0617	-40.9663
9 B3	46.1800	46.8919	-46.4571	-41.0994	-55.7415	-21.2882
10 C1	22.7744	-34.8672	14.4792	-4.8031	-49.1467	6.5406
11 C2	11.7755	58.5691	-45.2143	-30.2301	26.8632	-.8151
12 C3	31.9433	-16.0163	13.6029	-.7130	3.0435	-6.7149
13 C4	47.4996	-38.1216	3.1526	-16.9752	-14.6802	-11.2490
14 C5	55.1270	27.0712	14.0609	-3.0921	24.0461	5.7232
15 C6	-50.0341	-40.2284	-13.9701	54.0671	-14.7178	2.9013
16 C7	-69.8945	-36.3322	.4234	16.0501	-6.1678	-5.8340
17 C8	-55.0839	-58.5368	1.3025	28.1639	-15.6689	6.4237
18 C9	58.5274	28.6981	35.8202	5.5323	10.7105	20.6919
19 E1	68.0954	-51.1438	-.6986	-24.0368	-21.4974	-18.1072
20 E2	12.8136	-51.1440	2.1109	7.0622	-18.7034	12.2041
21 E3	-97.4601	-11.7319	7.8684	21.1537	-15.8424	-2.0682
22 E4	-65.2122	11.5135	14.1934	-9.0442	3.6020	20.3312
23 E5	53.0270	-.0774	-16.7311	37.8057	-1.8782	7.1819
24 E6	54.3477	69.0099	51.6398	11.0924	11.9842	11.3037
25 F1	-49.2583	-57.2913	24.9764	5.2579	-7.5277	-2.8901
26 H1	9.8259	11.6908	27.5824	-11.0295	-24.3163	-24.6598
27 I1	15.4879	-131.6600	-33.6222	-28.0226	31.6141	-18.9684
28 I2	-8.6542	-10.3654	-38.3018	-25.0863	20.1600	4.5951
29 J1	-25.9693	41.6539	-6.7753	-0.5574	30.6702	-25.0419
30 L1	-25.6808	6.3813	43.8997	-4.2763	-13.8571	46.5652
31 L3	-1.9261	-21.7218	-2.4651	18.8322	-4.3143	-12.3886
32 L4	27.1474	53.5839	-54.9716	-15.5303	-55.5582	-5.5737
33 L5	-7.5342	-21.3146	-36.9255	70.2874	-5.4234	-2.3271
34 L6	-51.8023	53.1091	-56.3844	-45.6575	15.2277	18.9385
35 L7	-48.1912	41.1906	15.8937	-3.5499	37.5327	-34.5201
36 M1	59.5558	48.3825	45.2906	11.3467	15.5543	6.0818
37 N1	45.4063	30.3742	-3.8903	25.5239	-18.4085	20.0529
38 O1	-106.2657	16.9268	7.4234	-11.9641	-5.4272	23.0149
39 P1	43.1010	-44.4205	-.7694	-2.3679	-27.7647	15.4728
40 Q1	-67.3779	50.1487	-34.7660	-39.8082	-18.2259	17.7488
41 Q2	6.9906	37.6983	-70.7064	98.2477	4.9501	-12.5289
42 R1	-51.6193	48.5404	14.6498	-2.8281	17.1821	-44.3940
43 R2	28.9763	-23.2689	-9.9181	8.1939	13.9261	-5.1160
44 S1	-90.0718	-12.3145	30.8037	17.4681	-17.6595	.1976
45 S2	46.3049	4.8722	.9897	3.1046	25.5978	2.9769
46 S3	12.9744	48.6289	-30.7153	-18.4697	3.8912	37.0118
47 S4	29.5375	14.7661	-13.1343	42.6454	13.3891	1.0717
48 S5	-104.6899	22.3424	-6.9684	-17.7488	1.4322	49.1809
49 S6	51.9413	62.2542	23.5254	14.2398	18.9681	14.4779
50 S7	20.3341	7.2239	23.9766	4.3156	-1.8301	4.9709
51 S8	50.5349	15.9551	16.0794	4.1418	18.3387	20.1146
52 T1	31.3439	-104.6067	-15.1255	-27.0057	34.0013	-5.4637
53 U1	-43.7484	-28.3860	46.8823	-21.7301	-25.1227	-22.9995

El análisis de varianza supone que los seis primeros ejes explican la mayor parte de la variación y que los siguientes van explicando cada vez menos. En el Cuadro 12 se ve que los primeros seis ejes reúnen el 75 % de la variación explicada, y que desde el séptimo eje las ganancias en variación explicada son poco importantes. Aunque las primeros dos ejes son los dos mas importantes ya que son los que presentan la mayor varianza. Por lo tanto tenemos que las variables fuertemente correlacionadas son las que

se presentan en los dos primeros ejes y que a partir de ahí las correlaciones van disminuyendo.

Cuadro 12. Distribución en porcentaje de varianza y varianza acumulada explicada en 10 ejes

AXIS	Eigenvalue	% of Variance	Cum.% of Var.
1	130136.800	26.832	26.832
2	105051.500	21.660	48.492
3	40718.450	8.396	56.888
4	36860.240	7.600	64.488
5	29264.990	6.034	70.522
6	22599.630	4.660	75.182
7	19636.810	4.049	79.230
8	14007.940	2.888	82.119
9	13126.160	2.706	84.825
10	11143.170	2.298	87.123

6.3.CONCLUSIONES

El análisis estadístico permitió regionalizar la cuenca del Lago de Cuitzeo con base en atributos biofísicos del paisaje. El número de grupos varió entre 1975 y 2000 para lo que se formaron VIII en 1975 y IX grupos en 2000.

Las subcuencas que no se agruparon con el análisis fueron las mismas para los dos años (La Estancia, Irámuco, Fontezuelas, Las Pilas, Buenavista, Arroyo Colorado, Atécuaro, Umécuaro, Nicolás Tumbiscatio, Arroyo Blanco, Araró, Quinceo, El Sauz, Santa Inés).

De las subcuencas no agrupadas, 4 ó 5 pueden explicarse en función de su tamaño relativamente pequeño, aunque los datos fueron ponderados en función de la superficie. Aunque la explicación estadística de las subcuencas no agrupadas es que presentan una alta marginalidad en sus variables, ya que la composición de las variables es poco similar al resto; es decir el agrupamiento nulo o casi nulo de los marginales con el conjunto principal de datos, implica que sus relaciones están pobremente definidas en las variables estudiadas. Por lo tanto el análisis de los marginales no es posible porque los datos no proporcionan información y no es cuestión de encontrar mejores métodos de análisis multivariado.

Las subcuencas que cambiaron de grupo entre 1975 y 2000 fueron Arroyo el Moral, Arroyo el Timbínales, Chupícuaro y El Derramadero. Este cambio se explicó por

el proceso de abandono de tierras agrícolas de temporal y el consecuente desarrollo de matorrales en parcelas agrícolas abandonadas.

De las tres subcuencas seleccionadas a *priori* para monitorear, dos se pueden considerar cuencas de referencia, ya que la subcuenca de Umécuaro no es de referencia para otras subcuencas, pues de acuerdo al análisis de conglomeración quedó fuera de los grupos formados, lo cual nos demuestra que no presentó semejanza significativa con las otras subcuencas.

La regionalización hidrológica, en función de las características biofísicas de la cuenca cambió en el periodo de estudio, debido a los procesos de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo ocurridos en 25 años (1975-2000). Se concluye que la regionalización hidrológica fue sensible a los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo mediante el esquema metodológico seguido en el presente estudio.

El análisis de componentes principales nos demostró que las variables más representativas fueron las que correspondieron a la litología y texturas de suelo (fina); las variables marginales fueron cuerpos subvolcánicos dioríticos (CSvD), domos dacíticos (DD), textura (gruesa), superficie cumbral (Sc) y planicie fluvial (Plfl).

Aunque el PCA permite usar un número reducido de variables en los análisis consecuentes, en general no se empleo este análisis para eliminar variables debido a que necesitamos todas las variables originales para evaluar cada uno de los datos biofísicos de nuestra área de estudio, por consecuente la eliminación de las variables originales no fue nuestro objetivo en este análisis.

El análisis indicó que el monitoreo de las condiciones hidrológicas requiere de la instalación de al menos siete nuevas estaciones hidrométricas y meteorológicas, con las cuales sea posible monitorear al menos una subcuenca de cada grupo.

6.4. BIBLIOGRAFÍA CITADA

1. Gauch, H. G. 1979. *COMPCLUS- A Fortran program for rapid initial Conglomeracioning of large data sets*. Cornell University. Ithaca, New York. USA. 59 pp.
2. Gauch, H. G. 1982. *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press. Cambridge, U. K. 298 p.
3. Goodall, D. W. 1978. Simple similarity and species correlation. En: R. H. Whittaker (Ed). *Ordination of plant communities*. Junk. The Hague. The Netherlands. 99-149 p.

4. Greich-Smith, P. 1980. *The development of numerical classification and ordination. Vegetation.* 42: 1-9.
5. Janssen R., Herwiinen, M., Beinat, E. 2002. *Definite.* Institute for Environmental Studies Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands
6. Johnson E. D. 2000. *Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos.* International Thomson Publishing. México.
7. Kunz B. I. 1988. *El uso de la estadística para la construcción de clasificaciones y regionalizaciones.* Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía, Serie varia: 1-34
8. Orlóci, L. 1978. *Ordination by resemblance.* R. H. Whittaker (Ed). Ordination of plant communities. Junk. The Hague. The Netherlands. 239-275 pp.
9. Software PC-ORD. 1999. *Multivariate analysis and classification of ecological data.* ESA Bolletin.

7. CONCLUSIONES GENERALES

Con respecto a la matriz de confusión es posible concluir que su interés procede de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías de cambio en el periodo analizado.

Los principales problemas que se presentaron surgieron de las categorías más similares espectralmente: matorral o pastizales y matorral (muy confuso con la clase pastizal–matorral). En el caso de las unidades geomorfológicas se presentaron confusiones entre las colinas y los lomeríos.

De las tres subcuencas consideradas de referencia, es posible concluir que la subcuenca de San Marcos está conformada principalmente por conos de lava, basaltos y andesitas sobre los que se desarrollan Vertisoles, los cuales son de buena calidad para la agricultura por sus características físicas; esta subcuenca presentó una alta infiltración, así como excelentes condiciones para la agricultura tanto de temporal como de riego y para el crecimiento de matorral y pastizal.

La subcuenca de Umécuaro está constituida predominantemente por depósitos superficiales y conos andesíticos; con desarrollo predominante de Andosoles cubiertos por vegetación de matorral cerrado, bosque mixto de pino-encino y plantaciones de aguacate, la actividad más importante es la agricultura de temporal.

La subcuenca de Queréndaro está conformada por basaltos y dacitas, conos andesíticos y depósitos de caída sobre los que se desarrollan Luvisoles, Andosoles y Acrisoles. De las tres subcuencas de referencia ésta es la más conservada ya que no presenta importantes superficies deforestadas. Los tipos de cobertura vegetal y uso de suelo predominante son bosques de pino-encino, los cuales se encuentran en la parte de la montaña, mientras que en la porción baja se presenta matorral y agricultura; las unidades de relieve más importantes son las laderas escarpadas en montaña donde se localiza la cobertura vegetal de pino-encino; también presenta un patrón de drenaje muy desarrollado.

En el mapa geopedológico los modelos que ayudan a explicar las relaciones relieve-suelos, se basan en entender las características de los materiales parentales subyacentes; específicamente rocas alteradas. Sin embargo, las subcuencas estudiadas se caracterizan por la presencia de depósitos de caída (incluyendo piroclastos en conos), los cuales pueden explicar el desarrollo de Andosoles; sin embargo, cuando este tipo de materiales volcánicos no están cartografiados, la explicación anterior no puede aplicarse, debido que las características geológicas del área los depósitos no siempre

están cartografiados. Adicionalmente, la geometría (convexidad, concavidad) de las geoformas influencia la redistribución de los materiales de caída. Tal es el caso de las rampas de piedemonte de los volcanes semiescudo.

El uso de herramientas basadas en la percepción remota y los sistemas de información geográfica permitió caracterizar biofísicamente a las subcuencas de Umécuaro, San Marcos y Queréndaro. Lo anterior permitió realizar un análisis más detallado del medio físico y elegir los sitios para determinar la capacidad de infiltración de las unidades más representativas de las tres subcuencas.

A pesar de que el ambiente volcánico reciente complica la interpretación del origen de los suelos, la conformación de los mapas geopedológicos resultó un mecanismo adecuado para la definición de respuestas hidrológicas potenciales similares.

Se realizaron 24 pruebas de infiltración en cuatro tipos de suelo con diferentes texturas, en 19 tipos de relieve y en 4 tipos de cobertura vegetal y uso de suelo.

La velocidad de infiltración se clasificó de acuerdo con las condiciones de humedad antecedente en el suelo. Cuando el suelo mostró bajos contenidos de humedad, la velocidad de infiltración alcanzó sus máximos valores.

Los suelos de texturas gruesas presentaron una velocidad de infiltración más alta que los de texturas más finas, lo cual indica que para hacer penetrar una determinada lámina de agua, el tiempo será mayor en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso.

Las fases físicas juegan un papel importante en la infiltración; las fases superficiales (pedregosas y gravosas) son las que permiten mayor infiltración del agua. Las fases profundas (lítica y lítica profunda, petrogypsica y petrogypsica profunda y dúrica y dúrica profunda) reducen la infiltración de agua.

De acuerdo con los datos de los climogramas tenemos que para todas las estaciones las temperaturas más altas se registran durante los meses de abril, mayo y junio. Mientras que las precipitaciones se concentran en los meses de julio, agosto y septiembre lo cual coincide con un descenso de las temperaturas registradas. La estación de Zinapécuaro registró la mayor precipitación, la cual se caracteriza por una concentración marcada en los meses de julio y agosto.

El análisis de tendencias de las precipitaciones anuales indica que las estaciones de Huingo, Jesús del Monte, Presa Malpais y Zinapécuaro han presentado un aumento significativo. Aunque es notorio que en los últimos 7 años podemos observar que todas las estaciones tienden a incrementar sus precipitaciones, excepto la

estación de Cuitzeo. Los comportamientos son muy variables para todas las estaciones a lo largo de los años.

En las estaciones de Jesús del Monte y Zinapécuaro se observan claros patrones cíclicos; antes de 1958 seco, en 1958 extremadamente húmedo, de 1960 a 1980 más húmedo, durante 1980-2000 relativamente seco, y después un poco más húmedo.

Los registros de las estaciones de Morelia, Presa Malpais, Zinapécuaro y Santiago Undameo tienden a aumentar su temperatura de manera significativa tanto sus valores mensuales como en el valor medio anual. Los registros de las estaciones tienden a disminuir significativamente.

De acuerdo al análisis de los gastos tenemos que la estación de Santiago Undameo tiende a aumentar, mientras que las estaciones de Queréndaro y Guadalupe tienden a la reducción.

Respecto a las estaciones hidrometeorológicas que fueron instaladas en este periodo, es importante mencionar que con los datos obtenidos no pudo realizarse ningún análisis, dado que el periodo de tiempo que llevan registrando es muy corto.

El análisis estadístico permitió regionalizar la cuenca del Lago de Cuitzeo con base en atributos biofísicos del paisaje. El número de grupos varió entre 1975 y 2000; se formaron VIII grupos en 1975 y IX grupos para el 2000.

Las subcuencas que no se agruparon con el análisis fueron las mismas para los dos años (La Estancia, Irámuco, Fontezuelas, Las Pilas, Buenavista, Arroyo Colorado, Atécuaro, Umécuaro, Nicolás Tumbiscatio, Arroyo Blanco, Araró, Quinceo, El Sauz, Santa Inés).

De las subcuencas no agrupadas, 4 ó 5 pueden explicarse por la alta marginalidad en sus variables, ya que la composición de las variables es poco similar al resto de las unidades muestreadas (subcuencas). La similitud nula o casi nula de los marginales con el conjunto principal de datos, implica que sus relaciones están pobremente definidas en las variables estudiadas.

Las subcuencas que cambiaron de grupo entre 1975 y 2000 son Arroyo el Moral, Arroyo el Timbínales, Chupécuaro y El Derramadero. Este cambio se explica por el proceso de abandono de tierras agrícolas de temporal, y el consecuente desarrollo de matorrales en antiguas parcelas agrícolas.

De las tres subcuencas seleccionadas a *priori* para monitorear, dos se pueden considerar cuencas de referencia, ya que la subcuenca de Umécuaro no se asemeja a otras subcuencas.

La regionalización hidrológica realizada en función de las características biofísicas de la cuenca, cambió en el periodo de estudio, debido a los procesos de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo ocurrido en 25 años; podemos establecer que es sensible a los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo.

El análisis de componentes principales mostró que las variables más representativas son las que corresponden a la litología y texturas de suelo (fina), y las variables marginales son: cuerpos subvolcánicos dioríticos (CSvD), domos dacíticos (DD), textura (gruesa), superficie cumbre (Sc) y planicie fluvial (Pfl).

8. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos permiten dar algunas pautas relacionadas con la conservación y manejo de los recursos naturales, especialmente el recurso hídrico, en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

La tendencia de disminución de gastos en las cuencas de los Ríos San Marcos y Queréndaro, indica que es necesario replantearse la necesidad de entender cabalmente el estado del o los acuíferos que alimentan de agua los escurrimientos superficiales.

Adicionalmente, la delimitación de los nueve grupos de subcuencas semejantes indica que al menos debe existir una estación meteorológica y otra hidrométrica por cada grupo; lo cual permitirá contar con información hidrometeorológica básica para cada uno de los grupos delimitados por el análisis de cúmulos. Considerando las estaciones instaladas dentro de este proyecto, es necesario monitorear siete grupos. Desafortunadamente las estaciones instaladas en la subcuenca de Umécuaro, no registran datos que sean representativos del resto de la cuenca. Sin embargo, son datos muy importantes porque se registran en la subcuenca donde nace el río Grande de Morelia, el cuál suministra alrededor del 30 % de agua superficial de la Ciudad de Morelia, y dota de agua al Distrito de Riego Morelia-Queréndaro.

Dada la escasez de recursos para la compra e instalación de equipos de monitoreo, se realizó un análisis con objeto de priorizar los grupos en función de su “naturalidad”, contigüidad geográfica y superficie representada dentro de la cuenca. Este análisis permite aplicar los recursos de manera ordenada.

Los datos e información generada en esta tesis son parte fundamental de un plan de manejo del recurso hídrico de la cuenca y por ende puede apoyar la toma de decisiones y generación de políticas ambientales en la cuenca del Lago de Cuitzeo.