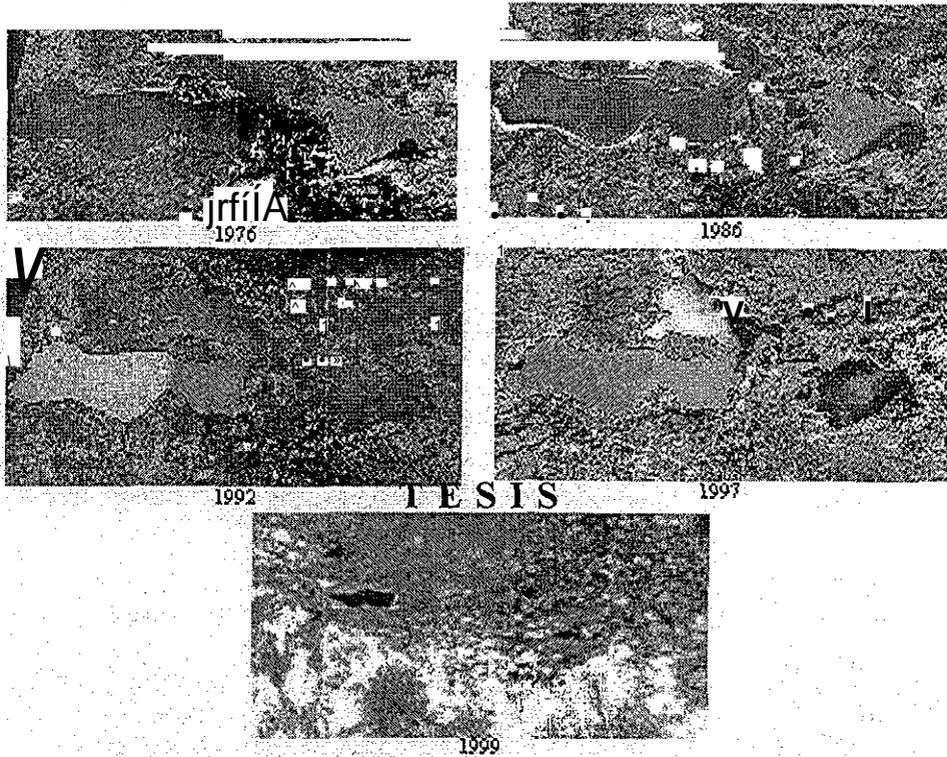




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

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



PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(ESPECIALIDAD EN GEOLOGÍA AMBIENTAL)

PRESENTA

M. EN C MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO BOCCO V.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi querida amiga, esposa, compañera y colaboradora: Erna, sin su apoyo incondicional nada sería como es.

A la familia López-Granados, mi familia adoptiva, quienes me han ayudado a crecer en todos los sentidos,

En memoria de mis queridas mujeres: mi Madre, mi Abuela y mi Madrina, sin sus enseñanzas no sería lo que soy.

índice general

	Página
índice general	i
Agradecimientos	ii-iii
Prefacio	iv-v
Resumen	vi-vi
Abstract	vii- vii
1) Introducción General	1-18
2) Insumos y herramientas de análisis a nivel regional del efecto hidrológico del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo.	19-32
3) Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research.	33-52
4) Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Bases para su ordenamiento territorial.	53-79
5) Evaluación de la calidad espacial y temporal de estaciones meteorológicas, El caso de la cuenca de Cuitzeo.	80-107
6) Estimación del escurrimiento superficial en cuencas pobremente aforadas. Un caso en el centro de México.	108-124
7) Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán.	125-152
8) Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico.	153-182
9) Conclusiones generales.	183-188

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a todos y cada una de las personas que contribuyeron de una u otra manera en la elaboración de esta tesis,, Probablemente se me olvide algún nombre y por lo tanto mis más sinceras disculpas para ellos,,

En primer lugar deseo agradecer al Dr., Gerardo Boceo (Instituto de Ecología-UNAM e Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT), quien además de ser el director de esta tesis, en sin duda es una de las personas que más ha contribuido a mi formación profesional,

Mi más profundo agradecimiento a cada uno de los miembros de mi comité tutorial, Dra Christina Siebe (Instituto de Geología-UNAM), Dr. Mario Arturo Ortiz (Instituto de Geografía-UNAM), Dr. Miguel Bravo (CENAPROS-INIFAP) y al Dr. Gerardo Boceo, quienes me ayudaron con su asesoría, consejos y amistad a culminar de la mejor manera este trabajo.

Reconozco y agradezco ampliamente las críticas y comentarios de los Dres. Margarita Caballero (Instituto de Geofísica-UNAM), Dr. Víctor Garduño (Instituto de Investigaciones Metaúrgicas-UMSNH), Rafael Huizar (Instituto de Geofísica-UNAM) y Jorge López Blanco (Instituto de Geografía-UNAM), que enriquecieron y mejoraron el manuscrito y mis conocimientos en los temas de sus líneas de investigación.

Mi mayor reconocimiento al Dr., Osear Campos (Instituto de Geofísica-UNAM) por su constante apoyo y presión para avanzar en la investigación de grado,,

Agradezco especialmente a todos los compañeros que participaron en el proyecto de *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*: Gerardo Boceo, Erna López (Facultad de Ciencias-UNAM), Vicente Salinas (Instituto de Ecología-UNAM), Alejandra Acosta (Facultad de Biología-UMSNH), Juan Pulido (CRUCO-UACH) y Juan Manuel Ortega (Facultad de Biología-UMSNH),

Deseo expresar mi agradecimiento a todo el equipo de trabajo del laboratorio de Geoecología, del Instituto de Ecología de la UNAM, campus Moreña, con los cuales he compartido no sólo la investigación, sino momentos muy agradables, muchas gracias: Vicente Salinas, Alejandra Acosta, Jesús Fuentes, Herguin Cuevas y especialmente a Erna López.

Agradezco la colaboración de tres estudiantes de intercambio que participaron en la construcción de bases de datos espaciales: Amy Hanger (Universidad de Wisconsin-Madison), Joshua Logan (Universidad de California-Santa Cruz) y Dante Hauizotl (Universidad de Autónoma de Quintana-Roo).

Reconozco la ayuda del Dr. Peter Molnar (ETH-Zürich) y del Biól. Camilo Alcántara (Instituto de Geografía-UNAM) en la construcción de programas de cómputo para el análisis de datos de precipitación y temperatura

Agradezco profundamente la revisión cuidadosa de algunos textos de esta tesis a los Drs. Alicia Castillo y Miguel Ángel Martínez (Instituto de Ecología-UNAM).

Mi mayor agradecimiento a la Dra. Isabel Isiade (IIM-UMSNH) por los comentarios emitidos a algunos de los escritos derivados de esta investigación.

Agradezco al Dr. Chong-yu Xu (Universidad de Uppsala-Suecia) por todos sus comentarios hacia el tema de hidrología en cuencas no aforadas.

Mi mayor agradecimiento al Dr. Carlos Valenzuela, director internacional del Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales (CLAS), por la beca proporcionada para cursar el módulo avanzado de sistemas de información geográfica y percepción remota, el cual se dicta como parte de los cursos de posgrado en Cochabamba, Bolivia.

Agradezco de igual forma al Profesor Paolo Burlando y al Dr. Peter Molnar el apoyo parcial para la realización del curso de posgrado *Stochastic Modelling, Hydrological Forecasting and Flood Risk* impartido en el "Institute of Hydromechanics and Water Resources Management" perteneciente al "Eidgenössische Technische Hochschule" (ETH), Zúrich, Suiza.

Gracias a Erna López por compartir conmigo no sólo el interés en la investigación de temas ambientales y de manejo de recursos, sino la vida misma. MIL GRACIAS.

Mi reconocimiento al Dr. Heberto Feneira (Instituto de Ecología-UNAM), por su apoyo técnico en el uso de programas de cómputo.

Agradezco profundamente el apoyo económico proporcionado por el SIMORELOS-CONACyT a través del proyecto 98306024, *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo* para la elaboración de la investigación, así como al CONACyT y a la UNAM por las becas de doctorado recibidas.

Al final de la investigación tuve apoyo económico para manutención por parte del Instituto de Geografía de la UNAM a través de los proyectos *Sistema de áreas naturales protegidas del Distrito Federal* y *Tendencias temporales y espaciales de la contaminación en el lago de Cuitzeo*. Específicamente mi mayor gratitud a los Drs. Silke Cram, Luis Miguel Morales, Alejandro Velázquez y José Luis Palacio.

La impresión de esta tesis fue parcialmente financiada por el Programa de Apoyo a Estudiantes de Posgrado (PAEP) a través de proyecto No. 103304, *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal en el balance hídrico de la cuenca de Cuitzeo como un indicador de la degradación de los ecosistemas*.

Prefacio

Durante la época de secas del año de 1998 el lago de Cuitzeo, ubicado al fondo de la cuenca del mismo nombre, sufrió uno de los mayores estadios de desecación en la historia del cuerpo de agua. La superficie ocupada por agua se redujo de manera considerable. Las autoridades de municipales y la Coordinación Regional Zona Centro del Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, preocupados por la situación en la que se encontraba el lago se organizaron varias reuniones de trabajo, El Dr. Gerardo Boceo, del Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), fue invitado a participar en las reuniones por las autoridades mencionadas,, En estos talleres se reconoció la necesidad de elaborar una serie investigaciones de carácter ambiental y socioeconómico, que proporcionaran las pautas para la disminución de los niveles de degradación ambiental en la cuenca del Lago de Cuitzeo,

Como resultado de los talleres la Facultad de ingeniería Civil y el Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el Centro Regional Universitario Centro Occidente de la Universidad Autónoma de Chapingo y El Instituto de Ecología de la UNAM presentaron cuatro proyectos de investigación para su financiamiento por parte el Fideicomiso SIMORELOS del CONACyT Regional,,

El Dr. Gerardo Boceo propuso el proyecto titulado "Regionalización Ecológica, Conservación de Recursos y Ordenamiento Territorial", que fue aprobado para su ejecución en el periodo 2000-2001. Este proyecto institucional tenía por objetivo general caracterizar el estatus de los recursos naturales (básicamente agua y suelos) de la cuenca del lago de Cuitzeo desde la perspectiva de la dinámica ambiental de las laderas, cauces y vaso con miras al ordenamiento ecológico de las actividades socioeconómicas que se desarrollan en su territorio (Boceo, 1998).

El Dr. Boceo me invitó a participar como estudiante de doctorado y responsabilizarme de una parte de la ejecución del proyecto, de la elaboración del levantamiento geomorfológico y de la realización de un análisis del balance hídrico espacialmente distribuido en la cuenca. El análisis mencionado tendría como objetivo principal evaluar el impacto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el recurso hídrico de la cuenca de Cuitzeo.

Las ideas básicas cuando se inició el proyecto eran que:

- 1) "el lago reflejaba la situación ambiental por la que atraviesa la cuenca del lago de Cuitzeo",
- 2) la degradación en la cuenca era el resultado de la deforestación de la cobertura de bosques templados localizados en las laderas del sur de la cuenca,

Sin embargo, la dificultad se encontraba en ¿cómo evaluar las condiciones hídricas de la cuenca si no existen suficientes datos hidrométricos, y menos aún datos actuales de aforos en ríos?

En consecuencia, el problema central de la tesis consistía en aplicar métodos alternativos e indirectos, que además fueran espacialmente explícitos, con los cuales se pudieran construir modelos de balance hídrico en cuencas pobremente aforadas. Es decir, la tesis presentada es una investigación que además de contribuir al conocimiento científico, también debería ser una investigación orientada a resolver problemas reales, presentes principalmente en países subdesarrollados.

Las técnicas de investigación aplicadas en la tesis pertenecen a la geomorfología y a la hidrología. Con las distintas técnicas se conformó un acercamiento metodológico integrado que incluyó un inventario de recursos terrestres (relieve y cobertura vegetal), hídricos (lagos, presas, y ríos) en el marco de un levantamiento aeroespacial, apoyado con un Sistema de Información Geográfica y análisis estadísticos (ANOVAS y matrices de transición). Además fue necesario incluir todos los datos espaciales disponibles de utilidad para la tesis y para la generación de propuestas de manejo de recursos. Es decir, la tesis trata de unir el conocimiento científico con las necesidades prácticas, transfiriendo los resultados de la investigación al mundo real.

El manuscrito está compuesto por siete capítulos escritos a manera de artículos de investigación, la introducción y conclusiones generales: a) Insumos y herramientas de análisis a nivel regional del efecto hidrológico del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo, b) Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research, c) Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, Bases para su ordenamiento territorial, d) Evaluación de la calidad espacial y temporal de estaciones meteorológicas, e) Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán, f) Series de tiempo de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. El último capítulo corresponde a las conclusiones generales de la tesis,

Los capítulos segundo y tercero permiten construir un marco teórico en el cual se justifica una investigación de la problemática del cambio de uso del suelo a nivel regional, las consecuencias hidrológicas de los cambios y los materiales y métodos requeridos para realizar una evaluación del cambio de los componentes de un balance hídrico.

El capítulo cuarto presenta la delimitación de unidades relativamente homogéneas, las cuales sirven de base para la construcción de un modelo de balance hídrico espacialmente distribuido. La construcción de balance hídrico espacialmente distribuido implica realizar una caracterización espacial y temporal de los datos meteorológicos de la cuenca de Cuitzeo y sus alrededores; esta caracterización sirve para evaluar la calidad de datos disponibles para la elaboración de un balance hídrico.

En los capítulos seis y siete se analizan las implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS) a nivel regional en el balance hídrico espacialmente distribuido (BHED) en una cuenca poco aforada para 1975 y 2000. Por último, en el capítulo 6 se describe y analiza la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo en el periodo de 1974 y 2001.,

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,

Resumen

Este trabajo intenta contribuir en la comprensión de las implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS) a nivel regional en el balance hídrico espacialmente distribuido (BHED) en la Cuenca del Lago de Cuitzeo con 4000 km²; dicha cuenca se caracteriza por estar poco aforada y se localiza en el centro de México. Se realizaron dos balances hídricos para los años de 1975 y 2000. Los resultados de esta investigación son producto de la integración de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica con un modelo de balance de agua; además, se utilizaron técnicas de análisis de dinámica de cambio. El análisis del cambio de los componentes del BHED a nivel de formas de relieve y por matrices de transición determinó que durante el periodo de estudio las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca no se modificaron sustancialmente. Sin embargo, las planicies y los piedemontes, mostraron un incremento en los valores de escorrentía, como resultado de un incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos. En ambos años se apreció que las formas de relieve de las zonas bajas de la cuenca, presentan una fuerte presión sobre el recurso hídrico; la cual repercute en el deterioro del lago de Cuitzeo, principalmente por contaminación y reducción del suministro de agua al vaso. El enfoque integral utilizado puede representar una alternativa viable para entender el cambio en la distribución y cantidad del agua disponible en cuencas poco aforadas como resultado de un CCVUS.

También se describe y analiza la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo en el periodo de 1974 y 2001. Los datos requeridos para el análisis entre 1974 y 2000 son imágenes de satélite de alta resolución, para el periodo comprendido entre 1997 y 2001 se utilizaron imágenes de satélite de baja resolución para 1997-2001. El análisis se apoya en el uso intensivo de técnicas de percepción remota (PR), sistemas de información geográfica (SIG) y análisis estadísticos. El análisis de largo plazo (1974-2000) indica que las superficies del vaso del lago de Cuitzeo varían con el tiempo, el cambio se asocia al comportamiento de la precipitación y la temperatura media mensual del año antecedente. Los cambios monitoreados en el corto plazo (1997-2001) indican que la superficie del lago de Cuitzeo presenta una tendencia a la reducción de su cuerpo de agua. Las observaciones de campo desde 1999, indican una desecación anual es recurrente, especialmente en la sección oeste del lago. Se sugiere que este comportamiento es resultado de la sequía que afecta a toda la cuenca desde mediados de años 1990's. Los modelos de regresión construidos a partir de la serie de largo plazo sugieren que la superficie del lago del Cuitzeo puede ser estimada a partir de los datos de precipitación y temperatura media mensual del año precedente.

Regional land cover and land use change implications in water balance. The case of Cuitzeo's Lake water shed,

Abstract

This thesis contributes in the comprehension of land cover and land use change (LCLUC) implication at regional level in the spatially distributed water balance (SDWB) in Cuitzeo Lake basin, a poor gauged basin located in Central México. It was carried out two distributed water balance for the years 1975 and 2000. The results of this research are product of an integration of tools as remote sensing and geographical information systems coupled to a water balance models; also dynamic change analysis was used. The analysis of the water balance components, based on landforms and transitional matrix, indicated a small tendency of improvement in the regional hydrologic conditions in the basin. However, as a consequence of urban land use growth, the plains and footslopes of the basin showed an increase in runoff values. In addition, in both years, the topographically lower section of the basin exhibited a high demand for water resources due to increased urban land use, along with the Cuitzeo lake degradation, particularly in terms of pollution and reduction of water supply. The approach used herein can be a viable alternative for understanding the change in quantity and spatial distribution of water available in poor gauged water basins as a consequence of LCLUC.

In addition this research describes and analyses changes in surfaces occupied by Cuitzeo's lake in the period 1974-2001. High resolution satellite data were used to analyse the 1974-2000 period, and very low resolution satellite data were used for 1997-2001 period. The research is based in remote sensing and geographic information techniques, as well as statistical analysis. The long term analysis (1974-2000) indicates that lake surfaces of Cuitzeo changes through out the time. This change is associated to monthly mean precipitation and temperature data in the previous year. Short term monitoring (1997-2001) indicates that Cuitzeo lake surfaces have a reduction trend in the water body. Field observations, also point out, that yearly desiccation is recurrent, particularly, on the west section of the lake. These results suggest that this behaviour is consequence of a drought period in the basin. This drought began in the middle of 1990's. The regression models build up from long term series, suggest that the surfaces of the lake can be estimated by monthly mean precipitation and temperature data series from the year before.

Capítulo 1

Introducción General

El concepto fundamental en el estudio del agua es el ciclo hidrológico, término que describe la circulación, almacenamiento y los procesos que conducen o afectan los movimientos del agua en la tierra (Dunne y Leopold, 1978). El ciclo hidrológico es afectado por la influencia humana a diferentes escalas, desde la local hasta la planetaria. La transformación humana de los hábitats naturales, consecuencia del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), no sólo es la causa más grande de pérdida de diversidad y abundancia biológica de las especies terrestres (Turner *et al.*, 1993; Stapanian *et al.*, 1997; Poiteía y Rademacher, 2001; Rao y Pant, 2001), sino que también tiene fuertes impactos en el clima, la biogeoquímica, la hidrología local, regional y global (Taniguchi, 1997; Vorósmaity *et al.*, 1998; Sahagian, 2000),

En general, los trabajos que analizan el comportamiento hidrológico en función del CCVUS se realizan en cuencas experimentales y aforadas, utilizando el enfoque de cuencas apareadas y con modelos hidrológicos agregados (Véanse entre otros, Bosch y Hewlett, 1982; Lal, 1997; Wigmosta y Burges, 1997; Burgos, 1999; Cevallos y Schnabel, 1998; Worrall y Burt, 1999; Meissner, *et al.*, 1999; Bronstert *et al.*, 2002). Existen pocos trabajos con relación al análisis de las implicaciones hidrológicas del cambio de cobertura a nivel sub-regional (por ejemplo, Fahey y Jackson, 1997; Lomp, *et al.*, 1998; Eikaduwa y Sakthivadivel, 1998; Buchtele *et al.*, 1998; Jain *et al.*, 2000; Carlson y Iraci, 2000; Fohrer, *et al.*, 2002). La mayoría de estos trabajos también 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.,

Enfoques

La presente investigación se basa en un enfoque geomorfológico que integra 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 en una cuenca endorreica de 4,000 km². La investigación presupone que el modelamiento hidrológico espacialmente distribuido representa la alternativa que permite entender el comportamiento hidrológico a escala 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 hidrométricos de campo, los cuales son comúnmente utilizados para expresar procesos hidrológicos en una manera dinámica (Bastiaanssen, 1999). Lo anterior motiva la necesidad de desarrollar métodos indirectos; sin embargo, es preciso señalar que el establecimiento de redes de estaciones de aforo se debe impulsar por su importancia en la generación de registros para validar modelos o para evaluar prácticas de manejo de cuencas (Olsson y Pilesjo, 1999; Bastiaanssen, 2000a; Bastiaanssen, 2000b),.

Bajo una perspectiva no convencional, los métodos indirectos exigen reconocer las características y la distribución espacial de escunimientos y los componentes bióticos y abióticos de las cuencas, así como las relaciones espaciales y temporales entre estos (Ward, 1979; Verstappen, 1983; Meijerink, 1996; entre otros), Las características y distribución espacial de los componentes se obtienen a través de un enfoque geomorfológico, porque una cuenca se considera como un sistema complejo, constituido por un conjunto de unidades de paisaje que interactúan entre si, y que pueden ser delimitadas y diferenciadas a través de técnicas de PR con criterios de relieve (véase Verstappen, 1983; van Zuidam, 1986 entre otros).

Cuando se determina la relación entre las características físicas de la cuenca (rocas, suelos y cobertura vegetal) y la respuesta hidrológica, el comportamiento hidrológico de la cuenca puede ser predicho de manera razonable sin la medición directa de procesos (Ver Meijerink *et al*, 1994; Meijerink y Mannaerts, 2000; Mendoza *et al.*, 2002).

El concepto de unidad de paisaje tiene la ventaja de ser jerárquico, lo cual sugiere una representación espacial a diferentes escalas, desde la macro ó de reconocimiento hasta la micro ó levantamiento a detalle en campo, Por su parte, la cuenca es una unidad que no describe eficientemente la variabilidad ambiental, ya que ésa no es su función, El concepto de cuenca no supone la idea de homogeneidad interna, salvo en el caso de micro-cuencas (a nivel laderas) (Boceo, 1998), Sin embargo, ambos conceptos pueden ser integrados al trabajar con un enfoque geomorfológico que permite delimitar unidades de paisaje dentro de subcuencas fluviales y lacustres, En síntesis, este enfoque permite la delimitación y construcción de un modelo espacial de la cuenca; es decir, la cuenca puede ser descrita en función de las unidades delimitadas como un agregado de laderas y cauces.

Los SIG han sido exitosamente utilizados en aplicaciones hidrológicas como una base de datos para la planeación y manejo, y para el modelamiento hidrológico en combinación con modelos hidrológicos (Véase Sui y Maggio, 1999 y Kopp, 1996, entre otros). El sinergismo entre el SIG y la PR permite a los hidrólogos modelar espacial y temporalmente los procesos hidrológicos eficientemente. La integración de los SIG y la PR con modelos hidrológicos es actualmente el acercamiento aplicable más avanzado para representar espacialmente las condiciones hidrológicas (Baumgartner y Aplf, 1996), En este sentido se pueden mencionar, entre otros, los trabajos presentados en reuniones de la Asociación Internacional de las Ciencias del Agua (IAHS) (Kovar y Narchtnebel, 1996; Baumgartner, *et al*, 1997),

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

Preguntas de investigación

Las principales preguntas que guiaron la investigación fueron:

¿Existen diferencias significativas entre los valores de los registros para precipitación y temperatura mensual a lo largo de los últimos 70 años en las estaciones localizadas en la cuenca de Cuitzeo?

¿Las variaciones, si la hubiera, obedecen a cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo en la misma cuenca o presentan un comportamiento ligado a variables macroregionales (cambio climático regional)?

¿Es posible determinar la variabilidad y los ciclos que se presentan en la distribución del agua en el Lago de Cuitzeo con el apoyo de imágenes NOAA-AVHRR?

¿Los ciclos en la variabilidad del tamaño del embalse se relacionan con el comportamiento de la precipitación-escunimiento o son una función de la degradación de la cuenca?

¿La estimación de los componentes del balance hídrico medio anual a partir de los registros de precipitación y temperatura mensual a lo largo de los últimos 25 años en la cuenca de Cuitzeo, muestran cambios reconocibles?

Objetivos

Objetivo General

Determinar las relaciones e implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a partir de la construcción de modelos espacialmente distribuidos del balance hídrico para los años de 1975 y 2000, y de la evaluación del cambio en el balance hídrico de la cuenca en los últimos 25 años por efecto del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo.

Objetivos Particulares

- 1) Analizar la relación entre la precipitación y temperatura media mensual precedente y la superficie (volumen) del cuerpo de agua del Lago de Cuitzeo.
- 2) Calcular el balance hídrico espacialmente distribuido para la cuenca del Lago de Cuitzeo por unidad geopedológica para los años 1975 y 2000, considerando los cambios de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca,
- 3) Calcular el balance hídrico espacialmente distribuido a un nivel de subcuenca para los años 1975 y 2000, considerando los cambios de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Metas y Contribuciones

1. Contribuir a la teoría del modelamiento hidrológico en zonas sin aforos, mediante el uso de técnicas geomorfológicas, de SIG y PR.

- 2, Proponer un enfoque de paisaje como una alternativa al procedimiento estándar en el desarrollo del balance hídrico,
- 3, Integrar los modelos hidrológicos de balance hídrico y las técnicas de modelamiento espacial en la cuenca del Lago de Cuitzeo
4. Generar cartografía analítica, sintética e integral que facilite la toma de decisiones relativas al manejo de recursos hídricos en cuenca con escasez de datos de afloros,,

Postulados

Los cambios en la dinámica hidrológica de las unidades geopedológicas son una función de los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo,,

La degradación ambiental de la cuenca se refleja en la disminución de la superficie y volumen del vaso del lago de Cuitzeo.

Hipótesis

Los juegos de hipótesis que se plantearon en la presente investigación fueron:

En relación con la variabilidad de la precipitación y la temperatura:

Ho = No existen diferencias significativas a lo largo del tiempo en los registros de precipitación y temperatura media mensual y anual.

Ha = Existen diferencias significativas a lo largo del tiempo en los registros de precipitación y temperatura media mensual y anual,

Sí existen diferencias significativas a lo largo del tiempo será necesario evaluar el cambio en el escurrimiento,, Las hipótesis planteadas son similares a las anteriores:

Ho = No existen diferencias significativas a lo largo del tiempo en los registros de escurrimientos medios mensuales y anuales,

Ha = Existen diferencias significativas a lo largo del tiempo en los registros de escurrimiento medios mensuales y anuales.

El crecimiento poblacional es una variable que en muchos casos propicia el deterioro de los recursos naturales en el mundo. Por lo anterior, se explorará la existencia de una posible relación positiva y significativa entre el incremento poblacional y la ciclicidad del lago y los registros de escurrimiento medios mensuales y anuales. Las hipótesis a prueba fueron:

Ho = No existen diferencias significativas entre el cambio de la población y el cambio en el balance hídrico para la cuenca

Ha = Existen diferencias significativas entre el cambio de la población y el cambio en el balance hídrico para la cuenca.

Justificación

El resultado final del uso de datos espaciales es la generación de modelos espacialmente distribuidos de precipitación, temperatura, evaporación, transpiración y balance hídrico, así como el cambio de este último a lo largo del tiempo. Esta capacidad permite comprender los cambios en el movimiento del agua debido a las variaciones de los parámetros topográficos, edafológicos, de vegetación y climáticos (McDonell, 1996). Sin embargo, como se aprecia en la revisión de bibliografía referente al tema de evaluación del cambio del balance hídrico a nivel regional en cuencas poco afoladas y que aplican el uso intensivo de tecnologías de PR y SIG, ésta es un área muy poco abordada en investigación científica. En consecuencia, el vacío en el conocimiento científico es la justificación básica de la presente investigación.

Por otro lado la construcción de modelos mensuales de precipitación-escorrentía y balance hídrico, son herramientas para el manejo de recursos hídricos, especialmente a escala regional (Xu y Sing, 1998; Xu, 1999). Existe consenso en que las estimaciones indirectas del balance hídrico son útiles en el análisis del efecto del CCVUS (Harbor, 1994; Bhaduri *et al*, 1997), cambio climático a largo plazo (Gleick, 1987; 1986; Vóiósmarty y Moore, 1991; McGuffee *et al*., 1998; Xu, 2000).

La integración de la delimitación de unidades relativamente homogéneas, el modelamiento hidrológico, la PR, y los SIGs constituyen un enfoque frecuentemente utilizado para regiones del Tercer Mundo con objeto de estimar el balance hídrico. La estimación del balance hídrico o de alguno de sus componentes varía en función de la disponibilidad de datos puntuales (precipitación, temperatura, escurrimientos, suelos, etc.). Entre las estimaciones de carácter cualitativo a semí-cualitativo se encuentran las realizadas en Kenia (Boceo, *et al*, 1991); en Sudán (Osman, 1996); en Tailandia (Zuviría, 1992); en Indonesia (Meijerink *et al*, 1994); en Bolivia (Beek, 1996), y en Puerto Rico (Cruise y Miller, 1994), entre otros.

Sin embargo, ninguno de estos trabajos elabora monitoreos del balance hídrico espacialmente distribuido y su cambio como una función del CCVUS. Entre los trabajos que consideran el monitoreo de la cobertura vegetal y uso del suelo y del comportamiento hidrológico a lo largo de tiempo se pueden mencionar los de Elkaduwa y Sakhivadivei, (1998) en Sri Lanka, y Jain *et al* (2000) y Sharma *et al* (2000) en India; es decir, en este punto se aprecia la necesidad de contribuir con elementos teóricos y operativos. Éste es uno de los principales fines del presente trabajo.

Se escogió la Cuenca del Lago de Cuitzeo porque es una unidad natural que representa 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.

En la bibliografía se reporta que la degradación de la cuenca es producto de la reducción de la superficie boscosa en el área (Comisión Ecológica del H, Congreso de Michoacán, 1994). Por observaciones de campo y análisis de datos realizadas por los colaboradores del proyecto institucional (López *et al*, 2001; López-Granados, en preparación; Acosta, 2002),

se propone que la degradación se debe al uso de aguas residuales de riego y urbanas y al aumento de población., Estos impactos se reflejan en las características hidrológicas del lago, tales como reducción del volumen y espejo de agua del lago, así como la eutroficación de sus aguas (Soto-Galera *et al*, 1999). Asimismo, no se detectan evidencias severas de erosión, transporte (en la cuenca) y sedimentación (en el vaso) (Mendoza *et al*, en prensa), Sólo existen tres subcuencas afectadas de manera importante. Las tres subcuencas vierten primero sus aguas sobre la presa de Cointzio que funciona como presa de sedimentación que atrapa gran cantidad de sedimentos proveniente de las subcuencas afectadas por erosión,

El lago de Cuitzeo ha sido declarado como 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 Naturales, 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 las regiones hidrológicas prioritarias decretadas por la Comisión Nacional para el Estudio y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) por considerarse una región de alta biodiversidad, de uso por sectores y amenazada <http://www.conabio.gob.mx/rphidrológicas/PRESENTACION.html>

Contenidos de la tesis

La tesis se divide en siete capítulos. En ellos se describe y analiza la dinámica hidrológica regional en una cuenca, con ausencia de datos hidrométricos, y el efecto CCVUS en el balance hídrico.,

En el primer capítulo se presenta una revisión de los efectos hidrológicos del CCVUS, así como las herramientas e insumos requeridos para el análisis a escala regional, Posteriormente se revisan y discuten las técnicas de PR y SIG, así como el conocimiento geomorfológico ligado al modelamiento hidrológico espacialmente distribuido (capítulo 2). En el capítulo 3 se discute la regionalización geomorfológica de la cuenca del lago de Cuitzeo; dichas unidades sirven de base para la construcción del modelo de balance hídrico espacialmente distribuido. En el capítulo cuatro se presenta la caracterización espacial y temporal de las estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca de Cuitzeo y sus alrededores., Esta caracterización sirve para evaluar la calidad de datos disponibles para la elaboración de un balance hídrico. En el capítulo cinco se evalúa la estimación del escunimiento por métodos indirectos utilizando modelos basados en las características físicas de la cuenca (roca, suelos, relieve, cobertura vegetal), En el capítulo seis se intenta contribuir en la comprensión de las implicaciones del CCVUS a escala regional en el balance hídrico espacialmente distribuido en una cuenca poco aforada para 1975 y 2000. Por último se describe y analiza la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo en el periodo de 1974 y 2001 (capítulo 7),

De esta manera se analizó la problemática hidrológica de la cuenca de Cuitzeo, permitiendo reconocer los efectos del CCVUS en el corto plazo (25 años) sobre grandes áreas geográficas (4,000 km²), y la dinámica de la respuesta del lago de Cuitzeo a los cambios en precipitación y temperatura en el siglo pasado. Lo anterior permitió identificar, al menos de

manera cualitativa, las condiciones hidrológicas de la cuenca antes y después del CCVUS, El entendimiento de estos procesos regionales y su cambio a lo largo del tiempo se consideran útiles en para la elaboración de planes de manejo y conservación de recursos naturales,,

La cuenca del Lago de Cuitzeo

La cuenca del Lago de Cuitzeo es una unidad hidrológica con una superficie de ca. 4000 km², la cual fue calculada a partir de la definición y digitalización del parteaguas de la cuenca. La cuenca está localizada en el Sistema Volcánico Transmexicano, entre los 19°30' y 20°05' latitud norte y 100°35' y 101°30' longitud Oeste (Figura 1),

Geología regional

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

La cuenca está limitada al este por productos basálticos calco-alcalinos Pliocuaternarios de la región de Queréndaro (7000,000 A.P.) y el sistema geotérmico que conforma la caldera de los Azufres, que ha generado grandes depósitos de piroclastos (Garduño 1987; Pradal y Robin, 1995); los cuales también se depositaron dentro del centro del lago (Istrade-Alcántara, 1999; Israde-Alcántara, *et al*, 2002),. El límite oeste de la cuenca corresponde al volcán Quinceo, con edades menores a 570,000 años (Suter *et al*, 2001); el límite sur lo conforma la secuencia volcánica del Oligoceno-Mioceno del Mil Cumbres (24 a 7 M.a.; IMP, 1986; Pasquaré *et al*, 1991) (Figuras 2 y 3).

La cuenca tectónicamente subsidente del lago de Cuitzeo ha sido rellenada por más de 1200 m de depósitos aluviales y vulcano-sedimentarios, lo cual sugiere una elevada tasa de subsidencia sucesiva al basculamiento Plio-pleistocénico (Istrade-Alcántara *et al*, 2002),

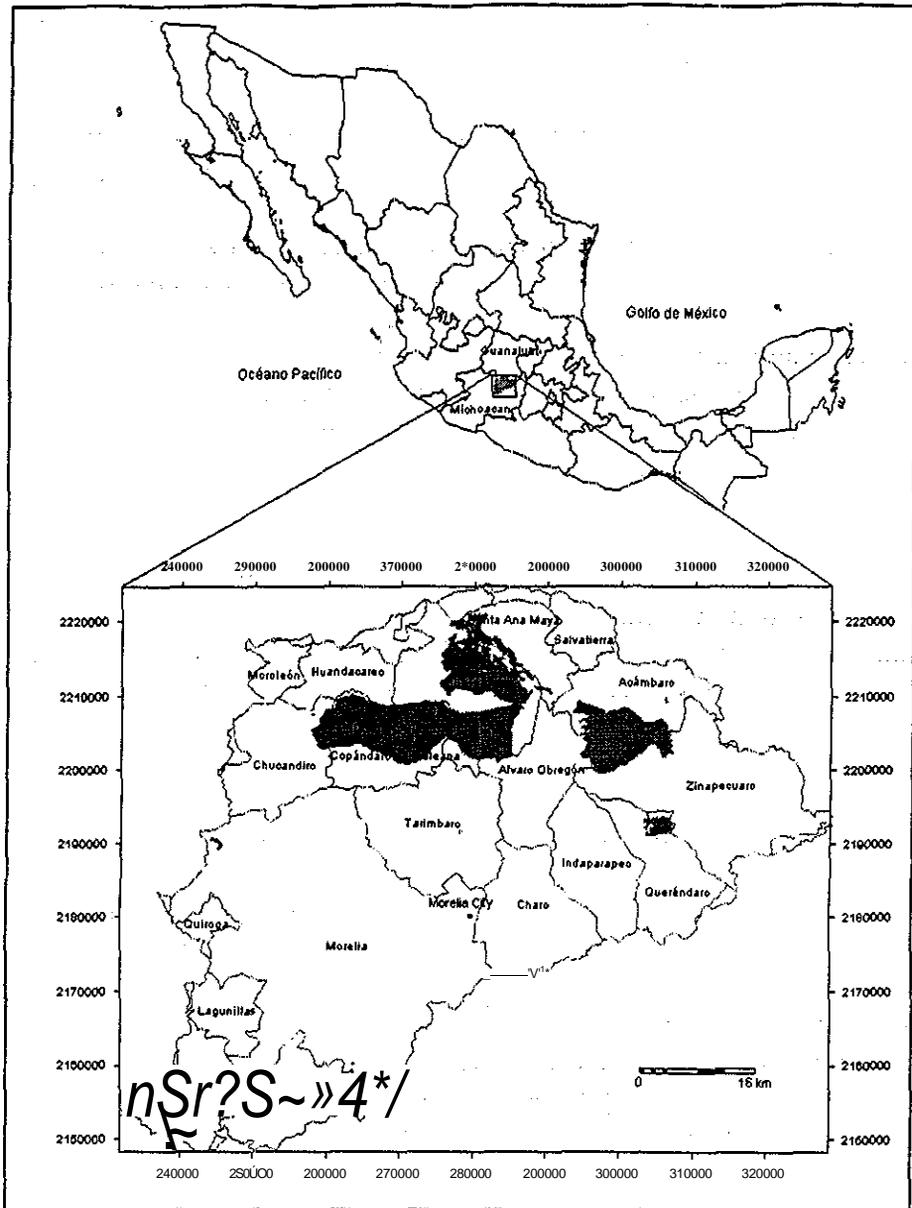


Figura 1, Área de estudio.

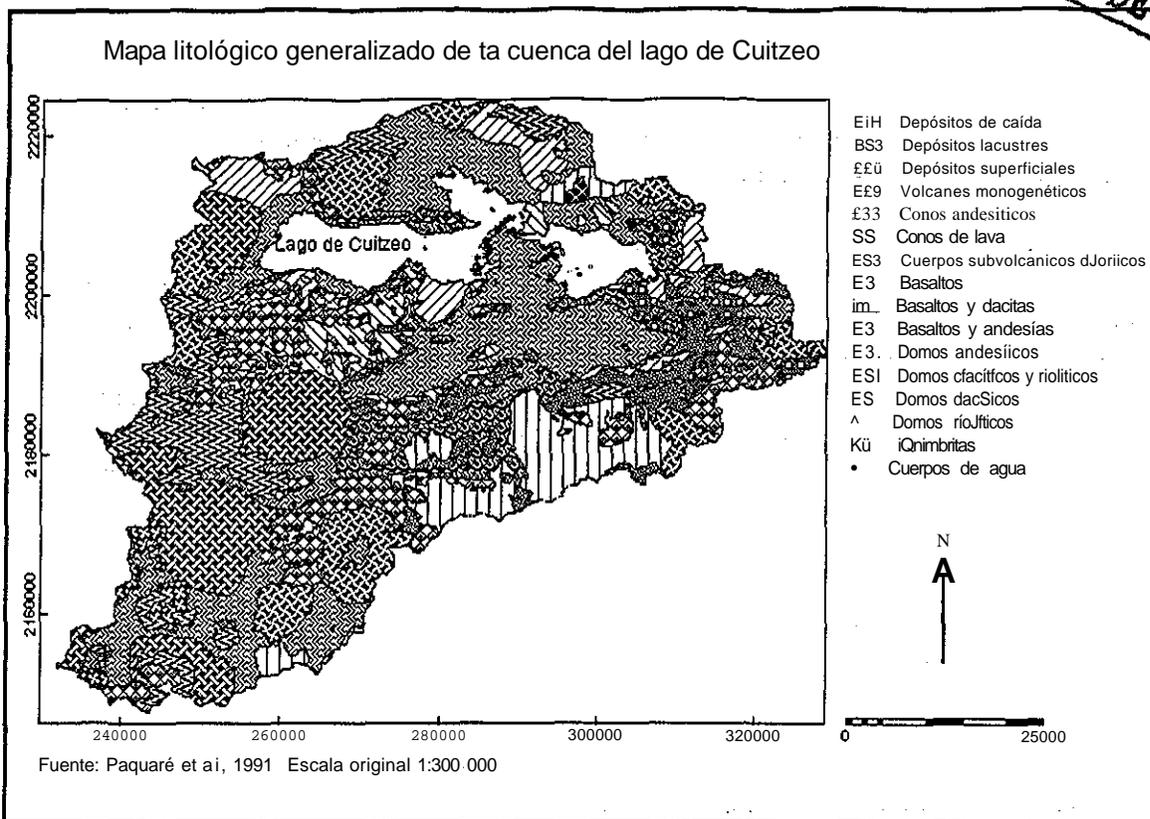


Figura 2. Mapa litológico generalizado de la cuenca del Lago de Cuitzeo

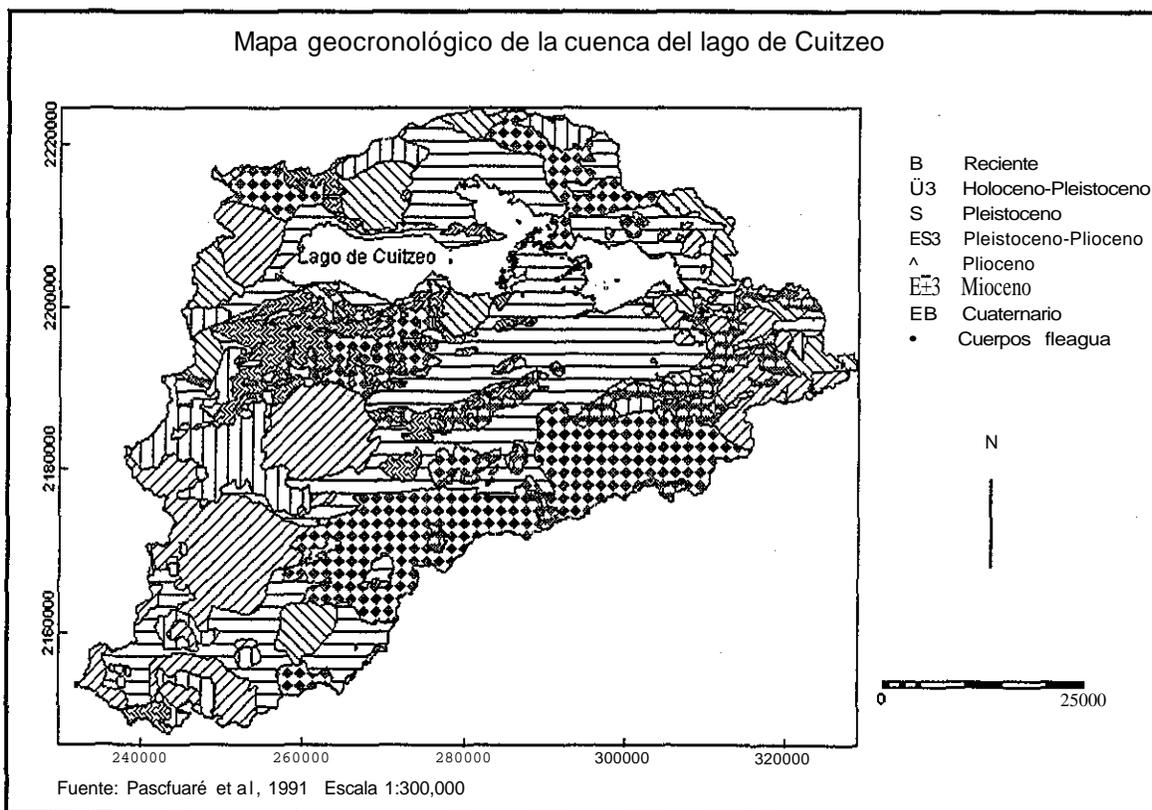


Figura 3. Mapa Geocronológico de la cuenca del Lago de Cuitzeo

Paleoambientes recientes

Las investigaciones conducidas por Israde-Alcántara *et al* (2002), quienes realizaron la estratigrafía de diatomeas de un núcleo de 27 metros extraído de la zona central del Lago de Cuitzeo, indican la existencia de tres fases lacustres, que se encuentran separadas por discontinuidades,

- Primera fase: inicia a ca. 120,000 a 105,000 A.P. (27,3 m a 21,3 m), El centro del lago tenía una profundidad moderada, menor a 10 metros, con abundante vegetación acuática y cierta turbulencia. Al final de este periodo el lago muestra una tendencia marcada a la recuperación en el nivel lacustre con diatomeas planctónicas que indican la presencia de un lago abierto y más profundo, con poca vegetación acuática. La fase termina por la presencia de ca. 10 m. de limos arenosos, que se intercalan con eventos volcánicos..
- Segunda fase: inicia ca. 56,000 A.P.. A. ca.25,000 A.P. (11,6 a 2,6 m); el lago muestra bajos niveles lacustres seguidos por breves episodios de recuperación, aunque la tendencia general es de un nivel somero. Este segundo episodio es intenumpido por otio importante evento volcánico que depositó 0.70 m de cenizas volcánicas de textura fina.
- Tercera fase: (2,6 a 0 m), inicia hace ca. 20,000 hasta el reciente, en esta sección se observa claramente un progresivo cambio de las condiciones menos turbias a más turbias, alrededor de los 18,000 A.P.. El periodo más reciente desde los 6,165 años A.P. Desde Holoceno medio se registran condiciones de mayor concentración iónica, turbidez, tropismo y menor profundidad del tirante de agua.

Tipos de clima

El clima predominante en la cuenca corresponde al templado con lluvias de verano; sin embargo, la distribución espacial de la precipitación y la temperatura indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional entre los climas templado secos a climas templado húmedo; esta variación corresponde a un incremento en la amplitud de relieve en la cuenca. La precipitación media anual es de 841,9 mm, pero es muy variable (Desv, Std. = 190,41 mm, C.V. =22.6).. La temperatura media anual es 17,3°C (Desv., Std = 1.4 °C, C.V. =8). El análisis de series de tiempo indica tres periodos relativamente secos, de 1940 a 1960, de 1980 a 1990 y de 1995 a 2000,

Hidrografía

El patrón de drenaje en la porción elevada de la cuenca es de drendrítico a subdendrítico, la mayor densidad de escunimientos se localiza hacia la porción elevada del sur de la cuenca; los escunimientos en la porción norte son escasos, con una red de drenaje poco desarrollada. En el sector centro-oriental, con vulcanismo reciente también presenta un patrón de drenaje poco desarrollado., En la porción plana de la cuenca, el patrón de drenaje se encuentra fuertemente alterado por la actividad agrícola de riego, la cual se ubica principalmente en ía porción sur del lago., La corriente principal de la cuenca es el Río Grande de Morelia, la cual fluye de SW a NE, pero al llegar a la planicie de riego éste se rectifica y se convierte en un canal de riego.

Según la cartografía de hidrología de aguas superficiales de INEGI (1983), el 76 % de la cuenca tiene un coeficiente de escurrimiento de 10 a 20 %. Según la cartografía de INEGI (1983), el 71 % de la cuenca presenta posibilidades bajas de almacenamiento de agua subterránea

Suelos

En la mayor parte de la cuenca se desarrollan Vertisoles, Luvisoles, Andosoles y Acrisoles, es decir, suelos constituidos por materiales con texturas predominantemente finas (Figura 4). Los Vertisoles existen principalmente en la porción centro y norte de la cuenca, la cual tiene menor amplitud de relieve. Los Luvisoles se encuentran en la sección este, sobre domos volcánicos; y en la sección centro-oeste en piedemontes volcánicos, La fase física predominante es la pedregosa y la fase química sódica se ubica en los alrededores del lago.

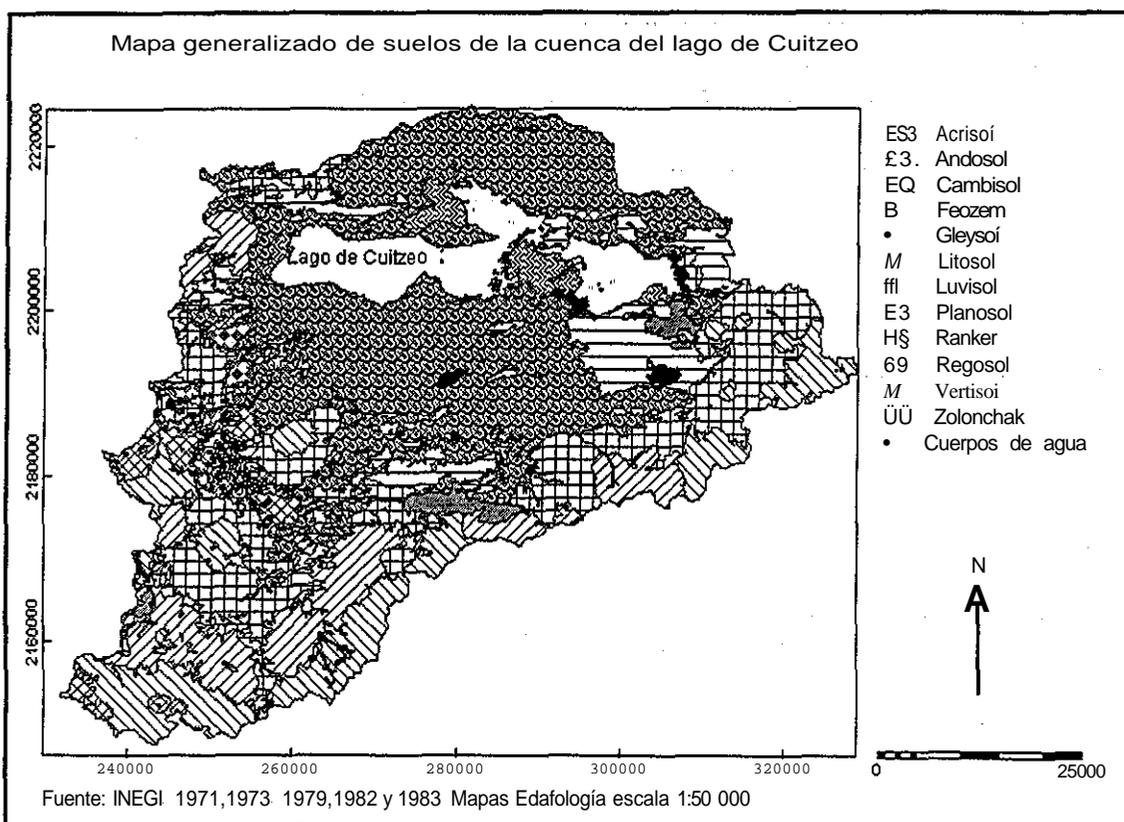


Figura 4- Mapa generalizado de suelos de la cuenca del Lago de Cuitzeo

Tipos de vegetación

De acuerdo con la cartografía de INEGI (1989), que representa la cobertura de 1975, y Boceo y Mendoza (1999), quienes cartografiaron la distribución de la cobertura de 1993, alrededor del 20 % de la cuenca está conformada por bosques templados, principalmente de pino y encino; los matorrales subtropicales ocupan alrededor del 15 %; los pastizales inducidos menos del 15 % y los cultivos ocupan alrededor del 40 % de la cuenca para ambos años.

Referencias

- Acosta, A., 2002. *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Biología, UMSNH: 127 pp.,
- Bastiaanssen, W.G.M., 1999., The use of remote sensing to improve irrigation water management in developing countries, in (eds.) G.J.A. Nieuwenhuis, R.A. Vaughan and M. Molenaar, *Operational Remote Sensing for Sustainable Development*, A.A. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 029 9: 3-17.
- 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. http://www.itc.nl/wres/basti_text.html
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000b, SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229: 87-100.
- Baumgartner, M.F. y G.M. Apfl, 1996. Remote sensing and geographic information systems. *International Journal of Remote Sensing* 41(4): 593-607.
- Baumgartner, M.F., G.A., Schultz y A.I., Johnson (Editores), 1997., *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*. IAHS Publication No. 242: 259 p.
- Beek, M.A., 1996 *Drainage pattern analysis and extraction of hydrologic properties from digital elevation model*. M.Sc. Thesis, Silsoe College, Cranfield University, U.K.: 57 P.
- Bhaduri B., M. Giove, C. Lowry y J. Haibor, 1997. Assessment of long-term, hydrologic effects of land use change, The curve number technique for calculating runoff is modified to estimate lost groundwater recharge. *Journal of American water works association* 89 (11): 94-106,
- Boceo, G. 1998 *La cuestión espacial en la investigación socioambiental*. Seminario Interno. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM,
- Boceo, G., H.A.M. de Brouwer y F. Karanga, 1991. *Modelling water resources and water demand in semi-arid areas: data integration and analysis using a Geographic Information System Samburu District, northwestern Kenya*. ITC-UNESCO internal Report prepared for the UNESCO-ITC Programme. Enschede, The Netherlands.
- Boceo, G., y M.E. Mendoza, 1999. *Evaluación de los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo (1975-1995), Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio*. Informe Técnico Final. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, Morelia: 70 pp.

- Bosch, J.M. y J.D. Hewlett, 1982, A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration *Journal of Hydrology* 55:3-23.
- Bronstert, A., D. Niehoff y G. Bürger, 2002., Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, 16: 509-529
- Buchtele, X., A., Henmann, 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.
- Burgos, A. 1999 *Dinámica hidrológica del Bosque Tropical Seco de Chamela, Jalisco; México*. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México: 125 p.
- Calder, I.R., 1993. Hydrologic effects of land use change. In: Maidment D, R. (ed.), 1993. *Handbook of Hydrology*. New York.
- Carlson, T.N., S., Tiaci 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.
- Cevallos, A. y S. Schnabel, 1998., Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain), *Journal of Hydrology* 210: 146-160
- Comisión Ecológica del H. Congreso de Michoacán, 1994 *El deterioro Ambiental de la Cuenca del Lago de Cuitzeo*. Morelia, Michoacán: 82 p.
- Comité Tripartita, 1992 *Segunda Reunión sobre la Conservación de los Humedales- Paquete de solicitudes* 11- 14 de febrero, 1992. Tamaulipas, México, 10p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), *Regiones hidrológicas Prioritarias*
<http://www.conabio.gob.mx/rphidrológicas/PRESENTACIÓN.html>
- Cruise, J.F. y R.L. Miller, 1994., Hydrologic modeling of land processes in Puerto Rico using remotely sensed data., *Water Resources Bulletin* 30 (3): 419-428,
- Dunne, T. y L.B. Leopold, 1978., *Water in Environmental Planning*. W. H. Freeman and Company, San Francisco: 818 p.,
- Elkaduwa, W.K.B. y R. Sakthivadivel, 1998 *Use of historical data as a decision support tool in watershed management: A case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka*. Report 26. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

Fahey, B., y R. Jackson, 1997, Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand, *Agricultural and ForeU Meteorology* 84 (1-2): 69-82.

Ferian, L., VE, Garduño, I. Spinnler y E., Ceragiolo, 1994 Geological and structural study of the Chápala Rift, State of Jalisco, México, *Geofísica Internacional* (32) 3: 487 - 499.

Fohrer, N., S. Haverkamp, K. Eckhardt y 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,

Gaiduño, V H , 1987 *Estudio Geológico preliminar del área de Tlalpujahua*, Senguio, Michoacán. Comisión Fedeial de Electricidad, Repoite Interno, GG 2/87.,

Gaiduño, V H,, 1999. Marco tectónico del estado de Michoacán. En: Coiona-Chávez, P. e I. Israde-Alcántara., *Carta Geológica del Estado de Michoacán, escala, 1:250,000* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de Difusión Cultural y Extensión Universitaria. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.. Departamento de Geología, Michoacán: 1-9.

Gieick PH, 1987, The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento basin, *Water Resources Research*, 23 (6): 1049-1061.

Harbor, J, 1994, A practical method for estimating the of land-use change on surfáce lunoff, groundwater recharge and wetland hydrology, *Journal of the American Planning Association*, 60 (1): 95-108.

IMP (Instituto Mexicano del Petróleo), 1986., Estudio petrogenético de las rocas ígneas de la porción central del Eje Neovolcánico., Proyecto C-2006. Instituto Mexicano del petronelo, Reporte Interno No, 30,

Israde-Alcántara, I., 1999. Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán. En: Corona-Chávez, P. e I. Israde-Alcántara. *Carta Geológica del Estado de Michoacán, escala, 1:250,000.* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Secretada de Difusión Cultural y Extensión Universitaria Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Departamento de Geología, Michoacán:

Israde-Alcántara, I., V.H. Gaiduño y R. Oitega-Murillo, 2002.. Paleambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuítzeo, *Hidrobiológica*, 12 (1): 61-78.

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,

Kopp, S. M, 1996. Linking GIS and hydrological models: where we have been, where we are going? En: Kovar, K, y H,P., Narchtnebel (Editores), 1996., *Application Geographic*

Information Systems in Hydrology and Water Resources Management IAHS Publ. No 235:133-140.

Kovar, K. y HP. Naichtnebel (Editores), 1996 *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management* IAHS Publication No. 235: 711.

Lal, R, 1997, Deforestation, tillage and cropping systems effects on seepage and runoff water quality from a Nigerian Alfisol, *Soil & Tillage Research* 41 (3-4): 261-284,

López, E., G. Boceo, ME., Mendoza y E. Duahu, 2001., Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city, México *Landscape and urban planning*, 55 (4): 271 - 285.

López-Granados, E, (En preparación). *Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán*. Tesis Doctoral en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, IJNAM,,

Lóiuip, J.K., Refsgaard, J.C. y Mazvimavi, D., 1998 Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe, *Journal of Hydrology* (205) 3-4: 147-163

McDonnell, R A, 1996., Including the spatial dimension: using the spatial information system in hydrology. *Progress in Physical Geography* 20 (2): 159-177.

McGuíTie, K, A Hender son-Selléis y H Zhang, 1998, Modelling climate impacts of future land use change. In: Malovey, BK. (ed) *Human Activities and the Tropical Rainforest*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher,

Meijerink, A.M.J. y C.M.M, Mannaerts 2000. Introduction to and general aspects of water management with the aid of remote sensing. In: Schultz, G, and E Engman (eds) *Remote Sensing in Hydrology and Water Management* Springer, Alemania.

Meijerink, A.M.J., 1996. Remote sensing applications to hydrology: groundwater. *Hydrological Science Journal*, 41 (4): 549-561.

Meijerink, A.M.J, H.A.M., de Brouwer, C.M. Mannaerts y G.R. Valenzuela, 1994, *Introduction to the use of Geographical Information Systems for Practical Hydrology*. UNESCO, International Hydrology Programme and ITC publicación No. 23. Enschede, The Netherlands: 243 p,

Meissner, R., J. Seeger, H. Rupp y H. Baila, 1999, Assessing the impact of agricultural land use changes on water quality. *Water Science and Technology* 40 (2): 1-10.

Mendoza, ME., G. Boceo y M. Bravo, 2002., Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research, *Progress in Physical Geography*, 26 (3): 271-290.

Mendoza, ME., G. Boceo y López-Granados, E., 2002 (en prensa), Erosión en la cuenca de Cuitzeo., Un análisis espacial a nivel regional, Isiade-Álcantaia (editoia), *Geología de Morelia y sus alrededores*. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,

Olsson, L y P. Pilesjo, 1999 *Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment* ITC Short Course of Environmental Modelling, <http://www.natgeo.lu.se/lennartweb>,

Osman, BET., 1996. *GIS-Hydrological Modelling in Arid Lands., A geographical Synthesis of surface waters for the African Red Sea region in the Sudan*. Ph D. Thesis, Lund University, Sweden: 202 p,

Pórtela, R, y I. Rademacher, 2001 A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. *Ecological Modelling*, 143 (1-2): 115-146

Pradal, E, y C. Robin, 1994., Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, México. *Journal of Volcanology and Geotherma Research*, 63: 201-215.

Rao, K.S, y R., Pant, 2001. Land use dynamics and landscape change pattern in a typical micro watershed in the mid elevation zone of central Himalaya, India, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86 (2): 113-124.

Sahagian, D., 2000, Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution, *Global and Planetary Change* 25: 39-48.

Schumann, A.H., R. Funke y G.A. Schultz, 2000, Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling, *Journal of Hydrology*, 240: 45-61

Sharma, K.P., C.J. Vórósmarty y Moore III, B., 2000., Sensitivity of Himalayan hydrology to land-use and climatic changes. *Climatic Change* 47: 117-139.

Soto-Galera, I. Paulo-Maya, E. López-López, JA., Sema-Hernández y J. Lyons, 1999. Change in Fish Fauna as Indication of Aquatic Ecosystem Condition in Río Grande de Morelia-Lago de Cuitzeo Basin, México, *Environmental Management* 24 (1) . 133-140

Stapanian, M., A., Casseil, D.L. y Cíne, S.P., 1997., Regional patterns of local diversity of trees: associations with anthropogenic disturbance., *Forest Ecology and Management*, 93 (1-2): 33-44,

Sui, D.Z., y R.G. Maggio, 1999. Integrating GIS with hydrological modelling: practices, problems, and prospects. *Computen, Environment and Urban Systems* 23: 33-51.

Sutei, M, M. López, LO., Quintero y M.M Carrillo, 2001. Quaternary intra-arc extension in the central Transmexicanic Belt, *Geológica Society of America Bulletin*, 113 (6),

Taniguchi, M. (Editor), 1997 *Subsurface Hydrological Responses to Land Cover and Land Use Changes*. Kluwer Academic Publishers, Boston: 220 p,

Turner, B L., R H Moss y D I Skole, 1993 *Relating land use and global land cover change: a proposal for an IGBP-HDP core project* Global Change IGBP No 24, HDP report No., 5.

Van Zuidam, R, A, 1986 *Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping* ITC, Smits Publishers the Hague, The Netherlands: 442 p.

Verstappen, H.Th., 1983 *Applied Geomorphology (Geomorphological Survey for Environmental Development)* Elsevier, Amsterdam: 437 p.

Vöörsmarty C.J. y B., Mooie III, 1991. Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi river, *Surveys in Geophysics*, 12: 271-311.

Vöörsmarty C.J., C. Li, J. Sun, S, Dai, 1998 Emerging impacts of anthropogenic change on global river systems: The Chinese example., In: Galloway, J y I, Melillo (eds) *Asian Change in the Context of Global Change* Cambridge University Press, Cambridge, UK

Ward, R.C, 1979. Geographical hydrology. *Progress in Physical Geography*, 3 (3): 392-412,

Wigmosta, M.S., y S.J. Burges, 1997., An adaptive modeling and monitoring approach to describe the hydrologic behavior of small catchments. *Journal of Hydrology*, (202) 1-4: 48-77.

Wonnail, F., y T.P, Burt, 1999. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models *Journal of Hydrology* (221) 1-2: 75-90,

Xu, C.Y. y P, Singh, 1998. A review on monthly water balance models for water resource investigations. *Water Resources Management* 31: 31-50.

Xu, C.Y., 1999., Estimation of parameters a conceptual water balance for ungauged catchments. *Water Resources Management* 13: 353-368.

Xu, C.Y., 2000., Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments", *Water Resources Management*, 13: 369-382,

Zuviária, M. De, 1992. *Mapping Topoclimates by integrating topographic, meteorological and land ecological data in a geographic information system. A case study of the Loam Sak area, north central Thailand* PhD Thesis, University of Amsterdam-ITC, The Netherlands: 183 p.,

Referencias cartográficas

- INEGI, 1971. Carta de edafología. Pumandiro F14 C82, escala 1:50,000,
- INEGI, 1973., Carta de edafología., Acámbaro F14 C84, escala 1:50,000,
- INEGI, 1973, Carta de edafología. Moroleón F14 C83, escala 1:50,000..
- INEGI, 1979, Carta de edafología., Cuitzeo E14 A13, escala 1:50,000.
- INEGI, 1979., Carta de edafología. Morelia E14 A23, escala 1:50,000..
- INEGI, 1979, Carta de edafología., Pátzcuaro E14 A22, escala 1:50,000..
- INEGI, 1979, Carta de edafología. Tzitzio E14 A24, escala 1:50,000.
- INEGI, 1979 Carta de edafología. Villa Escalante E14 A32, escala 1:50,000..
- INEGI, 1979., Carta de edafología, Zinapécuaro E14 A14, escala 1:50,000.
- INEGI, 1982 Carta de edafología. Coeneo de la Libertad E14A12, escala 1:50,000.
- INEGI, 1982., Carta de edafología., Villa Madero E14 A33, escala 1:50,000.
- INEGI, 1983, Carta de edafología. Maiavatio E14 A15, escala 1:50,000.
- INEGI, 1983., Carta hidrología de aguas subterráneas, Querétaro F 14-1, escala 1:250,000.
- INEGI, 1983., Carta hidrología de aguas subterráneas, Morelia E14-1, escala 1:250,000.
- INEGI, 1983., Carta hidrología de aguas superficiales Morelia E14-1, escala 1:250,000,
- INEGI, 1983., Carta hidrología de aguas superficiales., Querétaro F14-1, escala 1:250,000.,
- INEGI, 1989 cobertura vegetal y uso del suelo., Querétaro F14-1, escala 1:250,000.
- INEGI, 1989 cobertura vegetal y uso del suelo Morelia E14-1-escala 1:250,000.,
- Pasquaré, G., L, Ferrari, V.H. Garduño, A., Bibaldi y L.Vezzoli, 1991. *Geologic map of central sector of Mexican Volcane Belt, State of Guanajuato and Michoacan, México.* Map and Chart Series MCH072 Geological Society of America.

Capítulo 2

Insumos y herramientas de análisis a nivel regional del efecto hidrológico del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo¹

Resumen

Este trabajo presenta una revisión de los efectos hidrológicos del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), así como las herramientas e insumos requeridos para el análisis a escala regional. El efecto hidrológico del CCVUS puede predecirse por la síntesis de datos provenientes de experimentos de campo o por consideraciones teóricas. Frecuentemente, las implicaciones del CCVUS se analizan en función de los cambios en la producción de escurrimientos, aunque también se analizan los cambios en los procesos de evapotranspiración e infiltración. El conocimiento y modelos hidrológicos generados en cuencas experimentales han sido útiles en la construcción de modelos espacialmente distribuidos. Los modelos espacialmente distribuidos se construyen a partir de la integración de: a) modelos hidrológicos convencionales, b) análisis de documentos aeroespaciales y c) de tecnologías de percepción remota y sistemas de información geográfica. Los modelos espacialmente distribuidos permiten el modelamiento de los datos bajo un marco espacial que facilita el entendimiento de las condiciones hidrológicas de las cuencas afectadas por el CCVUS. El modelamiento hidrológico espacialmente distribuido representa una alternativa para entender la dinámica hídrica a escala regional en cuencas poco aforadas y con necesidad de evaluar la disponibilidad y distribución del agua. La necesidad de información es común en los países en vías de desarrollo.

INTRODUCCIÓN

Se ha reconocido que la transformación humana de los hábitats naturales es la causa más grande de pérdida de diversidad y abundancia biológica de las especies terrestres (Turner *et al.*, 1993; Stapanian *et al.*, 1997; Pórtela y Rademacher, 2001; Rao y Pant, 2001). Los cambios en las características de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), también tienen impacto en el clima, la biogeoquímica, la hidrología local, regional y global (Taniguchi 1997; Vörösmarty *et al.*, 1998; Sahagian, 2000).

Comúnmente se piensa que el impacto del CCVUS en la hidrología de algún sitio, se asocia principalmente a las alteraciones del pico de la descarga, el cual es responsable de las inundaciones locales; sin embargo, existe un amplio rango de impactos hidrológicos (Savini y Kammerer, 1961; Robinson 1976; Dzurik, 1990; Goudie, 1990). Uno de los impactos más importantes es el incremento en el volumen de la escorrentía, el cual puede contribuir a la inundación corriente abajo y puede representar una pérdida neta en la recarga del acuífero. Una pérdida en la recarga puede reducir el aporte de agua residencial y municipal, y potencialmente amenazar la salud de los humedales locales que dependen del agua en el suelo para mantener sus condiciones húmedas durante los periodos secos del año (Gosselink y Turner, 1978; Mitsch y Gosselink, 1986; Burke *et al.*, 1988; Quezada y Jiménez, 1988). A pesar del fuerte interés en temas como el mantenimiento de la recarga de aguas subterráneas y la prevención de impactos

¹ Manuscrito preparado para enviarse a Ciencia Nicolafta. Autores: Manuel Mendoza, Gerardo Boceo y Erna López

negativos sobre la hidrología regional; muchos científicos ambientales y planeadores locales carecen de la habilidad para estimar los efectos hidrológicos potenciales del CCVUS. Los resultados de un análisis de las consecuencias hidrológicas del CCVUS pueden ser utilizados para la construcción y revisión de planes de manejo de recursos, concientización de la comunidad en relación a problemas ambientales potenciales y minimización de disturbios del régimen hidrológico (Harbor, 1994; Mendoza *et al.*, 2001),,

CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL

Lambin (1997) reconoció que la mayor parte de los cambios ocurridos en ecosistemas terrestres por parte del hombre se deben a: 1) conversión de la cobertura del terreno, 2) degradación del terreno, y 3) intensificación en el uso del terreno.

1. - Conversión o cambio en el uso del suelo

Este tipo de cambio corresponde a la transformación o reemplazo de la cobertura original. Este tipo de cambio está siendo realizado a un paso acelerado tanto a escala global, como regional y local, El ejemplo más difundido sobre el CCVUS es la deforestación tropical, Entender el impacto que ocasiona el CCVUS, implica estudiar los factores ambientales y socioeconómicos que se asocian al cambio,

2) - Degradación del terreno

Este proceso implica una declinación en la condición natural de los recursos terrestres y acuáticos y de esta forma afecta directamente la producción de alimentos. Existe una fuerte interacción entre la degradación del terreno, la productividad primaria de la vegetación y el clima (Charney y Stone, 1975; Schlesinger *et al.*, 1990 en Lambin, 1997).

3).- Intensificación del uso del terreno

La intensificación del uso del terreno se encuentra asociada con sistemas agrícolas, agroforestales o de pastoreo. Un manejo intensificado puede estar basado en técnicas como la irrigación, utilización de fertilizantes, incendios, prácticas de labranza o la integración de diferentes actividades de producción (Ojima *et al.*, 1994),. Esta intensificación afecta la composición del ecosistema, el ciclaje de nutrientes y la distribución de la materia orgánica (Detwiler, 1986; Goudie, 1989),.

HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS E INSUMOS

La generación de datos de cobertura vegetal y uso del suelo en áreas superiores a las decenas de km², requiere la realización de levantamientos de cobertura vegetal y uso del suelo; mientras que su análisis y cuantificación implica el uso de herramientas de modelación espacial dentro de un sistema de información geográfica (SIG).

La determinación y cuantificación de los efectos del CCVUS, se han realizado, tradicionalmente en cuencas experimentales y aforadas, donde una gran cantidad de parámetros es medida en el campo (precipitación, radiación, temperatura, escurrimiento, etc.), Los resultados de estos trabajos han permitido generar conocimiento y modelos hidrológicos agregados que relacionan el CCVUS con tasas de escurrimiento, de infiltración y recarga, entre otras, Este conocimiento y modelos hidrológicos agregados

han sido útiles en la construcción de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos (Vörösmarty *et al.*, 1989; Boceo *et al.*, 1991a; Zuviría, 1992; Arnell, 1999), con los cuales es posible analizar el efecto del CCVUS en la hidrología regional. A continuación se describen y analizan las técnicas de levantamiento de cobertura vegetal y uso del suelo, y análisis y modelamiento del CCVUS dentro de un SIG.

LEVANTAMIENTOS DE COBERTURA VEGETAL

Desde finales de la década de los treinta, los levantamientos aeroespaciales han demostrado con éxito que los datos provenientes de sensores remotos son útiles en el inventario y cartografía de cobertura y uso de suelo (Anderson *et al.*, 1976). La delimitación de las coberturas se puede realizar utilizando un análisis numérico (o digital) de datos espectrales provenientes de imágenes o bien por interpretación visual en pantalla de computadora o en papel. Sin embargo, la interpretación de los usos requiere la integración de datos de campo relativos a la forma de apropiación de los recursos.

La delimitación de las clases de cobertura vegetal no es una tarea trivial. Una de las principales desventajas, es que el proceso de clasificación visual es subjetivo al depender de la experiencia y formación del intérprete. Además, el acercamiento numérico es inconsistente en la identificación de clases espectrales; lo cual deriva en la similitud de las respuestas espectrales de diferentes objetos entre sí (Boceo *et al.*, 1991 b). Adicionalmente, no existe un sistema ideal de clasificación de la cobertura y uso del suelo, debido a que éste es resultado de los objetivos de un aerolevantamiento (por ejemplo, forestal, agrícola o hidrológico), y de las características de los documentos aeroespaciales con que se cuenta (escala, fecha de toma, estereoscopia, monoscopia, etc.), así como de la experiencia del intérprete. En consecuencia, es difícil comparar los datos disponibles. Sin embargo, la demanda de datos estandarizados se incrementa en la medida en que se reconoce a éstos como básicos para evaluar y manejar áreas críticas desde un punto de vista ambiental (Anderson *et al.*, 1976).

En cualquier levantamiento de tipo aeroespacial se deben considerar las limitaciones y alcances de los documentos en función de los objetivos de trabajo y superficies a levantar. Las imágenes satelitales en formato digital son especialmente útiles en la evaluación y análisis de cobertura vegetal y uso del suelo desde el nivel regional hasta el planetario (SPOT - NOAA AVHRR). Las fotografías aéreas convencionales y en formato digital son más útiles en la interpretación de cobertura y uso del suelo a nivel semidetallado y detallado (entre 1:1,000 hasta 1:80,000).

Las imágenes digitales convencionales que son capturadas desde satélites, tienen resoluciones espaciales desde medianas a muy pequeñas (30 m x 30 m hasta 4 km x 4 km); las cuales repercuten en el nivel de la clasificación por el efecto de la mezcla de los valores de píxel. En otras palabras, a menor resolución mayor confusión y en consecuencia, mayor generalización y simplificación en el sistema clasificatorio y leyenda; es decir, sólo es factible diferenciar un número reducido de tipos de cobertura (en general no más de 10 clases distintas) (véase Boceo *et al.*, 1991b).

Al trabajar con documentos de mayor resolución, es posible diferenciar alrededor de 15 clases distintas de cobertura; especialmente en zonas intertropicales, como es el caso de México (véase entre otros Boceo y Vaianezuela, 1988). Sin embargo, el número de clases a cartografiar puede ser mayor si utilizamos otros atributos en el sistema

clasificadorio; por ejemplo, se puede considerar la densidad de cobertura de cada tipo de vegetación; entonces cada tipo de vegetación puede diferenciarse en dos o tres clases de densidad por tipo de cobertura vegetal (bosque de pino abierto, semiabierto y cerrado),,

Las primeras alternativas para incrementar la precisión de una clasificación basada en datos multiespectrales en regiones con un patrón de mosaicos, involucraron la incorporación de otras capas de datos en un sistema de información geográfica. Entre las capas de información más utilizadas en los modelos se encuentran la topográfica, expresada a través de modelos digitales de terreno (MDT), la orientación de laderas derivadas del MDT, la de geomorfología (Boceo y Valenzuela, 1988; Mass y Ramírez, 1996; Fahsi *et al*, 2000; Watson y Wilcock, 2001). Las capas de datos se cruzan utilizando operadores de lógica booleana (por ejemplo, si geomorfología = "ladera escarpada" y cobertura = "agricultura de temporal", entonces bosque de pino),. Es decir, la exactitud de clasificaciones se incrementa no sólo con los datos adicionales, sino con la incorporación de modelos de toma de decisión que construye el experto en clasificación de coberturas,

Recientemente, con el desarrollo de nuevas tecnologías en percepción remota, las alternativas para incrementar la exactitud de las interpretaciones a partir de datos digitales, especialmente en regiones intertropicales radican en el uso de sensores con una mayor resolución espacial (hiperespaciales) tales como Ikonos y Orbview-3 o sensores con mayor cantidad de bandas (hiperespectrales), como IVIRIS. Con los primeros se obtiene un gran detalle espacial y grandes volúmenes de información, aunque generalmente los usuarios solamente pueden analizar pequeñas porciones de estos datos (Palma, en prep),. El progreso alcanzado por los sensores para aumentar la resolución espacial, ha llevado a tratar de ver todo en el paisaje, pero este enfoque puede no ser o práctico (Harris, 1985),. Los sensores hiperespectrales por su parte, son capaces de proveer datos en bandas muy angostas dentro del espectro (en el orden de los nanómetros); con ellos es posible clasificar al objeto, y definir su constitución (Palma, en prep),

USO DEL SUELO

Los tipos de cobertura vegetal definidos a través del sistema de clasificación, pueden ser relacionados a sistemas de clasificación de uso, capacidad, aptitud y vulnerabilidad de los suelos para ciertas prácticas de manejo y para actividades potenciales. Sin embargo, el inventario y clasificación de usos múltiples que ocurren sobre el terreno no es una tarea fácil de resolver (véase Chilar y Jansen, 2001). Debemos considerar que no es lo mismo un tipo de cobertura y el uso que se pueda dar a ella, es decir no siempre existen una relación 1 a 1 entre una cobertura y un uso. Los usos múltiples pueden ocurrir simultáneamente tanto en el espacio como en el tiempo (recreación y forestal) o alternativamente en el tiempo (agrícola y pastoreo). Obviamente, el uso no es detectable en los productos de percepción remota. El intérprete tiene que relacionar la información obtenida en campo y los patrones observados en las fotografías o imágenes de satélite, para poder inferir la dinámica de uso de la cobertura vegetal.

Por último, es importante mencionar que la generación de mapas de cobertura vegetal y uso del suelo a partir de datos de percepción remota (los cuales se interpretan visual o digitalmente), corresponde al insumo básico de la evaluación de cambios de cobertura vegetal y uso del suelo,. La información generada en la interpretación requiere de un sistema eficaz de manejo e integración de datos que permita su manejo, procesamiento y

transformación en información útil; es decir, se requiere de un sistema de información geográfica (Valenzuela, 1991; Boceo *et al.*, 1991 b)

IMPLICACIONES DE CAMBIO DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO EN EL BALANCE HÍDRICO

El CCVUS tiene importantes implicaciones en las condiciones hidrológicas del terreno o de la cuenca. El CCVUS pueden tener consecuencias hidrológicas a nivel local, regional y global, ya que altera los ciclos de agua y de calor, evapotranspiración, recarga de acuíferos, tasas de descarga de ríos, además de los contenidos de humedad en el suelo, los cuales están íntimamente ligados a la problemática del cambio global (Henderson-Sellers, 1984; Taniguchi, 1997; Public Advisory Forum, 1997; McGuffie *et al.*, 1998; VGrüsmarty *et al.*, 1998).

Se han publicado estudios sobre los efectos de los CCVUS en la producción anual de agua para diversas regiones; sin embargo, en muchos casos, éstos se evalúan en pequeñas cuencas experimentales. Los trabajos abordan temas tales como el cambio en los flujos de agua, cambios en la calidad del agua, modificación de la frecuencia de inundación, incremento en la erosión entre otros (Cuadro 1).

El efecto del aclareo ha sido analizado por Rotchaster (1970), Hilbert (1971), Ruprecht y Stoneman (1993), Cheng (1989), Bren y Papworth (1991) y Rosen (1984), Bosch y Hewlett (1982) quienes observan incrementos en la producción anual de agua después de la cosecha de árboles, arbustos, aclareo para agricultura, adelgazamiento del bosque y minería.

La intensificación de la agricultura involucra el drenaje de tierras, el uso de fertilizantes y pesticidas; estabular y reunir animales de granja o aves de corral representan otro cambio de uso de suelo, el cual puede tener impacto sobre la erosión del suelo y la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea (Calder, 1993).

Anteriormente, los humedales eran considerados de poco valor; la inversión en humedales significaba drenar y convertir a bosque, agricultura o industria. Más recientemente el valor de los humedales está comenzando a ser más apreciado. Los humedales tienen gran importancia en la preservación de la diversidad biológica, además tienen un alto valor estético y de recreación, así como en el mantenimiento de pesquerías y productos silvestres. El humedal cumple un papel hidrológico de control de inundaciones, estabilización de línea de costa y de purificación del agua. Lo anterior ha impulsado las políticas de conservación y protección de humedales en el mundo (RAMSAR, 1999). La urbanización es otro cambio en el uso del suelo con importantes efectos hidrológicos (Calder, 1993).

El resultado de los análisis experimentales es de gran utilidad en la construcción de modelos hidrológicos aplicables en cuencas no experimentales a nivel regional. En general los trabajos regionales aplican modelos de estimación de componentes del balance hídrico. La escorrentía puede estimarse aplicando el modelo de Número de Curva (USDA, 1986), la evapotranspiración potencial a partir del modelo de Thornthwaite (1948), evapotranspiración real a partir de Thornthwaite y Matter (1955). También son útiles los modelos basados en regresiones estadísticas para estimar parámetros a partir las características físicas de las cuencas y datos de estaciones de aforo (véase Xu, 1999).

Cuadro 1. Resumen de los principales efectos hidrológicos del cambio de uso de suelo. Tomado de Calder (1993).

Cambio del Uso de Suelo	Componente afectado	Principales procesos hidrológicos involucrados	Escala geográfica probable de magnitud del efecto
Reforestación (la deforestación irradia, excepto cuando el cambio por el bosque impone la imposibilidad)	Flujo anual	<p>El intercepto de la línea de la precipitación que cae sobre la superficie del suelo y se infiltra en las raíces de las plantas profundas.</p> <p>Los flujos de agua de nube (niebla o neblina) incrementan la tación seca.</p>	<p>La magnitud del efecto depende de la cobertura forestal; puede ser de 10% a 30% de incremento en la cobertura forestal.</p>
Inundación	Flujo estacional	<p>La recepción de la precipitación al caer una gran cantidad de agua sobre la superficie del suelo y la infiltración de la misma en el subsuelo.</p> <p>Actividades de construcción de caminos, todo tipo de obras.</p>	<p>La escala de cuenca; el efecto es generalmente pequeño, sin embargo es muy grande a causa de pequeños eventos de tormenta.</p>
Calentamiento	Erosión	<p>La deposición de la mayoría de los nutrientes es menor en la superficie y reduce la resistencia aerodinámica.</p> <p>Las tasas de erosión que son naturales y mixtas reducen la erosión.</p>	<p>La escala de cuenca; variable pero el efecto es generalmente pequeño, sin embargo es muy grande a causa de pequeños eventos de tormenta.</p>

5. Resumen de los principales efectos hidrológicos de los tipos de uso de la tierra. Tomado de Calder (1973). Continúa.

Categoría	Efecto	Descripción	Consecuencia
Cambio de uso del suelo	Principal proceso hidrológico involucrado	La erosión eólica y el agua por ríos y cultivos reducen la erosión.	Reducción de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Erosión de suelos por espendimiento de nutrientes por salinidad o sequía.	Actuación de magisterio, drenaje, construcción de caminos, corte de árboles, incrementan la erosión.	Reducción de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Clima	Incremento de la evaporación y reducción del calor sensible.	Aumento de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Organización del agua	La deforestación de las riberas impide el transporte de sedimentos por el drenaje.	Aumento de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Cantidad de fertilizantes	Aplicación de fertilizantes orgánicos.	Aumento de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Erosión	La erosión no selectiva y persistente de pesticidas preserva los riesgos para la vida humana y animal.	Aumento de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Erosión	Cultivo o sin medidas apropiadas de suelo y el pastoreo no controlado incrementa la erosión.	Aumento de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Erosión	La agricultura sin medidas adecuadas de conservación de suelos y el pastoreo controlado sobre laderas inclinadas incrementa la erosión.	Aumento de la erosión.
Cambio de uso del suelo	Flujo estacional	Pantanos de turba en áreas altas y ciénegas y tienen pequeños efectos en la conservación de flujos de estación seca.	Aumento de la erosión.

Cuadro 1. Resumen de los principales efectos hídricos del cambio de uso de suelo. Tomado de Calder (1993). Continuación.

Cambio del Uso de Suelo	Componente afectado	Principal efecto o hidrológico involucrado	Escala y probable del efecto
		El flujo de salida de un sistema de drenaje conducirá al incremento de flujo de terreno seca.	Escala de cuenca; el efecto puede ser de largo plazo.
		El descenso del agua freática puede causar déficit de humedad en el suelo y reducir la transpiración	Escala de largo plazo; el efecto puede ser de largo plazo
	Flujo anual	El desagüe inicial seguido por drenaje incrementará los flujos anuales.	Escala de cuenca; el efecto puede ser de años hasta décadas.
		La deforestación seguida por drenaje incrementará los flujos anuales.	Escala de cuenca; efectos relativos a la reforestación.
	Inundación	Método de drenaje, tipo de drenaje, mejoramiento del drenaje, todos afectan la recarga de agua.	Escala de cuenca; reducción de picos de descarga.
	Cantidad de agua	Los cambios de reducción son alterados por la cobertura vegetal, acidificación del suelo.	Escala de cuenca; incremento de la acidez.
		Los temas de drenaje que interceptan horizontes minerales se reducen la acidez.	Escala de cuenca; reducción de la acidez.

Algunos trabajos analizan las implicaciones hidrológicas del CCVUS a nivel regional; estos trabajos abordan, principalmente, modificaciones en la evapotranspiración, tasa de pérdida de suelos y nutrientes, así como de la calidad de agua en cuencas de 200 a 1,000 km² (por ejemplo, Lorup, *et al*, 1998; Elkaduwa y Sakhivadivel, 1998; Wonal y Burt, 1999; Jain[^] Raí y Sharma, 2000; Carlson, y Traci, 2000).

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES FINALES

En general los trabajos que analizan el comportamiento hidrológico en función del CCVUS se realizan en cuencas experimentales y aforadas, especialmente con un acercamiento de cuencas pareadas. Existen algunos trabajos con relación al análisis de las implicaciones hidrológicas del cambio de cobertura vegetal a nivel regional

El efecto hidrológico del cambio de uso de suelo puede estimarse por la síntesis de datos provenientes de experimentos de campo (empirismo) o por consideraciones teóricas; ambos métodos tienen sus ventajas. Dentro del primer caso, podemos mencionar, el efecto de un cambio de uso de suelo en particular, que bajo un conjunto de condiciones ambientales es medido experimentalmente. En estos casos las observaciones pueden ser utilizadas para predecir el efecto del mismo tipo de cambio de uso de suelo en otra localidad donde las condiciones son similares - esta es la filosofía de la mayoría de los estudios de cuencas experimentales,

La integración de modelos hidrológicos convencionales, el análisis de documentos aeroespaciales y el uso de tecnologías de percepción remota y sistemas de información geográfica, permiten el modelamiento de los datos bajo un marco espacial que facilita el entendimiento de las condiciones hidrológicas de grandes cuencas y permite evaluar la disponibilidad y distribución del agua (estas necesidades de información son comunes en los países subdesarrollados). Este enfoque facilita el entendimiento de los efectos del deterioro y cambios en la cubierta vegetal sobre los componentes del balance hídrico en cuencas no experimentales. Este conocimiento es la base para la formación de planes de manejo y conservación de cuencas, y para identificar áreas prioritarias que requieren rehabilitación.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo* el cual se realizó en la UNAM-Campus Morelia. El primer autor agradece las becas de doctorado proporcionadas por el CONACyT y la UNAM.

REFERENCIAS

- Anderson, J.R., E.E. Hardy, J.T. Roach y R.E. Witmer¹, 1976., *A land use and land cover classification system for use with remote sensing data*. Geological Survey Professional Paper 964: 28 pp.
- Arnell, N.W., 1999., A simple water balance model for simulation of streamflow over large geographic domain., *Journal of Hydrology*, 217: 314 - 335
- BACH (Biosphere Aspects of the Hydrological Cycle), 1993, *Biosphere Aspects of the Hydrological Cycle. The Operational Plan. Reporte No., 27*, Institut für Meteorologie, Freie Universität, Berlin: 103 p.,
- Boceo, G. y C.R. Vaénzuela, 1988, Integrating GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS, *ITC Journal*: 309 - 319.
- Boceo, G., 1998 *La cuestión espacial en la investigación socioambiental*. Seminario Interno del Departamento de Ecología de los Recursos Naturales. Instituto de Ecología-UNAM, Campus Morelia: 5 p.,
- Boceo, G., H.A.M. de Brouwet, y F., Katanga, 1991a, *Modelling water resources and water demand in semi-arid areas: data integration and analysis using a Geographic Information System, Samburu District, northwestern Kenya*, ITC-UNESCO internal Report prepared for the UNESCO-ITC Programme, Enschede, The Netherlands.,
- Boceo, G., J.L., Palacio y G.R. Vaénzuela, 1991b. Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica, *Ciencia y Desarrollo* 17 (97): 19 - 88
- Bosch, J.M. y J.D. Hewlett, 1982 A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Bren, L.J. y M. Papworth, 1991., Early water yield effects of conversion of slopes of a Eucalypt forest catchment to radiata pine plantation., *Water Resources Research* 27: 2421-2428.,
- Burke D. E. Meyers, R. Tiner y H. Groman, 1988 *Protecting nontidal wetlands*. America Planning Association Advisory Service, report No. 412/413. Chicago.,
- Caldwell, I. R., 1993. Hydrologic effects of land use change., In: Maidment D. R. (ed), 1993. *Handbook of Hydrology*. New York.
- Carlson, T.N., S. Traci A., 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.
- Chaine, J. y P.H. Stone, 1975., Drought in the Sahara: a biogeophysical feedback mechanism. *Science* 187: 434-435.
- Cheng, ID., 1989., Streamflow changes after clear-cut logging of a pine beetle-infested watershed in Southern British Columbia; Canada., *Water Resources Research* 25: 449-456.,

- Chilar I. y L.I. Tansen, 2001. From land cover to land use: A methodology for efficient land use mapping over large areas. *Professional Geographer*, 53 (2): 275-289
- Detwiler, R.P., 1986., Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry* 2: 67-94.
- Dzurik, A. 1990. *Water resources planning*. Rowman and Littlefield Publishers, Savage.
- Elkaduwa, W.K.B. y R. Sakthivadivel, 1998. *Use of historical data as a decision support tool in watershed management: A case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka* Report 26, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute,
- Fahsi, A, P Tsegaye, W Tadesse y Coleman, 2000, Incorporation of digital elevation models with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy. *Forest Ecology and Management* 128 (1-2): 57-64 pp.
- FAO, 1995, Forest resources assessment, 1990, *FAO forestry paper 124*, Roma: 44 p,
- Gosselink, J., y R. Turner, 1978., The role of hydrology in fresh water wetlands Ecosystems., In: Good, R., D, Whingham y R., Simpson (eds.) *Freshwater wetland; ecological processes and management potential* Academic Press, New York.
- Goudie, A, 1989, The changing human impact, In: Friday, L, y R, Laskev (eds), *The Fragile Environment* Cambridge University Press, New York: 1-21.,
- Goudie, A, 1990. The human impact of the nature environment The MIT Press, Cambridge, M.A.
- Harbor, J., 1994, A practical method for estimating the of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology, *Journal of the American Planning Association* 60 (1): 95-108.
- Harris R., 1985, Satellite remote sensing: low spatial resolution., *Progress in Physical Geography* 9 (4): 601-606.
- Henderson-Sellers, A., 1984., Possible climatic impact of land cover transformation, with a particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic Change* 6: 231-257,
- Hilbert, A.R., 1971., Increase in streamflow after converting chaparral to grass, *Water Resources Research* 7: 71-80.
- 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. *Caleña* 4:263-278,
- Kummer, D.M., y B.X. Turner II, 1994., The human causes of deforestation in Southeast Asia. *BioScience* 44, 5: 323-328.
- Lambin, E.F., 1997, Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21 (3): 375-393.

Lorup, J. K., Refsgaard, I. C. y Mazvimavi, D, 1998, Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe., *Journal of Hydrology* (205) 3-4: 147-163

Mas, I.F. e I. Ramírez Ramírez, 1996, Mejoramiento de las clasificaciones espectrales de cubiertas del suelo por medio de un sistema de información geográfica., *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, número especial*: 111-122 pp.

McGuffie, K., A Henderson-Sellers y H. Zhang, 1998, Modelling climate impacts of future rainforest destruction. En: Maloney, B. K., (editor) *Human Activities and the Tropical Rainforest*. Kluwer Academic Publisher. Netherlands

Mendoza, M.E., López-Granados, E. y G. Boceo, 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: 266 pp.

Mitsch W y I. Gosselink, 1986., *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Ojima, D.D., K.A. Galvin y B.L. Turner II 1994., The global impact of land use change *BioScience* (44) 5: 300-348.

Palma, M., (en preparación), Uso de sensores y algoritmos de clasificación en áreas intertropicales.

Pórtela, R. y I. Rademacher, 2001., A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. *Biological Modelling*, 143 (1-2): 115-146

Public Advisory Forum, 1997, Climate change and water balance *Journal of American water works association* 89 (11): 107-109.

Quezada, C. y I. Jiménez, 1988., Watershed management and a wetland conservation strategy: the need for a cross-sectorial approach., In: Hook, D. (ed), *The Ecological Management of Wetlands (volumen 2)*, London. Croom Helm.

RAMSAR, 1999, Strategic Framework and guidelines for the future development of the List of Wetlands of International Importance of the Convention on Wetlands, *1st Meeting of the Conference of the Contracting Parties to the Convention on Wetlands*. (Ramsar, Irán, 1971). San José, Costa Rica,

Rao, K.S. y R. Pant, 2001, Land use dynamics and landscape change pattern in a typical micro watershed in the mid elevation zone of central Himalaya, India., *Agricultura, Ecosystems and Environment* 86 (2): 113-124.

Robinson, A.M., 1976. The effects of urbanization on stream channel morphology, *Proceedings of the National Symposium on Urban Hydrology, hydraulics and sediment control*: B27-B39

- Rosen, K., 1984., Effect of clear-felling runoff in two small watersheds in central Sweden, *Forest Ecology and Management* 9: 267-281.
- Rotchaster, I., 1970., Increase in water yield following clear-cut logging in the Pacific Northwest. *Water Resource Research* 6: 653-658.
- Ruprecht, J.K. y G.L. Stoneman, 1993, Water yield issues in the rain forest of southwestern Australia. *Journal of Hydrology* 150: 369-392.
- Sahagian, D., 2000: Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations, sea level and water redistribution, *Global and Planetary Change* 25: 39-48.,
- Savini, I. y X. Kammerer, 1961, Urban growth and the water regime. *US. Geological Survey, Water Supply Paper, 1591 A.*
- Skole, D.L., H. Chomentowski, W.A. Salas y A.D. Nobre, 1994 Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia, *BioScience* (44), 5: 314-322.
- Stapanian, M A, Cassell, D.L, y Cline, S P, 1997 Regional patterns of local diversity of trees: associations with anthropogenic disturbance, *Forest Ecology and Management*, 93 (1-2): 33-44,
- Taniguchi, M. 1997., Subsurface water responses to land cover/land use changes: an overview, In: Taniguchi, M (Editor) 1997 *Subsurface hydrological responses to land cover and land use changes*. Kluwer Academic Publishers. USA: 226 p,
- Thornthwaite, G.W. y J.R. Mather, 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the Water Balance., *Publications in Climatology* 10, (3), Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- Turner, B.L., R.H. Moss y D.I., Skoie, 1993 *Relating land use and global land cover change: a proposal for an IGBP-HDP core project* Global Change IGBP No 24, HDP report No., 5,
- USDA, 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Conservation Engineering Division Technical Release 55..
- Valenzuela, C.R., 1991. *Introduction to Geographic Information Systems*. ITC, Enschede; The Netherlands.,
- Vórdsmarty C.X., B., Moore III, Grace A.L, M P, Gildea, J.M. Mellin, B.J. Paterson, E, B, Rastetter, P., A. Steudler, 1989., Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America. *Global Biogeochemical Cycles*, 3 (3): 241-265.,
- Vórdsmarty C.J., C, Li, J, Sun, S, Dai, 1998. Emerging impacts of anthropogenic change on global river systems: The Chinese example., En: Galloway, J. y J., Melillo (eds) *Asian Change in the Context of Global Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Watson, N y D. Wilcock, 2001 Preclassification as an Aid to the Improvement of Thematic and Spatial Accuracy in Land Cover Maps Derived from Satellite Imagery, *Remote Sensing of Environment* 75 (2): 267-278 pp.

Worrall, F., y T.P. Burt, 1999, The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models, *Journal of Hydrology* (221) 1-2: 75-90.

Xu, C.Y., 1999, Parameter estimation of a conceptual water balance model in ungauged catchments. *Water Resources Management*, 13(5): 353-368.

Zuñiga, M. De, 1992 *Mapping Topoclimates by integrating topographic, meteorological and land ecological data in a geographic information system. A case study of the Loam Sak area, north central Thailand*, PhD, Thesis University of Amsterdam-ITC, The Netherlands: 183 pp,



Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research

Manuel Mendoza^{a*}, Gerardo Bocco^{a/í} and Miguel Bravo^b

^aInstituto de Ecología, UNAM, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, CP. 58190, Colonia Ex-Hacienda San José de La Huerta, Morelia, Michoacán, México

^bCENAPROS-INIFAP, Km 18,5 Carretera Morelia-Aeropuerto, Alvaro Obregón, Michoacán, México

Abstract: Based on a review of research, the linkages between distributed hydrological modelling (DHM) remote sensing (RS) and geographical information system (GIS) techniques, coupled with geomorphological knowledge are discussed. While presenting characteristics of the models, techniques, and supporting analytical tools of geographical hydrology, the emphasis is on the estimation of hydrological variables. The first is limited to the spatialization and integration of low resolution meteorological data with hydrological models in a GIS environment. The second includes research in the calculation of precipitation, evapotranspiration, radiation, etc., from the digital analyses of remote sensing data, to feed either lumped or spatially distributed models. The third links the tools of GIS and RS with hydrological modelling; usually it makes intensive use of the tools of GIS for several scales of spatial modelling. The last group integrates GIS, RS and hydrological modelling supported by the delimitation and characterization of environmental units, generally to detailed and semi-detailed scales.

Key words: applied research, distributed hydrological modelling, GIS, RS.

*Author for correspondence: Tel., 52 43 222724; Fax, 52 43 222719; e-mail mmendoza@oikos.unam.mx

tPresent address: Instituto Nacional de Ecología (INE, Federal Government).

I Introduction

The hydrological cycle, the continuous process that describes the circulation and storage of water in the Earth (Maidment, 1993a), is influenced by humans from the local to the planetary scales (Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences, 1991). Land cover change, associated with the intensification of agriculture, cattle raising and urbanization, has had a profound influence on the hydrological processes in small watersheds and at the regional level (Sahagian, 2000),

The hydrological cycle regulates the natural variability of physical processes that impact the ecosystem (Elkaduwa and Sakthivadivel, 1998). Watershed management provides the conceptual and spatial frameworks allowing for the ecosystemic management of natural resources, which minimizes the effects of land cover change. At the moment, this conceptual framework seems to be the best option for the management and conservation of natural resources (Ersten, 1999; Jain *et al.*, 2000). However, hydrologists cannot quickly assess conditions at a regional watershed level if hydrological data are insufficient for this level of analysis (see Bergström and Giam, 1998). This problem is solved by quantifying hydrological processes in long periods (on the order of several years) or by simulating the hydrological processes (Bastiaanssen, 2000a)

Some of the data needs for these types of scientific studies and technical evaluations are (1) the assessment of water resources, (2) the quantification of the population in areas subjected to desertification and severe drought, and (3) the statistical analyses of the duration intensity, frequency and date of initiation of the droughts, among other phenomena (Sehmi and Kunzewicz, 1992). Moreover, population growth, level of economic development, climatic change, climatic variability and the current and future use of water for different human activities should be all considered. The purpose of this paper is to discuss current status in spatial prediction in hydrology as related to the estimation of hydrological processes particularly in areas where a shortage of hydrometeorological data exists. Emphasis will be on the integrated use of indirect methods: remote sensing, and geographical information system techniques and geomorphological knowledge

II Variable estimation in the absence or scarcity of numerical data

In developing countries, hydrological investigation is hindered by the shortage of reliable long-term data, which impedes the application of hydrological models (Chow, 1964; Chow *et al.*, 1964, 1988; Brooks *et al.*, 1992; Maidment, 1993a). In many regions, the hydrometeorological networks are not very dense, or are even nonexistent. The establishment and maintenance of stations is onerous, particularly the cost of equipment, its operation and the development of databases. Thus, the development of indirect methods to obtain data for description and prediction is needed. The establishment of networks, however, should be accomplished, because of their importance to validate models or to conduct practical watershed management (Olsson and Pilesjö, 1999; Bastiaanssen, 2000a, b).

Working under a nonconventional perspective using an indirect approach (i.e., without quantitative data), requires the recognition and the spatial distribution of the

biotic and abiotic components of the watersheds, as well as the spatial and temporal relationships between these factors under a geographical hydrology framework (see, among others, Schumm, 1964; Ward, 1979; Meijerink, 1996)

MI Models, techniques and tools in hydrological analyses

1 Hydrological models

A hydrological model can be defined as a simplification or abstraction of a natural system, such as water flows and their components, over a portion of terrain or a section of the vadose zone. Hydrological models can be physically based processes or conceptual (Bergström, 1991). Physically based models describe and represent a natural system mathematically. From a mathematical point of view, models can be empirical or theoretical, and further can be classified as stochastic or deterministic (Brooks *et al.*, 1992)

Additionally, lumped and distributed models exist, depending on the discretization scheme in the description of the basin characteristics (for example, spatial variability of the parameters or variables of input and/or output) (Meijerink *et al.*, 1994). For the application of spatially distributed models, the basin is regularly partitioned into a number of hydrological response units, subwatersheds or representative hillslopes (Kite and Kouwen, 1992; Kite, 1993; Bergström and Graham, 1998).

The construction of monthly models of precipitation runoff and water balance, are tools for water resource management. These models are useful in the prediction and generation of long-term runoff series. Also, they can be useful for the estimation of return periods of relatively infrequent hydrological events, such as droughts or floods (Xu and Vandewiele, 1994).

Hydrological modelling should meet two conditions: (1) the data for calibration should be available, (2) calibration should be simple. The last condition is critical, since few parameters should be used when the characteristics of the watershed are poorly known and should be estimated (Xu and Vandewiele, 1994).

When the relationships between the physical properties of the drainage basin (rocks, soils, land cover), and the hydrological responses are established, the hydrological behaviour of the watershed can be fairly predicted without directly measuring the processes. For practical considerations, it is not possible, and in many cases it is not necessary, to use all the physical characteristics of the watershed (Vandewiele *et al.*, 1991).

The development of predictive models based on a watershed's parameters depends on the use of regression analysis, including analysis of residuals, sensitive to periods of calibration and the evaluation of extrapolations. In particular, automatic calibration techniques are used for these models because they exclude subjective elements (Vandewiele *et al.*, 1992).

A model that integrates groundwater flow, surface runoff, streamflow, hydrometeorology, and physical characteristics of a watershed is known as a water balance (Thornton and Matter, 1955). This refers to the computation of the water input and output, and the energy in a watershed. The water balance can be formalized with the following equation:

$$P = I + ETA + Q + AHS + AA + FMA \quad (1)$$

where P is precipitation; I is interception; Q is runoff; ETA is evapotranspiration; AHS is soil moisture change; AA is aquifer change; and FMA is groundwater flow. The main input is the precipitation, and the output refers to the flows of water produced by evapotranspiration, groundwater recharge and runoff. The water balance can be calculated for a soil profile, a plot or a watershed. The method allows for the calculation of a continuous estimation of soil moisture, actual evapotranspiration, runoff and groundwater recharge from meteorological records and few observations of the soil and vegetation (Dunne and Leopold, 1978).

Dunne and Leopold (1978) and Brooks *et al* (1992) indicated that the water balance is relevant in water use planning, in predicting impacts on the hydrological cycle and in assessing the hydrological effects caused by environmental change (for instance, land cover change).

2 Lumped and spatially distributed models

Lumped models are the most common for the treatment of data in a watershed. In this case, every parameter and variable represents average values of each of the properties of the watershed (slope, soil and land cover, among others) without considering the watershed topology and its drainage network. A lumped model is an abstraction where the watershed is considered as a unit characterized by a reduced number of variables and parameters, whose averages can be derived empirically or physically (Maidment, 1993b). Lumped models have been frequently used in the description and analysis of precipitation-runoff relationships (Chow, 1964; Chow *et al*, 1988; Olsson and Pilesjö, 1999, among others).

The development of computational methods, geographical information systems (GIS) and remote sensing (RS) techniques have stimulated the construction of spatially distributed models since the 1970s (Rango, 1985; Stuebe and Johnson, 1990). A distributed model considers spatial variation in every parameter and variable for each point of the watershed. If a model presents this type of structure it is directly compatible with data produced by RS and GIS in grid cell format. In the vertical dimension, each cell may describe a depth in millimetres or be divided into a number of vertical cells (columns, for example). For each cell, water discharge toward the neighbouring cell is calculated according to the active hydrological process; thus the distribution of the water flow inside a basin is represented through maps (Olsson and Pilesjö, 1999).

Hydrologically distributed modelling in large regions is based on research of hydrological processes (Vennekei and Biuijinzeel, 1997). Therefore, macro-scale hydrological models can be executed repeatedly over wide geographical areas (Ainell, 1999).

Spatially distributed models have been used to evaluate hydrological conditions (runoff, infiltration, groundwater recharge), current vegetation conditions (density, quality) and climatic change in a number of geographical regions (Neilson, 1995; Najjar, 1999). In fact, distributed models can be applied to every class of hydrological problem, including predictions in ungauged watersheds (Refsgaard, 1996).

The number of variables and parameters of a distributed model is much larger than that of a lumped model for the same area. This generates difficulties in the parameterization, calibration and validation of the distributed model. One of the main criticisms

of these models is the modification of a great number of parameters during the calibration phase (Beven, 1996). Diverse options exist for the calibration and validation of models in gauged watersheds, and are discussed elsewhere (Rosso, 1994, Refsgaard and Stoim, 1996, Refsgaard, 1997).

In noninstrumented watersheds the validation of distributed models presents one of the biggest challenges in modelling processes. Some of the questions that can be formulated are: what types of measurements should be carried out in the watershed to evaluate the predictive capacity of a model, such as precipitation-runoff? Of these, which has a larger predictive capability in the evaluation of the model? The answer to these and other questions should be related to the purpose of the evaluation and the use of the predictions of the model, among other aspects.

IV Integration of models and tools

1 Contributions of GIS to hydrology

A GIS is designed to analyse data referenced to spatial or geographic coordinates and the corresponding nonspatial data (Bunough, 1986). Its main objective is to support and assist in making decisions for the management and conservation of natural resources (Valenzuela, 1991). In hydrology, GIS assists in hydrometeorological (quantitative) and thematic data analysis (rock, landform, soil and land cover) (Meijerink *et al*, 1994). Thus, map data can be coupled to numerical data and handled in relational databases.

Research on the integration of GIS with hydrological modelling began by the end of 1980s. The integration of technologies began slowly when GIS was used to execute thematic overlaying, and then information exploitation of the watershed to a computer program or statistical packages. These links evolved toward more robust and more complex schemes (Kopp, 1996; McDonell, 1996; Sui and Maggio, 1999).

For instance, Sui and Maggio (1999) pointed out that the integration of GIS and hydrological modelling consists of: (1) embedding GIS in hydrological modelling, this approach aims to place GIS functionalities in hydrological modelling packages; (2) embedding hydrological modelling in a GIS, in this approach certain hydrological modelling functions have been embedded in leading generic GIS software packages; (3) loose coupling, this approach usually involves a standard GIS package and hydrological/hydraulic modelling programs or statistical packages; (4) tight coupling, this one embeds certain hydrological models within a GIS via GIS macro or conventional programming (Figure 1).

The contributions of GIS deal with the integration and modelling of spatial data. In the case of very large areas, on the order of thousands to millions of square kilometres, generally semi-arid or tropical and poorly gauged, modelling has usually consisted of water balance calculations (Olivera, 1995; Maidment *et al*, 1995, 1996; Olivera *et al*, 1995; Beek, 1996; Reed, 1996; Maidment and Reed, 1997; Reed *et al*, 1997; Mendoza and Bocco, 2001). This is also the case for fairly gauged areas in the south of the United States of America (Olivera, 1996), and temperate, tropical and semi-arid regions that rely on large historical databases from hydrometeorological stations from gauges (Arnell, 1999); and in semi-arid areas with experimental databases (Seguin *et al*, 1989).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

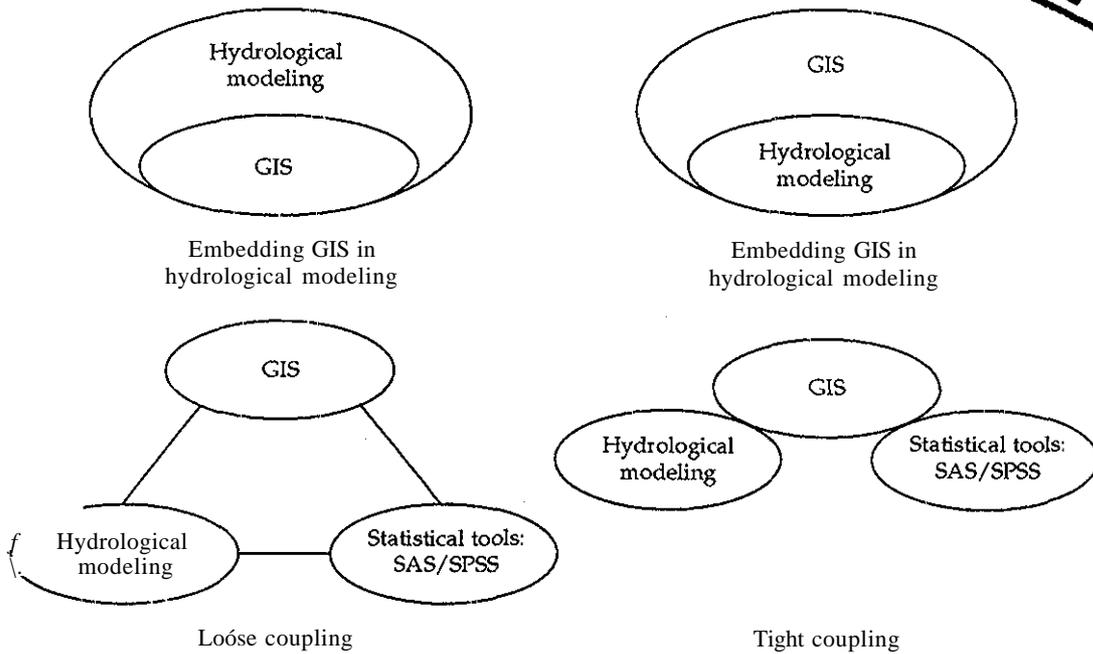


Figure 1 Integrating GIS with hydrological modelling, current practices

Source: reprinted from *Computer, Environmental and Urban Systems*, Vol. 23, Sui, DZ and Maggio, R.C., Integrating GIS with hydrological modelling, practicing problems, and prospects, 33-51 © 1999, with permission of Elsevier Science.

Digital elevation models (DEM) at different spatial resolutions are used to delimit the water divides, the drainage network and the runoff directions (Beek, 1996; Miller and Morriss, 1996; Olivera and Maidment, 1996; Müller-Wohlfeil *et al.*, 1996). Spatial modelling in GIS allows for the estimation and generation of the spatial distribution of hydrological parameters (such as slope gradient, form and aspect) using different interpolation techniques (kriging, trend surface analysis, moving average, among others).

Maidment (1996) developed a ten-step procedure for hydrological modelling in GIS (Table 1). The first five steps are related to the definition of the spatial and temporal patterns, as well as the environmental description of the watershed. The description includes spatial models of the distribution of landform, soil, land-cover, subsurface hydrology precipitation data and runoff. The last five steps are related to the simulation of the hydrological balance in spatial units, the water flow and the transportation of elements among the units, as well as the effect of water utilization structures, such as dams and pumping systems.

2 Contributions of remote sensing to hydrology

Remote sensing provides observations of terrain and marine surfaces in the visible (VIS), thermal infrared (THI) and microwave portions of the spectrum. The instruments

Table 1 Procedure for hydrological modelling in GIS

1	Study design: objectives and scope of study; spatial and time domain; process models needed, variables to be computed
2	Terrain analysis: deriving a watershed and stream network layout from digital elevation data and mapped streams
3	Land surface: describing soils, land cover, land use, cities and roads
4	Subsurface: hydrogeologic description of aquifers
5	Hydrologic data: locating point gauges, attaching time series and their average values, interpolating point climatic data onto grids
6	Soil water balance: partitioning precipitation into evaporation, groundwater recharge and surface runoff; partitioning of chemicals applied to the land surface
7	Water flow: movement of water through the landscape in streams and aquifers. Computing streamflow and groundwater flow rates
8	Constituent transport: transport of sediment and contaminants in water as it flows. Computing concentrations and loadings
9	Impact of water utilisation: locating reservoirs, water withdrawals and discharges in rivers, and aquifer pumping, Their effects on water flow and constituent transport
10	Presentation of results: developing visual and tabular presentation of the study results. Use of Internet and CD-ROM to transmit results

Source: Maidment, 1996

are either satellite-borne or air-borne, Data commonly extracted from these documents are biomass, land-cover and land use, landform, soils, and rocks types (Lillesand and Kiefer, 1987; Baret *et al.*, 1990; Sabins, 1997).

The relationships between precipitation, temperature, soil moisture, infiltration, runoff and evapotranspiration can be derived using spatially distributed modelling, and a regional water balance can be estimated, Table 2 presents the general characteristics of remote sensors that are commonly used to estimate hydrologically relevant variables.

Most of the advances in the use of RS in hydrology have arisen when trying to answer questions in areas where existing hydrological methods were not satisfactory, and where the data necessary for the analysis were scarce or nonexistent (Engman, 1996). RS is transitional from a descriptive tool to a quantitative technology that provides spatial information (Baumgartner and Apfl, 1996).

The integration of RS and hydrology allows for the estimation of variables needed to compute a water balance (such as precipitation, surface temperature, evapotranspiration and soil moisture) from the transformation of digital data in the visible, infrared and thermal bands. These data are usually obtained from very low resolution satellite sources (3x3 or 5x5 km per pixel, GOES and Meteosat); low resolution satellite sources (1 km², AVHRR); and high resolution satellite sources (from 20 x 20 to 120 x 120 m, SPOT and Landsat, respectively) (Table 3).

Remote sensing for hydrological modelling adopts one of three categories (Salomonson, 1983). The simplest is the use of satellite images to identify objects of interest, such as alluvial fans or water bodies. The second is related to obtaining land-cover data, geologic or geomorphologic features, through the interpretation and classification of remote sensing data; whereas the third level involves the use of digital data

Table 2 General characteristics of the more common satellite instruments

Sensor	Spatial resolution	Temporal resolution	Geographical coverage	Visible wavelength (µm)	Principal uses
METEOSAT	3-5 km per side	10 min	Global, in the order of tens of thousands of km ² per orbital configuration	0.5-0.9 0.5-1.2	Precipitation estimate
NOAA	3-5 km per side	1 h	Global, in the order of tens of thousands of km ² per orbital configuration	0.55-0.72 0.5-1.2	Estimation of cloud cover, precipitation
SPOT	1.1 x 1.1 km	Twice a day	Generally in the order of thousands of km ² wide regions scale	0.58-0.72 0.7-1.0 3.5-3.9 3.5-3.9 10.50-11.50 11.5-12.9	Soil moisture content, surface temperature, cloud cover
Landsat MSS	80 x 80 m	18 days	Regionally in the order of thousands of km ² regional scale	0.5-0.6 0.6-0.7 0.7-0.8 0.8-1.1	Deforestation, soil cover
Landsat TM	30 x 30 m	16 days	Global, in the order of hundreds of km ² regional scale	0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90 1.55-1.75 10.40-12.50 20.8-2.35	Limitation of vegetation cover, soil moisture, impervious surface, extension of water bodies
ERSAT	20 x 20 m	2 days	Global, in the order of km ² regional scale	0.5 > 0.9 0.6 > 0.38 0.7 > 0.9 0.5 > 0.3	Elimination of vegetation cover, soil moisture, impervious surface

Source: Jensen, 1986; Lillestøl, Kjaer, 1987; Sørensen, 1987; Barret and Curtis, 1999.

Table 3 Spatial hydrological modelling in temperate and semi-arid areas

Estimate parameter	Sensor	Geographical location	Source
Precipitation	METEOSAT	África	Pietroniro <i>etal</i> , 1989 D'Souza, 1990
	GOES AVHRR	Los Angeles, USA	Scofield, 1985 Dousset, 1989
Net radiation	AVHRR	Nebraska, USA	Goodin, 1995
Surface temperature	AVHRR	Sahel, África	Caselles <i>efa</i> , 1997 Coll <i>etal</i> , 1994 Ottlé and Vidal-Madjar, 1992 Seguin, 1996
		Southern África	Richard and Pocard, 1998
		India	Cupta <i>etal</i> ., 1997
	Landsat TM	Scotland	Collier <i>etal</i> ., 1989
		Europe	Roy, 1997
		Sahel, África	Andersen, 1997
Vegetation-Land cover/use	AVHRR	China	Hasegawa <i>etal</i> ., 1998
		Argentina	Di Bella <i>etal</i> , 2000
	Landsat MSS	Japan	Hashiba <i>etal</i> ., 2000
	Landsat TM	North centre Thailand	Zuviria, 1992
	SPOT	Japan	Hashiba <i>etal</i> , 2000
Evapotranspiration	AVHRR	México	Boceo <i>etai</i> , 1991
		Southern Australia	Prata, 1990;
	Turkey	Bastiaanssen <i>etal</i> ., 1998; Bastiaanssen, 2000b.	
	AVHRR	La Mancha, Spain	Caselles <i>etal</i> ., 1992
	Landsat TM	Western USA	Laymon <i>etal</i> , 1998
Soil moisture	AVHRR	West India	Narasimha <i>etal</i> ., 1993

to estimate hydrological parameters directly. This latter level is achieved through the correlation of RS data with well-known hydrological field data. All these levels have been used successfully, particularly when appropriate data are created to execute hydrological models (Kite and Pietroniro, 1996).

The main advantage of RS is its ability to provide spatially distributed data instead of point data. It has also the potential to provide measurements of hydrological variables usually not available through traditional techniques (such as soil moisture); in addition, RS may provide a significant amount of long-term data in inaccessible regions (Engman, 1996).

The correct estimation of the spatial distribution of precipitation is the basis for the computation of a water balance. Since the 1970s, several methods have been developed

for the calculation of precipitation; these evaluate the physical characteristics of the clouds as depicted in a satellite image. Digital techniques are based on electromagnetic spectrum analyses, particularly in the MW, VIS and THI regions. However, none of these techniques provide a direct measure of the quantity of precipitation, but they can provide indications of the probable precipitation in a particular condition (Bonifacio, 1991; Petty and Krajewski, 1996; Kite and Pietoni, 1996).

One of the first techniques is the Manual Technique of Rain Monitoring by Satellite (the Bristol Method; Barret, 1970; Banet *et al.*, 1990). This technique is based on the interpreter's expert knowledge of high quality satellite images. Later, adjustments were made on the basis of climatological and land parameters; finally results are calibrated with meteorological conditions, when available precipitation is estimated through local regressions.

Another technique is BIAS (Bristol/NOAA Interactive Scheme). This technique works at the pixel level. The transformation of the cloud/duration index for precipitation estimation is carried out through global regressions, which are applicable to new study areas. This method has been particularly successful when used as an outline for interpolation between pluviometers and when it is applied to events of synoptic precipitation over very large areas (Bonifacio, 1991).

Petty (1995) and Petty and Krajewski (1996) analysed in depth the current techniques for precipitation estimation on the basis of satellite data, while Foufoula-Georgiou and Krajewski (1995) reviewed the advances in precipitation modelling. They focused on algorithms relevant for surface hydrological modelling. They concluded that the precipitation estimates based on VIS/infrared, in general, overestimate the actual precipitation locally, but are useful at regional scales, where weekly and monthly averages of precipitation (of the convective type) can be calculated.

Temperature estimation was applied to measurements from very high resolution sensors of the National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) and the Aeronautic and Space Administration (NASA) (Czajkowski *et al.*, 1998). The accurate estimation of surface temperature is an important requirement for global or regional monitoring of the water balance, energy and solar radiation. The estimation of surface temperature involves the corrections because of atmospheric effects and surface emissivity (Andersen, 1997; Pozo-Vázquez *et al.*, 1997); and error owing to sparse vegetation cover (Chehbouni, 1997).

In addition, there is a need to determine the uncertainty involved in aggregating, remotely-sensed variables (surface temperature (T_s) and reflectance (p)) and surface energy flows (sensible (H) and latent heat flows (XE)) over large areas. This uncertainty is directly related to two factors: (1) the nonlinearity of the relationship between the sensor signal and T_s , p , H or XE ; and (2) the heterogeneity of the study site. The results emphasize the necessity of being careful in the aggregation of the components of the energy balance in heterogeneous landscapes with scarce or mixed vegetation (Moran *et al.*, 1997).

Usually, the estimation of surface temperature is carried out through digital analysis of thermal bands from AVHRR or Landsat images. Although AVHRR images have advantages in environmental modelling (Belward, 1992), especially at regional levels, the main limitation is their low spatial resolution. The limitation of Landsat images is in their temporal resolution (16 days) (Table 2).

Other algorithms have been developed to estimate surface temperature; for example,

from the transformation of the values of the Normalized Vegetation Index (NDVI) (Ken *et al.*, 1992; Hope and McDowell, 1992), The NDVI can be derived of low resolution (NOAA-AVHRR) and medium to high resolution (Landsat TM and SPOT) images. Local estimations of surface temperature have been successfully computed from SPOT and Landsat data. The main advantage of the NDVI to calculate surface temperature resides in the substitution of the emissivity, which should be otherwise estimated from ground data with radiosondes or radiometers (Pozo-Vázquez *et al.*, 1997),

Richard and Pocard (1998) found correlation indexes larger than 0,80 between the surface temperature and the NDVI derived from AVHRR images for South Africa. The spatial distribution of the average monthly NDVI agreed with the distribution of the average monthly precipitation for most of the area. The desert and semi-desert areas with precipitations lower than 300 mm per year, could not be predicted by this method. In addition, the results for areas with severely disturbed vegetation cover may be not reliable. The NDVI values will reflect the cover characteristics, but their transformation to surface temperatures may be incorrect,

Pozo-Vázquez *et al.* (1997) recognized that topography influences every hydrological process and land-atmosphere interactions, including radiation, air temperature, saturation deficit, wind, turbulence, cloudiness, precipitation, soil and vegetation properties. Consequently, the NDVI values should be corrected for topographical effects in order to be used in the estimation of surficial parameters. Thus, in slightly smooth topographies the surficial regional energy balance (spatial averages on several hillslopes) is not sensitive to topography (Raupach and Finnigan, 1997),. On the other hand, Burgess *et al.* (1995) pointed out that the topographical errors are larger than 13% when the resolution is higher (400 m² pixel size), while they decrease by approximately 10% when using low resolution images (1 km² pixel size),

To understand the atmosphere-surface interactions in a variety of spatial scales it is necessary to estimate the net radiation from spatial data (Goodin, 1995),. In this respect, algorithms have been developed to work on Landsat TM data, although they can be modified for use with NOAA-AVHRR images,

The evaporation in water bodies can also be estimated using RS data. Firstly, the area of the water body should be measured,. The estimate is based on the idea that the radiation of 0.85 μm is more strongly attenuated in water than that of 0.68 μm ,. On the contrary, on the land surface, the absorption by vegetation is longer at 0,68 μm than at 0,85 μm . This procedure has been used to broadly define water bodies with AVHRR data (Schneider *et al.*, 1985). The surface temperature is estimated with thermal data and with the support of existent of estimated bathymetry, the evaporation rate of the water body can be computed,

The monitoring of evapotranspiration has important implications in regional and global modelling of climate and hydrological cycles, as well as stress evaluation of natural and agricultural ecosystems (Kustas and Norman, 1995). Evapotranspiration is a very important parameter in agricultural production models for determining soil moisture and detecting stress in crops (Seguin *et al.*, 1989; Caselles *et al.*, 1992). Evapotranspiration can be estimated from the thermal bands of AVHRR or from Landsat TM (band 6),. The algorithms require radiation data measured in the field,

The methods used in the estimation of evapotranspiration vary from statistical/semi-empirical approaches, to physically based estimations, recently numeric modelling has been used to simulate heat flow and water flow through soil, vegetation and

atmosphere (Kustas and Norman, 1995; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Bastiaanssen, 2000b)

Statistical approaches are also used to estimate and monitor evapotranspiration. Regression analysis between the evapotranspiration (calculated from meteorological stations) and the spatial distribution of the NDVI obtained from satellite images (for example, AVHRR) is carried out. This approach has been used successfully to estimate evapotranspiration in Argentina (Di Bèja *et al.*, 2000).

Soil moisture, highly variable in space and time, can also be estimated from RS data. The best estimations are carried out using data from the microwave portion of the spectrum (Jackson *et al.*, 1996; Houser *et al.*, 1998). It is assumed that many hydrological processes, such as soil moisture, display a unique signature that is detectable with microwave remote sensors (Engman, 1997). Other experiments in India, however, have shown that in small watersheds, soil moisture was successfully estimated using thermal and infrared bands of AVHRR (Narasimha *et al.*, 1993; Capehart and Carlson, 1997).

3 Contributions of geomorphology to hydrology

Geomorphology and land classification allows for the characterization of the hydrological conditions of a given region (Verstappen, 1983; Schumann *et al.*, 2000). Geomorphologic, pedologic and land cover mapping attempt to generate concise and systematic information on landforms, geomorphological processes, the structure and composition of soils, and vegetation dynamics, as well as of the related natural phenomena (Zonneveld, 1979; Meijerink, 1988; Zinck, 1988). Thus, maps are not only scientific documents in themselves, but are also valuable tools in the evaluation and management of natural resources (Boceo *et al.*, 2001). The method assumes that landforms originate and develop as natural systems. Therefore, every unit has an ecological function distributed in space.

Geomorphology enriches applied hydrological modelling by segmenting the terrain from the view point of slope and land characteristics. Units thus defined have potentially similar hydrological responses to precipitation. Consequently, a robust model describing the spatial distribution of hydrological processes may be built, formulated on the basis of a limited number of measurements, and some data from hydrometeorological stations. The integration of the delimitation of the relatively homogeneous units and the hydrological modelling constitutes a frequently used approach in developing countries to estimate the water balance. The estimation of the water balance, or some of its components, varies with the availability of point data (precipitation, temperature, soil moisture, etc.). Such an approach has been used in Kenya (Boceo *et al.*, 1991); Sudan (Osman, 1996); Thailand (Zuviría, 1992); Indonesia (Meijerink *et al.*, 1994); Bolivia (Beek, 1996); and Puerto Rico (Cruise and Miller, 1994).

4 The integration of techniques for applied research

Integration of GIS and RS has been widely used for spatial modelling in developing countries (Fereña and Tateishi, 1995). The integration of these tools is helpful at the regional planning level. The digital analyses and GIS procedures provide data integration and map production for the evaluation of surficial and underground water resources (Allewijn, 1988; Thunnissen *et al.*, 1992; Sharma and Anjaneyulu, 1993). They

have also been used in the prediction of soil loss in agricultural basins of arid zones in India (Sharma and Singh, 1995). RS data effectively integrated with GIS provide measurements of hydrological mapping, monitoring and modelling, especially in large regions (Baumgartner and Apfl, 1996).

The integration of spatial databases with spatial modelling and statistical analyses has proven its efficiency in the construction of descriptive and explanatory models of gully development (Palacio, 1989; Boceo, 1990; Vázquez-Selem, 1992), urban growth (López *et al.*, 2001), aquifer recharge (Meijerink, 1996; Vekeidy, 1996; Naiyana *et al.*, 1996), nonpoint pollution sources (Oliveira, 1996; Lobo, 1996), spatially distributed water balance (Meijerink, 1974; Boceo *et al.*, 1991; Osman, 1996), for the improvement of land evaluation techniques in agriculture (Zuñiga, 1992), and for the rapid evaluation of the spatial implications of land cover change in runoff modelling (Sado and Islam, 1996; Grove and Harboi, 1997; Bhaduri *et al.*, 1997; Mendoza and Boceo, 2001).

The review presented here allowed for the recognition of four groups in which the integration of models and tools in spatially distributed hydrological studies is used:

- 1, Those that integrate hydrological modelling and geographic information systems, GIS);
- 2, Those that integrate hydrological modelling and remote sensing;
- 3, Those that integrate hydrological modelling, RS and GIS;
- 4 Those that integrate geomorphological knowledge, RS and GIS with hydrological modelling,

The first is limited to the spatialization and integration of low resolution meteorological data with hydrological models in a GIS environment. The second includes research in the calculation of precipitation, evapotranspiration, radiation, etc, from the digital analyses of remote sensing data, to feed either lumped or spatially distributed models. The third links the tools of GIS and RS with hydrological modelling; usually it makes intensive use of the tools of GIS for several scales of spatial modelling. The last group integrates GIS, RS and hydrological modelling supported by the delimitation and characterization of environmental units, generally to detailed and semi-detailed scales.

V Conclusions

Integrated modelling represents an option for the understanding of hydrological behaviour and for its spatial-temporal modelling, specially for applied purposes. The models should have the capacity to work reasonably well in different regions and with different hydrological and environmental characteristics (Venneker and Schellekens, 1997). The integrated study of watersheds, focused on planning, engineering and environmental and water resource management, is based on the understanding of hydrological processes and their interactions. These processes generally exhibit temporal and spatial variability (Venneker and Bruijnzeel, 1997). The disadvantages with these forms of modelling are the great quantity of high resolution data and the high computing requirements. This model type also includes a significant number of parameters and variables that should be measured (Olsson and Piésjo, 1999).

Spatially distributed hydrological modelling represents an alternative to unde-

standing the hydrological behaviour at a regional scale in poorly gauged regions. This line of investigation is relatively scarce in the literature, rather developed to the application of models in gauged basins. The integration of conventional hydrological models and the analysis of remotely sensed data, and geographic information systems permits data modelling under a spatial framework that facilitates the understanding of the hydrological conditions of studied watersheds. Consequently, it facilitates the understanding of the effects of degradation and land cover changes on the components of the water balance in nonexperimental basins. This knowledge allows the formation of management and conservation plans of watersheds, as well as the identification of high-priority areas that require rehabilitation.

Acknowledgement

The investigations described were funded by CONACyT (Mexican National Research Council) through the SIMORELOS program (project regional planning and conservation of natural resources in the Cuitzeo Basin, Michoacán). The first author received a grant from CONACyT and DGEP-UNAM whilst undertaking his PhD, research, carried out in the UNAM. The manuscript was kindly revised by Erna López, Herguin Cuevas and Amy Hanger,

References

- Allewijn, R. 1988: Regional hydrological system analysis using remote sensing data and geographical information system, Application to groundwater modeling of the Roermod area, The Netherlands. *International Journal of Remote Sensing* 9(10), 1775-85.
- Andersen, H.S., 1997: Land surface temperature estimation based on NOAA-AVHRR data during the HAPEX-Sahel experiment *Journal of Hydrology* 188-89(1-4), 788-814
- Ainell, N., W. 1999: A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain *Journal of Hydrology* 217, 314-35
- Barret, E.C. 1970: The estimation of monthly rainfall from satellite data *Monograph of Weathering Review* 98, 322-27.
- Barret, E.C. and Cuitis, IR 1999: *Introduction to environmental remote sensing* Cheltenham: Stanley Thoinet,
- Banet, E.C., Powei, G.H. and Micallef, A., editors, 1990: *Satellite remote sensing for hydrology and water management. The Ae&iter ranean coast and islands* Switzerland: Gordon and Breach.
- 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 http://www.itc.nl/wres/basti_texthtml
- 2000b: SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey *Journal of Hydrology* 229,87-100
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, E, Roetink, G.J. and van der Wal, T. 1998: A remote sensing surface energy balance algorithm for land SEBAL; part 2, validation *Journal of Hydrology* 212-213(1-4), 213-29
- Baumgartner M.E. and Apfl, G.M. 1996: Remote sensing and geographic information systems. *International Journal of Remote Sensing* 41(4), 593-607,
- Beek, M.A. 1996: Drainage pattern analysis and extraction of hydrologic properties from digital elevation model. MSc. Thesis, Silsoe College, Cranfield University, UK,
- Belward, A.S. 1992: Spatial attributes of AVHRR imagery for environmental monitoring *Hydrological Sciences* 13(2), 193-209
- Bergström, S. 1991: Principles and confidence in hydrological modeling, *Nordic Hydrology* 22, 123-36,
- Bergström, S. and Giam, LE 1998: On the

- scale problem in hydrological modeling *Journal of Hydrology* 211,235-65.
- Bevef, K.J. 1996: A discussion of distributed modelling. In Refsgaard, J.C., and Abbott, M.B., editors, *Distributed hydrological modelling*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Bhadu B, Harbor, J, Engel, B. and Grove, M. 1997: Assessment of long-term, watershed scale hydrologic impacts of land use change using a GIS-NPS model. *Annual meeting; Abstracts with Programs - Geological Society of America GSA* Boulder CO: GSA.
- Boceo, G. 1990: Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems. A case of study in Central México Ph.D. Thesis, University of Amsterdam-ITC, The Netherlands
- Boceo, G., de Brouwer, H.A.M., and Katanga, F. 1991: *Modelling water resources and water demand in semi-arid areas, data integration and analysis using a Geographic Information System Samburu District, northwestern Kenya*, ITC internal report prepared for the UNESCO-ITC Programme, Enschede, The Netherlands.
- Boceo, G., Mendoza, M. and Velázquez, A. 2001: Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - A tool for land use planning in developing countries, *Geomorphology* 39(3-4), 211-19.
- Bonifacio, R. 1991: Rainfall estimation in Africa using remote sensing techniques. In Belward A, S and CR Valenzuela, editors, *Remote sensing and geographic information systems for resource management in developing countries* Dordrecht: Kluwer Academic,
- Brooks, K, Ffolliott, P.E, Gregersen, H.M. and Ihamnes, J, L, 1992: *Hydrology and the management of watersheds* Ames IA: Iowa University Press.
- Burgess, D.W., Lewis, P. and Muller, J.P.A.X. 1995: Topographic effects in AVHRR NDVI data *Remote Sensing of Environment* 54, 223-32
- Bunough, E.A.** 1986: *Principles of geographical information systems for land resources assessment* Oxford: Clarendon Press,
- Capehart, W.J. and Cailson, IN., 1997: Decoupling of surface and near-surface soil water content, a remote sensing perspective. *Water Resources Research* 33(6), 1383-95.
- Caselles, V., Delgado, J., Sobiino, J.A. and Hurtado, E. 1992: Evaluation of maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAA-AVHRR data *International Journal of Remote Sensing* 13(5), 939-46,
- Caselles, V., Coll, C. and Valor, E., 1997: Land surface emissivity and temperature determination in the whole HAPES-Sahel area from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 18,1009-27
- Chehbouni, A.G., Io-Seen, D, Njoku, R.G., Lhomme, J.P., Monteny, B.A. and Kerr, Y.H. 1997: Estimation of sensible heat flux over sparsely vegetated surfaces *Journal of Hydrology* 188-189, 855-68
- Chow, V.T.** 1964: *Handbook of hydrology A compendium of water-resources technology* New York: McGraw Hill
- Chow, V.T, Maidment, D.R. and Mays, T.W., 1988: *Applied hydrology* New York: McGraw-Hill.
- Coll, C, Caselles, V, Sobrino, A, and Valor, E, 1994: On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing* 15,105-22
- Collier, P., Runacres, A.M.E, and McCatchey, J. 1989: Mapping very low surface temperatures in the Scottish Highlands using NOAA-AVHRR data *International Journal of Remote Sensing* 10(9), 1519-29
- Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences 1991: *Opportunities in the hydrologic sciences* New York: National Academy Press.
- Ciuse, J.K. and Miller, R.L. 1994: Hydrologic modeling of land processes in Puerto Rico using remotely sensed data, *Water Resources Bulletin* 30(3), 419-28
- Czajkowski, K.P, Goward, S.N., and Ouadiari, H. 1998: Impact of AVHRR filter on surface temperature estimation from split window approach. *International Journal of Remote Sensing* 10(10), 2007-12
- Di Bella, C.M, Rebella, C.M. and Paútel, J.M, 2000: Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21(4), 791-97.
- Dousset, B. 1989: AVHRR-derived cloudiness and surface temperature patterns over the Los Angeles area and their relationships to land use. In *Quantitative remote sensing, an economic tool for the nineties*. Proceedings IGARSS'89, IEEE Vancouver BC: IEEE
- D'Souza, G. 1990: Mid- to long-term objective rainfall estimation techniques. In Barret, E.C, Powel, C.H. and Micallef, A., editors/ *Satellite remote sensing for hydrology and water management The Mediterranean coast and islands* Switzerland: Gordon and Breach
- Dunne, T. and Leopold, L.B. 1978: *Water in environmental planning* San Francisco: W.H. Freeman and Company.

- Elkaduwa, W.K.B. and Sakthivadivel, R, 1998: Use of historical data as a decision support tool in watershed management, A case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka, Report 26, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Engman, E.T. 1996: Remote sensing applications to hydrology, future impact *Hydrological Science Journal* 41(4), 637-47
- 1997: Soil moisture, the hydrologic interface between surface and ground waters. *Proceedings international symposium of fifth scientific assembly of the International Association of Hydrological Sciences* IAHS Publication 242, Rabat: IAHS
- Ersten, A.C.D. 1999: Ecohydrological impact-assessment modelling, an example for terrestrial ecosystems in Nord-Holland, the Netherlands *Environmental Modelling and Assessment* 4, 13-22.
- Foufoula-Georgio, E. and Krajewski, W.R 1995: Recent advances in rainfall modelling, estimation and forecasting In *Reviews of Geophysics, Supplement* US National Report to the International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994, 195-209
- Goodin, D.G. 1995: Evaluation of a combined modelling-remote sensing method for estimating net radiation in a wetland, a case in study in the Nebraska Sand Hills, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing* 16(8), 1481-94.
- Grove, M. and Haibor, J., 1997: Development and application of a GIS-based model for assessing the long-term hydrologic impacts of land-use change. In *Annual meeting. Abstracts with Programs - Geological Society GSA, Boulder CO: GSA*.
- Gupta, R.K., Prasad, S., Sessa Sai, M.V.R. and Viswanadham, T.S. 1997: The estimation of surface temperature over an agricultural area in the state of Haryana and Punjab, India, and its relationship with the Normalized Difference Vegetation Index NDVI, using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 18(18), 3729-41
- Hasegawa, I., Yasushi, M., Yasunori, N., and Shoji, I. 1998: Land cover analysis using multi seasonal NOAA AVHRR mosaicked images for hydrological applications. *Advances in Space Research* 22(5), 677-80.
- Hashiba, H., Kameda, K., Uesugi, S. and Iinaka, S. 2000: Land use change analysis of Tama River Basin with different spatial resolution sensor data by Landsat/MSS and IM. *Advances in Space Research* 26(7), 1069-73
- Hope, A.S. and McDowell, P.P., 1992: The relationship between surface temperature and spectral vegetation index of tallgrass prairie, effect of burning and other landscape controls. *International Journal of Remote Sensing* 13(15), 2849-63.
- Houser, P.R., Shuttleworth, W.J., Flamiglietti, J.S., Gupta, H.V., Syed, K.H., and Goodrich, D.C., 1998: Integration soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation *Water Resources Research* 34(12), 3405-20,
- Jackson, I.J., Schmugge, J., and Engman, E.T., 1996: Remote sensing applications to hydrology, soil moisture *International Journal of Remote Sensing* 41(4), 495-515
- Jain, A., Raf, S.C., and Sharma, E., 2000: Hydro-ecological analysis of a sacred lake watershed system in relation to land-use cover change from Sikkim Himalaya *Catena* 4, 263-78
- Jensen, J.R.**, 1986: *Introductory digital image processing A remote sensing perspective* Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall
- Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P. and Imbernon, J. 1992: Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved splitwindow *Remote Sensing of Environment* 41, 197-209
- Kite, G.W. 1993: Application of land class hydrological model to climatic change *Water Resources Research* 29(7), 2377-84,
- Kite, G.W., and Kouwen, N., 1992: Watershed modeling using land classification. *Water Resources Research* 28(12), 3193-200.
- Kite, G.W. and Pnëtoniro, A. 1996: Remote sensing applications in hydrological modeling. *Hydrological Science* 41(4), 563-91
- Kopp, S.M. 1996: Linking GIS and hydrological models, where we have been, where we are going? In Kovari, K. and H.P. Narchtnebel, editors *Application geographic information systems in hydrology and water resources management* IAHS Publication 235, Wallingford: IAHS
- Kustas, W.P., and Noiman, J.M. 1995: Use remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surface *International Journal of Remote Sensing* 41(4), 517-30
- Laymon, C., Quattrochi, D., Malek, E., Hipps, L., Boettinger, J. and McCuidy, G., 1998: Remotely-sensed regional-scale evapotranspiration of a semi-arid Great Basin desert and its relationship to geomorphology, soils and

- vegetation, *Geomorphology* 21, 329-49.
- Lillesand, E.M., and Kiefer, R.W., 1987: *Remote sensing and image interpretation* New York: John Wiley and Son.
- lolo, M.A. 1996: Integiation of remote sensing data and geogiaphic infoimation systems to implement the agicultural nonpoint source pollution AGNPS model MSc. Thesis, Murray State University, Murray, KY.
- López, E., Boceo, G, Mendoza, ME. and Duhau, E., 2001: Predicting land-coveí and land use change in the uiban fiinge A case in Morelia city, México *Landscape and Urban Planning* 55(4), 271-85.
- Maidment, DR, editor, 1993a. *Handbook of hydrology* New Yoik: McGraw Hill.
- 1993b GIS and hydrologic modeling. In Goodchild, M.F, Paiks, B O. and Steyaeit, L X, editors, *Environmental modeling with GIS* New Yoik: Oxford University Press.
- 1996: GIS and hydrologic modeling - an assessment of piogress. In *Proceedings Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe NM: NCGIA http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html
- Maidment, DR and Reed, S 1997: *Soil water balance in Morocco*. Téxas: CRWR, Univeisity of Texas <http://www.ce.utexas.edu>
- Maidment, D.R., Olivera, E., Reed, S., Ye, Z, Akmansoy, S. and McKinney, D.C 1995: *Water balance of the Niger River basin in West África* CRWR
- Maidment, D.R., Olvera, E, Ye, Z, Reed, S. and McKinney, D.C 1996: *Water balance of the Niger River* Proceedings ASCE, North American Water and Environment Congress '96, NAWEC '96 AnaheimCA: ASCE,
- McDonell, R.A., 1996: Including the spatial dimensión, using the spatial infoimation system in hydilogy *Progress in Physical Geography* 20(2), 159-77.
- Meijerink, A.,M.J 1974: Phytohydrological reconaissance suiveys PhD. Thesis, Free Reformed University, Amsteidam,
- r 1988: *Data acquisition and data capture through terrain mapping units*. ITC Publication 7. Enschede: ITC
- 1996: Remote sensing applications to hydilogy, groundwater^ *Hydrological Science Journal* 41(4), 549-61
- Meijerink, A.M.J., de Brouwer; H.A.M., Mannaerts, CM, and Valenzuela, C.R, 1994: *Introduction to the use of geographical information systems for practical hydrology* ITC Publication 23. Enschede: UNESCO, International Hydrology Piogramme and IIC.
- Mendoza, ME. and Boceo, G 2001: Balance hídrico espacialmente distribuido. In Mendoza, M,E., López, E M and Boceo, G *Regionalización ecológica, manejo de recursos y ordenamiento territorial de la Cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán*. DERN, IE-UNAM Technical report prepared for SIMORELOS CONACYT, Morelia, México.
- Miller, D.,R. and Morrice, J.G.. 1996: Assessing uncertainty in catchment boundary delimitation. *Proceedings Third International Conference/Workshop on jntegrating GIS and Environmental Modeling* Santa Fe NM: NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html
- Moran, M,S, Humes, K,S., and Pinter, Jr, PJ. 1997: The scaling characteistics of remotely-sensed variables for sparsely-vegetated heteíogeneous landscapes. *Journal of Hydrology* 190(3-4), 337-62.
- Müller^Wohlfeil, DI, Lahmer, W, Krysanova, V, and Beckei; A. 1996: Topography-based hydrological modelling in the Elbe drainage basin *Proceedings Ihird International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling* Santa Fe NM: NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html
- Najjar, RG . 1999: The water balance of the Susquehanna River Basin and its response to climate change. *Journal of Hydrology* 219, 7-19
- Narasimha, FV., Venkataratman, I., Kiisna-Rao, P.V., Ramana, K.V. and Singaro, M.N.. 1993: Relation between r oot soil moisture and normalized difference vegetation index of vegetated fields. *International Journal of Remote Sensing* 14(3), 441-49.
- Naiayana, GS., Lakshmaiah, N, and Goud, E,V,E 1996: Hydrogeomoiphological studies based on remote sensing of Mulung Tuluk, Warangal Dishict, Andra Pradesh, India. *Hydrological Science Journal* 41(2), 137-51
- Neilson, R.,P, 1995: A model fox piedicting continental-scale vegetation distribution and water balance *Ecological Application* 5(2), 362-85
- Olivera, E, 1995: *Water balance of the Souss basin, Morocco Using geographic information systems for water resources management*. Texas: CRWR and FAO. University of Texas at Austin <http://www.ce.utexas.edu/prof/olivera>
- 1996: Spatial distributed modeling of storm runoff and nonpoint sopurce pollution using geographic information systems Ph.D Thesis,

- University of Texas at Austin.
- Olivera, E and Maidment, D.R., 1996: Runoff computation using spatially distributed terrain parameters. *Proceedings, ASCE-Northern American Water and Environment Congress '96 NAWEC '96* Anaheim CA: ASCE
- Olivera, F., McKinney, D.C., Maidment, D.R., Ye, Z. and Reed, S. 1995: Mean-Annual Water Balance of the Niger River, West Africa. In *Predicting the water balance of surface and ground water resources over large areas*, UNESCO Symposium on Runoff Computations for Water Projects, St Petersburg, Russia: UNESCO
- Olsson, I. and Pilesjö, P. 1999: Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment. In *Short course of environmental modelling* Enschede: ITC <http://www.natgeo.iu.se/lennartweb>
- Osman, B.E.T. 1996: GIS-hydrological modelling in arid lands. A geographical synthesis of surface waters for the African Red Sea region in the Sudan. Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden.
- Ottlé, C. and Vidal-Madjar, D. 1992: Estimation of land surface temperature with NOAA9 data *Remote Sensing of Environment* 40, 27-41
- Palacio, J., 1989: Evaluation gully erosion using ILWIS, an example of central México. ITC Internal Report Enschede, The Netherlands.
- Perera, L.K. and Tateishi, R., 1995: Do remote sensing and GIS have practical applicability in developing countries? Including some Sri Lanka experiences *International Journal of Remote Sensing* 16(1), 35-51
- Petty, G.W., 1995: The status of satellite rainfall estimation over land. *Remote Sensing of Environment* 51, 79-100
- Petty, G.W. and Krajewski, W.F., 1996: Satellite estimation of precipitation over land *Hydrological Sciences* 41(4), 433-51
- Pietroniro, A., Wishart, W., and Solomion, S.I. 1989: Use of remote sensing data for investigating water resources in Africa. In *Quantitative remote sensing, an economic tool for the nineties* Proceedings IGARSS'89, IEEE Vancouver BC: IEEE.
- Pozo-Vázquez, D., Olmo-Reyes, E.J. and Alados-Aiboadas, I. 1997: A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature from AVHRR data *Remote Sensing of Environment* 62, 215-22.
- Piata, A.J., 1990: Satellite-derived evaporation from Lake Eyre, South Australia, *International Journal of Remote Sensing* 11(11), 2051-68
- Rango, A., 1985: Assessment of remote sensing input to hydrologic models *Water Resources Bulletin* 21(3), 423-32.
- Raupach, M.R., and Finnigan, J.J. 1997: The influence of topography on meteorological variables and surface-atmosphere interactions. *Journal of Hydrology* 190(3-4), 182-213.
- Reed, S. 1996: *Soil-water budget, Part I, methodology and results*. Texas: CRWR, University of Texas at Austin. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHydro/seann/explsoil/>
- Reed, S., Maidment, D. and Patoux, J. 1997: *Spatial water balance of Texas*. Texas: CRWR, University of Texas. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/library/wbtexas/>
- Refsgaard, J.C. 1996: Terminology, modeling protocol and classification of hydrological model codes. In Abbott, M.B. and Refsgaard, J.C., editors, *Distributed hydrological modeling* Dordrecht: Kluwer Academic, 17-39.
- 1997: Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198, 69-97.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B., 1996: Construction, calibration and validation of hydrological models. In Abbott, M.B. and Refsgaard, J.C., editors, *Distributed hydrological modeling* Dordrecht: Kluwer Academic, 41-54.
- Richard, Y. and Pocard, I., 1998: A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing* 19(5), 2907-20.
- Rosso, R., 1994: An introduction to spatially distributed modelling of basin response. In Rosso, R., Peano, A., Becchi, I. and Bemporad, G.A., editors, *Advances in distributed hydrology*, Littleton: Water Resources Publications, Ltd.
- Roy, O.P. 1997: Investigation of the maximum normalized vegetation index NDVI and the maximum surface temperature T_s AVHRR compositing procedures for the extraction of NDVI and T_s over forest, *International Journal of Remote Sensing* 18(11), 2383-401
- Sabins, F.F. 1997: *Remote sensing Principles and interpretation* New York: WH Freeman and Company
- Sado, K. and Islam, M., 1996: Effect of land cover on areal evapotranspiration using Landsat TM data with meteorological and height data, the case of Kitami city, Japan *Hydrological Science Journal* 41(2), 202-17.
- Sahagian, D., 2000: Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations, sea

- level and water redistribution *Global and Planetary Change* 25,39-48
- Salomonson, V.V. 1983: Water resources assessment In Colwell, J., editor, *Manual of remote sensing* Bethesda MD: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
- Schneider, S.R., McGinnis, D.E and Stephens, G. 1985: Monitoring Africa's lake Chad Basin with Landsat and NOAA satellite data *International Journal of Remote Sensing* 6, 59-73
- Schumann, A.H., Funke, R. and Schultz, G.A. 2000: Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology* 240,45-61
- Schumm, S.A. 1964: Airphotos and water resources *Transaction WNE5CO Symposia Aerial Survey and integrated studies* Toulouse: UNESCO.
- Scofield, F.R. 1985: Satellite-derived precipitation estimates for hydrological applications. In Goodison, B.E., editor, *Hydrological applications of remote sensing and remote data transmission*. IAHS Publication 145 Wallingford: IAHS.
- Seguin, B. 1996: The use of AVHRR-derived land surface temperature estimates for agricultural monitoring. In D'Souza, G., Belward, A.S. and Malingreau, J.P., editors, *Advances in the use of NOAA-AVHRR data for land applications*. Dordrecht: Kluwer Academic, 357-76
- Seguin, B., Assad, E., Freteaud, J.E., Imbernon, J., Keir, Y. and Lagouarde, J.E., 1989: Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. *International Journal of Remote Sensing* 19(6), 1101-17.
- Sehmi, N.S. and Kunzewicz, W. 1992: Water, drought and desertification in Africa. In *Sustainability of water resources under increasing uncertainty* Proceedings of a symposium held during the Fifth IAHS Scientific Assembly IAHS Publication 240 Rabat: IAHS, 57-66
- Sharma, K.D and Singh, S. 1995: Satellite remote sensing for soil erosion modeling the ANSWERS model *International Journal of Remote Sensing* 13(9), 259-72.
- Sharma S.K. and Anjaneyulu, D. 1993: Application of remote sensing and GIS in water resource management. *International Journal of Remote Sensing* 14(17), 3209-20.
- Stuebe, M.M and Johnson, D.M., 1990: Runoff volume estimation using GIS techniques. *Water Resources Bulletin* 26(4), 611-20.
- Sui, D.Z. and Maggio, R.C 1999: Integrating GIS with hydrological modeling, practices, problems, and prospects. *Computen, Environment and Urban Systems* 23,33-51.
- Ihorhwaite, C. and Matter, J. 1955: *The toater balance, publication in dimatology* Centeron NJ: Drexel Institute of technology
- Thunnissen, H.A.M., Jaarma, M.N, and Schoumans, O.K 1992: Land cover inventory in the Netherlands using remote sensing; application in a soil and water vulnerability assessment system *International Journal of Remote Sensing* 13(9), 1693-708
- Valenzuela, C.R., editor, 1991: *Introduction to geographical information systems* Enschede: ITC
- Vandewiele, G.L., Xu, C.Y, and Huybretch, W., 1991: Regionalization of physically based models in Belgium Application to ungauged catchments *Water Resources Management* 5, 199-208.
- Vandewiele, G.L, Xu, C Y and Lar-Win, N. 1992: Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium China and Burma *Journal of Hydrology* 134, 315-47
- Vázquez-Selem, L. 1992: *Gully erosion, soils, and landforms in a volcanic area of central México* M.Sc. Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands
- Vekerdy, Z. 1996: GIS based hydrological modeling of alluvial regions Using the example of the Kisalföld Hungary PhD. Thesis, nC, Enschede, The Netherlands
- Venneker, R.G.W. and Buijnzee, I.A. 1997: The IHE-VUA Catchment research and modeling initiative CRMI In *The IHE-VUA catchment research and modelling initiative* Document CRMI-IR-001 IHE, Delft, Vrije Univer siteit Amsterdam
- Venneker, R.G.W., and ScheUekens, J. 1997: A framework for development of hydrological models. In *The IHE-VUA catchment research and modelling initiative* Document CRMI-TR-001 IHE, Delft, Vrije Uníversiteit Amsterdam.
- Verstappen, H.Th. 1983: *Applied geomorphology. geomorphological survey for environmental development* Amsterdam: Elsevier.
- Ward, R.G. 1979: Geographical hydrology *Progress in Physical Geography* 3(3), 392-412.
- Xu, C.Y and Vandewiele, G.I. 1994: Sensitivity of rainfall-runoff models to input errors and data length *Hydrological Science Journal* 39(2), 157-76
- Zinck, J.A. 1988: *Physiography and soils*. Enschede: ITC.
- Zonneveld, I.S. 1979: *Land evaluation and land(scape) science lectures of land(scape) science*,

land(scape) survey and land evaluation pragmatic land classification. Enschede: ITC

Zuñiría, M. De 1992: Mapping topoclimates by integrating topographic, meteorological and land ecological data in a geographic

information system A case study of the Loam Sak area, north central Thailand, Ph.D. Thesis, University of Amsterdam-ITQ Enschede, The Netherlands

Capítulo 4

Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Bases para su ordenamiento territorial¹

Resumen

Este trabajo presenta la regionalización geomorfológica de la cuenca del lago de Cuitzeo. La regionalización se basó en la delimitación de unidades de relieve a dos niveles de agregación. La delimitación de formas laderas se realizó a través de levantamiento geomorfológico. De esta forma se describen 6 zonas geomorfológicas mayores (zonificación geomorfológica) y 19 formas de relieve generalizadas para la cuenca de Cuitzeo

Además se delimita la distribución de la erosión en la cuenca para los años 1975 y 2000, reconociendo que este es un problema localizado principalmente en tres subcuencas de los alrededores de la Cd. de Morelia (arroyo Colorado, Atécuaro y San Lucas Pío); y en dos Municipios (Huiramba y Morelia),

INTRODUCCIÓN

La diferenciación espacial del territorio o espacio geográfico mediante la selección de uno o varios criterios (atributos), permite construir una regionalización. La regionalización se concibe como un método para reducir o eliminar detalles, los cuales en promedio no hacen que se elimine la verdad sobre grandes áreas geográficas. En este sentido se delimitan unidades espaciales basadas en algún criterio de homogeneidad; es decir, las regiones se establecen a partir de cierta uniformidad de uno de sus elementos o de la integración de varios de ellos con objeto de explicar la estructura o arreglo espacial de los distintos elementos presentes en el terreno. Esto permite evaluar la aptitud del terreno y en consecuencia se considera parte fundamental del proceso de ordenamiento ecológico territorial (Gallant et al., 1989; Mendoza y Boceo, 1998),

Específicamente la regionalización geomorfológica ha probado su utilidad en el manejo de recursos naturales en países subdesarrollados (Boceo et al., 2001). El propósito de la cartografía de índole geomorfológico, edafológico y de cobertura vegetal en forma integrada consiste en generar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos, la estructura, composición, dinámica de los suelos, agua y de la vegetación, así como de los fenómenos naturales relacionados (Zonneveld, 1979; Meijerink, 1988; Einck, 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 cada unidad presentan distintos tipos de procesos

¹ Mendoza, M, G Boceo y E, López Granados (aceptado) Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, Bases para su ordenamiento territorial., En: Barón, L., F, Peña y V Ramírez (compiladores), *la cuenca del lago de Cuitzeo: problemática perspectivas de desarrollo*, Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), Universidad Autónoma de Chapingo (UACH)

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 regionalización puede basarse en los principios de la ecología del paisaje y es útil porque la información geomorfológica proporciona el marco espacial geoneferenciado de aplicación de las distintas políticas de uso y manejo de recursos naturales (Mendoza y Boceo, 1998a),

Este artículo tiene como objetivo formular la regionalización geomorfológica de la cuenca a escala 1:250,000 con base en datos a 1:50,000, con intención de proporcionar la base espacial de un ordenamiento territorial en la cuenca del lago de Cuitzeo (Figura 1)

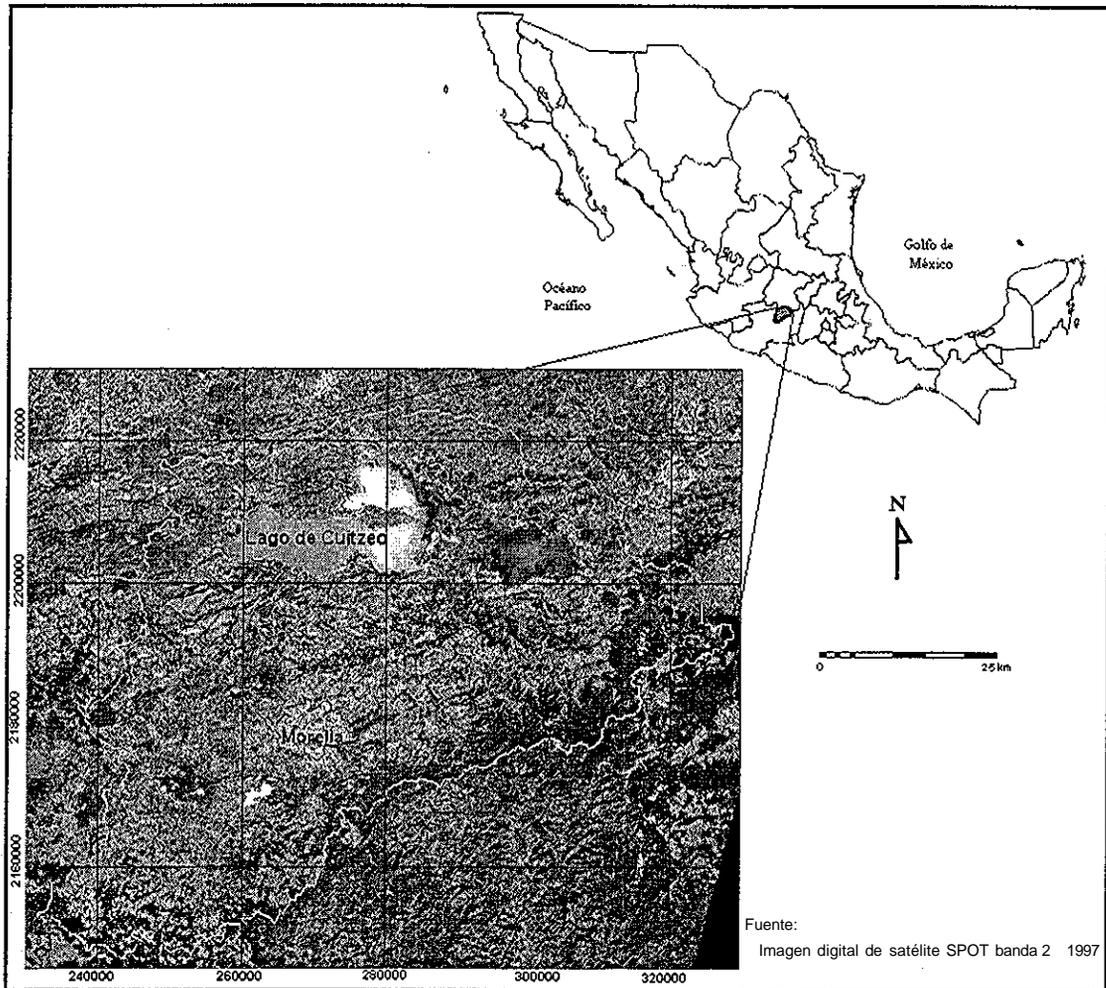


Figura 1 Área de estudio.

ENFOQUES

La metodología seguida para la elaboración de la cartografía de geomorfología se basa en los esquemas propuestos por Meijerink, (1988), Verstappen y Van Zuidam (1991) y Zinck (1988). Todos los esquemas están dirigidos a la evaluación de recursos y riesgos naturales,

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las propuestas de Meijeink (1988) y Veistappen y Van Zuidam (1991), se centran en las técnicas de levantamiento geomorfológico (analítico, sintético y pragmático). Es decir, tienen un enfoque de carácter estrictamente geomorfológico, denominado Sistema de Levantamiento Geomorfológico, establecido por el Instituto de Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC), en Enschede, Países Bajos. El esquema es aplicable universalmente, porque impone restricciones en los criterios de clasificación (Meijeink, 1988). En este sentido, es científico porque es un método replicable. Este método de captura y almacenamiento de datos se caracteriza porque hace uso de la relaciones entre geología, geomorfología y suelos, las cuales se interpretan a través de pares fotografías estereoscópicas (Meijeink, 1988).

El Sistema de Levantamiento Geomorfológico del ITC está basado en un acercamiento paisajístico, en el cual el muestreo paramétrico es necesario, especialmente en los niveles de levantamiento semidetallado y detallado (Veistappen y Van Zuidam, 1991). Especialmente eficiente es el muestreo de los atributos morfométricos del relieve como son inclinación, longitud y exposición de laderas, así como la amplitud del relieve y la densidad y profundidad de la disección.

Por su parte el esquema geopedológico (Zinck, 1988) se refiere a sistema de clasificación jerárquico, utilizado como auxiliar en el levantamiento de suelos y por ende de recursos naturales. El sistema reconoce seis niveles de categorización a partir de la percepción o identificación superficial de los distintos rasgos del ambiente por parte del hombre. La clasificación se encuentra muy ligada a conceptos de índole edafológico, por lo cual se utilizan términos propios de la ciencia del suelo como son orden, suborden, familia, subfamilia para las diferentes jerarquías y taxa para indicar las distintas unidades que se encuentran contempladas en cada nivel jerárquico. Este último punto (taxa) representa un avance significativo, debido a que en ninguna clasificación previa se definían con precisión las unidades de relieve contempladas en cada orden jerárquico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Gabinete

En primera instancia se digitalizaron las isolíneas a cada 10 m y 20 m de caitas topográficas a escala 1:50,000, posteriormente este archivo vectorial se rasterizó, y se procedió a generar el Modelo Digital de Terreno (MDT), facilitando el análisis morfométrico del área de forma automatizada dentro del SIG, el cual permite reducir el consumo de tiempo de los procesos y sintetizar gran cantidad de información para su examen espacial (Walsh, 1985), además permite la manejo de tablas y mapas de manera geoneferenciada, con el fin de producir información válida para la toma de decisiones (Valenzuela, 1991; Boceo y Ortíz, 1994; Mendoza y Boceo, 1988a),

El estudio de las formas de relieve se puede realizar semejando éstas a modelos geométricos, de esta manera se generaron la carta morfográfica según la metodología expuesta por Lamadrid-Marón y Horta-Carballal (1984) y Lugo-Hubp (1988), la cual consiste en extraer de los mapas topográficos y las fotografías aéreas los elementos principales del relieve; estos son al igual que en la geometría clásica: puntos, líneas, superficies y volúmenes, aunque éstos últimos se representan en planos

Entre los principales ejemplos de líneas se pueden mencionar los paiteaguas, las líneas de costa, los escarpes y los escunimientos. Entre las superficies se encuentran las planicies, las cuales presentan formas semejantes a círculos, elipses, rombos. Los volúmenes se aplican a elevaciones como conos, pirámides, cilindros, etc, los cuales se observan en elevaciones montañosas como volcanes, domos y sierras,.

El análisis morfométrico o cuantificación de elementos del relieve se ha desarrollado en gran medida a partir del siglo XX con el desarrollo de los métodos matemáticos. De acuerdo con Lugo-Hubp (1988), los elementos principales a cuantificar a partir¹ de las formas del relieve son: longitud, superficie, volumen, altura absoluta y relativa, pendiente, orientación, densidad, frecuencia y otros atributos tratables numéricamente.

En este estudio se elaboraron tres cartas básicas: la hipsométrica, la de pendientes y la de densidad de drenaje, según la metodología descrita por Lamadr id-Mar on y Horta-Carballal (1984) y Lugo-Hubp (1988),.

La carta altimétrica o hipsométrica es un mapa sencillo pero vital en el estudio del relieve; es el mapa inicial en este proceso, Se debe definir los intervalos de valores que han de delimitarse, tomando en cuenta la altura máxima y mínima del área en el mapa topográfico original., La delimitación se realiza según un criterio geomorfológico individual, pues no existen reglas para definir estos intervalos., La intención de este mapa es expresar de manera inmediata y clara el relieve en su totalidad. La elección de los colores para los intervalos antes definidos no es arbitraria; para facilitar su comprensión se utilizan los colores fríos (verdes-amarillos) en las zonas más bajas y los más cálidos (naranjas-rojos) en las zonas más altas; ya que al ser bien aplicados da la impresión de observar el mapa en tercera dimensión,

La carta de pendientes consiste en transformar la distancia entre curvas de nivel a valores de pendiente (inclinación de terreno), Se deben establecer los rangos de pendiente que se presentarán en el mapa, lo cual depende de la escala y la equidistancia entre las curvas de nivel, además de los objetivos del trabajo y las condiciones fisiográficas generales del área de estudio,

La carta de densidad de drenaje se construye al contabilizar el número de ríos por unidad de superficie., Con el apoyo del SIG se mide de manera automática el número de escunimientos por unidades de superficie y posteriormente los resultados se reclasifican en clases de densidad,

Para el análisis-geomorfológico se siguió parcialmente el procedimiento de levantamiento geomorfológico utilizado en el ITC (Verstappen y Van Zuidam, 1991). Cuatro aspectos del Sistema de Levantamiento merecen especial atención:

- A) La información morfogenética contenida en los mapas geomorfológicos analíticos es la base del sistema., En ella radica la contribución geomorfológica a los levantamientos multidisciplinarios,.
- B) Las grandes unidades morfogenéticas, identificadas gracias a los levantamientos geomorfológicos analíticos, coinciden normalmente con las unidades de terreno de

los levantamientos geomorfológicos sintéticos y con las unidades de levantamiento geomorfológico pragmático,

- C) Generalmente se utilizan símbolos areales coloreados; sin embargo, para simplificar la producción del mapa, la información esencial debe ser representada mediante símbolos lineales, con el menor número de colores posibles,
- D) El sistema está concebido para aplicarse en la cartografía a todas las escalas, La generalización conceptual puede llevar a resaltar las grandes morfobestructuras, en los mapas de mediana y pequeña escala, mientras que los procesos y las formas menores del terreno se destacan en los mapas detallados,, La generalización cartográfica en escalas pequeñas y medianas puede llevar a omisiones de ciertos símbolos lineales y pequeñas unidades de cartográficas, o la combinación de sus asociaciones.

Este levantamiento propone la revisión de imágenes producto de percepción remota y fotografías aéreas; de esta forma se obtiene una visión general de la geomorfología del área de estudio, incluyendo su relación con las áreas adyacentes,, Simultáneamente, se consultan fuentes de información disponibles, como literatura, mapas temáticos, etc; obteniendo información acerca de las características geomorfológicas de las unidades delimitadas usando tarjetas de descripción de las unidades geomorfológicas,

Posteriormente se realizó una interpretación detallada de las imágenes y fotografías aéreas utilizando criterios y reglas clásicas de interpretación aerofotográfica (Verstappen, 1964; Van Zuidam y Van Zuidam, 1979; Guerra-Peña, 1980) para delinear las unidades geomorfológicas con el apoyo de estereoscopios de bolsillo y de espejos,, Las unidades definidas sobre las fotografías fueron transferidas a la cartografía topográfica escala 1:50,000 por métodos fotogramétricos simples,,

Los mapas semidetallados, como el de este trabajo, deben ser verificados cuidadosamente en el campo; sin embargo es muy recomendable la extrapolación y generalización de la información, ya que son el resultado de la interpretación aerofotográfica de áreas relativamente amplias, y se reducen así tiempos y costos de elaboración cartográfica,

El sistema jerárquico seleccionado fue el levantamiento geopedológico (Zinck, 1988; véase Mendoza y Boceo, 1998b), el cual se ajustó a las características locales, Se consideraron las clases ambiente morfogenético, paisaje geomorfológico (zonalidad geomorfológica), relieve/modelado, litología/fácies y forma de relieve (Boceo et al., 2001). Este sistema fue seleccionado porque las jerarquías están definidas con precisión, los rasgos apreciables a cada nivel pueden aplicarse en cualquier ambiente y además ofrece la posibilidad de establecer una relación coherente con otros componentes del paisaje (suelos, vegetación), Para los niveles cartografiados el mapeo es relativamente simple, cuantificable y pragmático. Se mapean los rasgos inequívocamente apreciables, es decir lo que cualquier intérprete puede observar en el mapa, fotografía y campo. Las consideraciones morfogenéticas de muy alta complejidad se manejan y analizan a niveles inferiores, lo cual presenta ventajas en la replicabilidad del método a escala regional (Cuadro 1),

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 1 Uso de atributos del terreno según importancia relativa. Simplificada de Zinck (1988).

Atributos	Alisado	Relieve	Importancia Tu lino
Morfométricos			
Amplitud de relieve	X	X	0
Pendiente del terreno	X	X	X
Densidad de valles	X	X	
Morfográficos			
Forma topográfica	X	0	
Perfil topográfico		X	X
Exposición		X	X
Configuración		X	X
Patrón del drenaje	X	X	
Condiciones limítrofes		X	
Arreglo de las curvas de nivel	X	X	X
Morfogenéticos			
Granulometría		0	X
Estructura			X
Mineralogía			X
Consistencia			X
Morfoscopia			X
Morfocronológicos			
Grado de intemperismo de las partículas			X
Grado de desarrollo del suelo			X
Mineralogía de arcillas			X
índices de lixiviación			X
Complejo de absorción			X

x = atributo muy importante
o = atributo moderadamente importante

El enfoque jerárquico de este sistema se basa en la delimitación de rasgos a partir de una mayor abstracción y generalización de información para las unidades mayores; mientras que las unidades menores se delimitan mediante un proceso de análisis con mayor detalle (Figura 2). Las unidades mayores siempre implican una utilización menor de atributos, contrariamente a las unidades menores (Cuadro 2). En este sentido las unidades mayores corresponden más a un proceso de clasificación, mientras que las unidades menores corresponden más a un proceso de identificación.

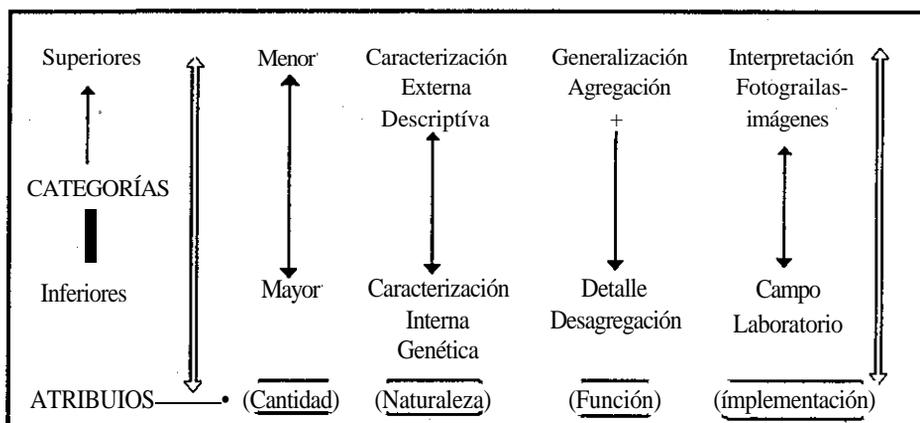


Figura 2, Esquema diagramático del método utilizado para la regionalización geomorfológica

Cuadro 2 Esquema básico de la clasificación taxonómica Modificado de Zinck (1988)

Nivel	Concepto genérico	t Abstracción y Generalización (menos atributos)	t clasificación-
4	Ambiente morfogenético		
3	Paisaje geomorfológico		
2	Relieve	Análisis y Detalle	
1	Forma de relieve	↖ (más atributos)	i identificación

La exactitud de la interpretación fue validada utilizando la matriz de error en donde la diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (fotointerpretación y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación., La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa., Los residuales en las illas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras los residuales en columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad., Es decir, en la matriz de error se representan errores de omisión y de comisión, respectivamente (USDA, 1995).

El análisis de la calidad de la bases de datos de relieve, se realizó con la verificación de polígonos siguiendo la técnica descrita por Boceo y Riemmann (1997), en la cual se describe a la verificación del etiquetamiento de los polígonos en términos de un caso binomial de criterio de éxito-fracaso., Este puede ser representado como un experimento de Bemoulli, con dos posibles resultados, correcto (la etiqueta del polígono en la base de datos digital corresponde a la etiqueta del mapa en papel) o incorrecto (el polígono dado fue incorrectamente etiquetado),. Esta no es una práctica común entre los manejadoras de base de datos espaciales., Se define como la variable aleatoria a "X", que describe el número de experimentos de Bernoulli necesarios para encontrar el primer error de etiquetamiento.,

$$p[X = x] = P[F, F, F, \dots, S] = q^x \cdot p, \quad x=1, 2, \dots$$

Donde F y S son respectivamente fracaso y éxito; $q=1-p$, probabilidad de no encontrar un error de etiquetamiento y x = número de experimentos hasta encontrar un error.

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

La 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 (Pasquaré et al., 1991),.

La pendiente: La inclinación del relieve permite distinguir las diferentes formas de modelado y los procesos que en el se desarrollan, La información de pendientes se obtuvo de la generación del modelo digital de terreno, el cual fue procesado en el programa Integrated Land and Water Information System (ILWIS), obteniendo un mapa de pendientes.

Tipos de suelo: La génesis de los suelos está íntimamente relacionada con la fbima 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.

Uso de suelo- La presencia de la vegetación y los usos del terreno, siempre indican, de
Vegetación: alguna manera, las cualidades o características del área donde se ubican, La información fue recabada del levantamiento de cobertura vegetal realizado por López-Granados (en preparación), a través de interpretación fotográfica y del trabajo de campo,

Esta carta presenta detalladamente a las formas de relieve, es decir sus características morfológicas generales, además de la distribución de los procesos modeladores del relieve, de esta manera la delimitación de las unidades geomorfológicas adquiere las características de una zonificación en la que se considera la interacción de los factores estructura, procesos y edad; definiéndose un documento que cubre un gran territorio y suministra una información sintética y básica para estudios del medio natural (Boceo, 1984),

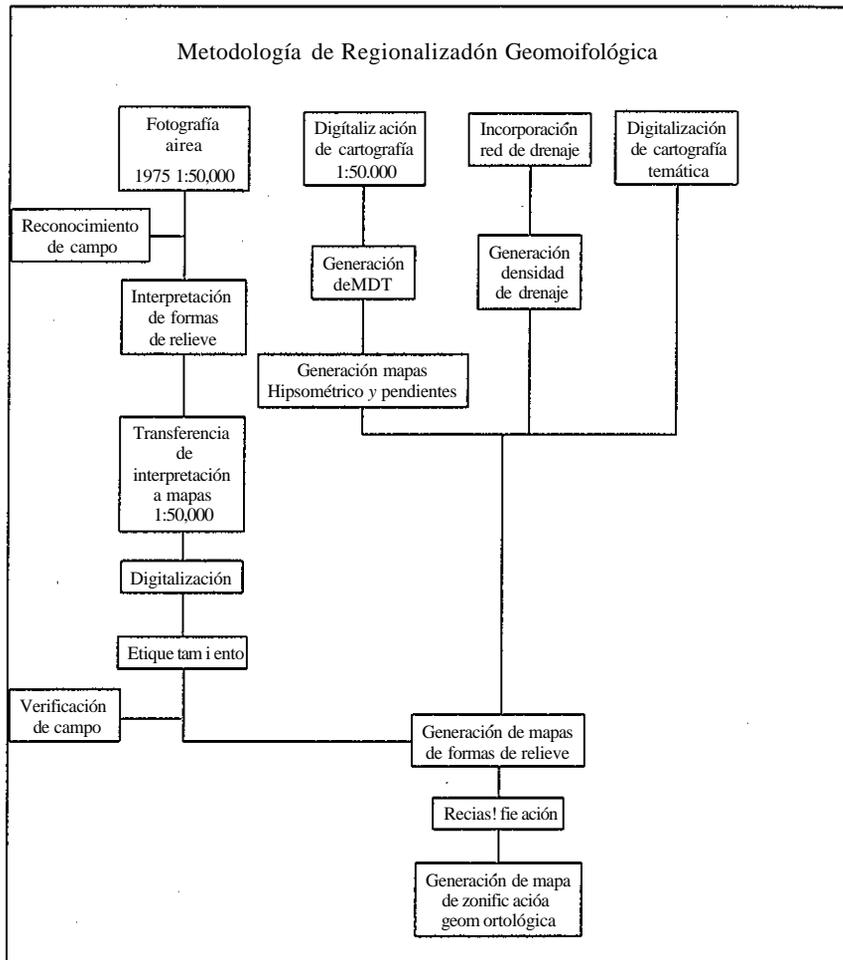
Se utilizó principalmente el criterio morfológico, es decir de amplitud de relieve y pendiente para la definición de unidades a nivel de paisaje geomorfológico o zonificación geomorfológica; al nivel de forma de relieve se consideraron la geometría y la posición topográfica de las formas de relieve., Un esquema de la secuencia de pasos seguidos en la regionalización se presenta en la Figura 3.,

Campo

El trabajo de campo consistió básicamente en la realización de recorridos de reconocimiento, verificación y validación de la interpretación de la cartografía. Se realizaron tres salidas de reconocimiento en el área de la cuenca; se realizaron seis salidas de verificación de las unidades geomorfológicas y además se realizaron 20 salidas de verificación y validación de relieve y cobertura vegetal de la cuenca. El total de días en campo fue de 36.,

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se descubre la calidad de las bases de datos de la regionalización; así como una descripción y análisis de la caracterización a nivel de zonificación geomorfológica (escala 1:250,000) y de formas de relieve (escala de representación 1:50,000), en la última parte se presenta la distribución de la erosión y un modelo de distribución potencial de la erosión en la cuenca,



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3. Diagrama del método utilizada para la regionalización geomorfológica

Calidad de datos

La calidad de datos evaluó la exactitud de la interpretación de unidades aeroespaciales, en la captura de las unidades en el sistema de información geográfica (SIG), así como en relación con la calidad de la base de datos espacial en el SIG. La exactitud de las clases generalizadas de relieve se presenta en el Cuadro 3, donde se aprecia que la exactitud global de la interpretación es de 97 %. Las clases que presentan la mayor confusión están por encima del 85 % (planicie y superficie cumbre); la mayor parte de las unidades no presentaron confusiones.

La calidad de la captura, es decir, el desplazamiento de las coordenadas del mapa con respecto a las del SIG, siempre fue menor al umbral definido por el sistema (1), en promedio 04889, La calidad del etiquetamiento se elaboró contabilizando las clases sin generalizar, pero se reporta por clases agregadas; en ambos casos la calidad fue superior a 85 % en 18 casos, sólo las unidades que cubren superficies reducidas, y que fueron muestreadas en pocas ocasiones, presentaron valores de 15 % de probabilidad de estar bien capturadas (Cuadro 4),,

Cuadro 3. Matriz de confusión de las formas de relieve generalizadas en el lago de Coatepec.

Formas de relieve generalizadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Exactitud		
1. Cuerpos de agua	27																			27	100%	
2. Planicie		6																			6	100%
3. Zona de inundación																						
4. Planicie con depresiones																						
5. Planicie fluvial																						
6. Piedemonte inferior no fértil						3																
7. Piedemonte superior																						
8. Piedemonte medio								15														
9. Monte bajo										10												
10. Laderas y suaves escarpadas						3				25	2											
11. Laderas inclinadas a escarpadas										6												
12. Volcán																						
13. Valle triple														8								
14. Colada de lava																						
15. Superficie cumbre																						
16. Cono volcánico																						
17. Mesa																						
18. Elevaciones aisladas																						
19. Planicie con vegetación cespiciosa																						
20. Erosión																						
Suma	27	6		1	38	4	15	11	11	25	6			8								
Exactitud	95.4	87	0	100	100	0	9	96.1	96.1	96.1	0	100	100	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4

Cuadro 4 Calidad del etiquetamiento de las formas de relieve generalizadas de la cuenca del lago de Cuitzeo.
X = Número de polígonos verificados por categoría; p=l/X; q= 1-p; C= Confianza (1-P[X=x])

Formas de relieve generalizadas	x	p	q	P	C
Planicie	18	0,0	0,94	0 02	98
Planicie zona de inundación	4	0.2	0.75	011	89
Planicie con depósitos de sal	2	0.5	0.50	0,25	75
Planicie con vegetación acuática	3	0,3	0.67	0,15	85
Valle amplio	3	0.3	0,67	0,15	85
Valle estrecho	2	0.5	0.50	0.25	75
Piedemonte no diferenciado	11	0.0	0.91	0.04	96
Piedemonte inferior	6	0,1	0.83	0.07	93
Piedemonte medio	16	0.0	0,94	0.02	98
Piedemonte superior	3	0.3	0,67	0.15	85
Elevaciones aisladas	8	0.1	0.88	0.05	95
Cono volcánico	7	0,1	0.86	0,06	94
Colada de lava	4	0.2	0.75	0,11	89
Mesa	13	0.0	0,92	0.03	97
Superficie cumbral	19	0.0	0,95	0.02	98
Laderas suaves y muy suaves	59	0.0	0.98	0.01	99
Laderas inclinadas a escarpadas	34	0.0	0.97	0.01	99
Cuerpos de agua	20	0.0	0.95	0.02	98

Esta evaluación permite indicar que la regionalización y las bases de datos en el SIG son confiables para el modelamiento espacial de cambio de uso del suelo, de la evaluación de aptitud del suelo, del cambio del balance hídrico y de ordenamiento territorial,,

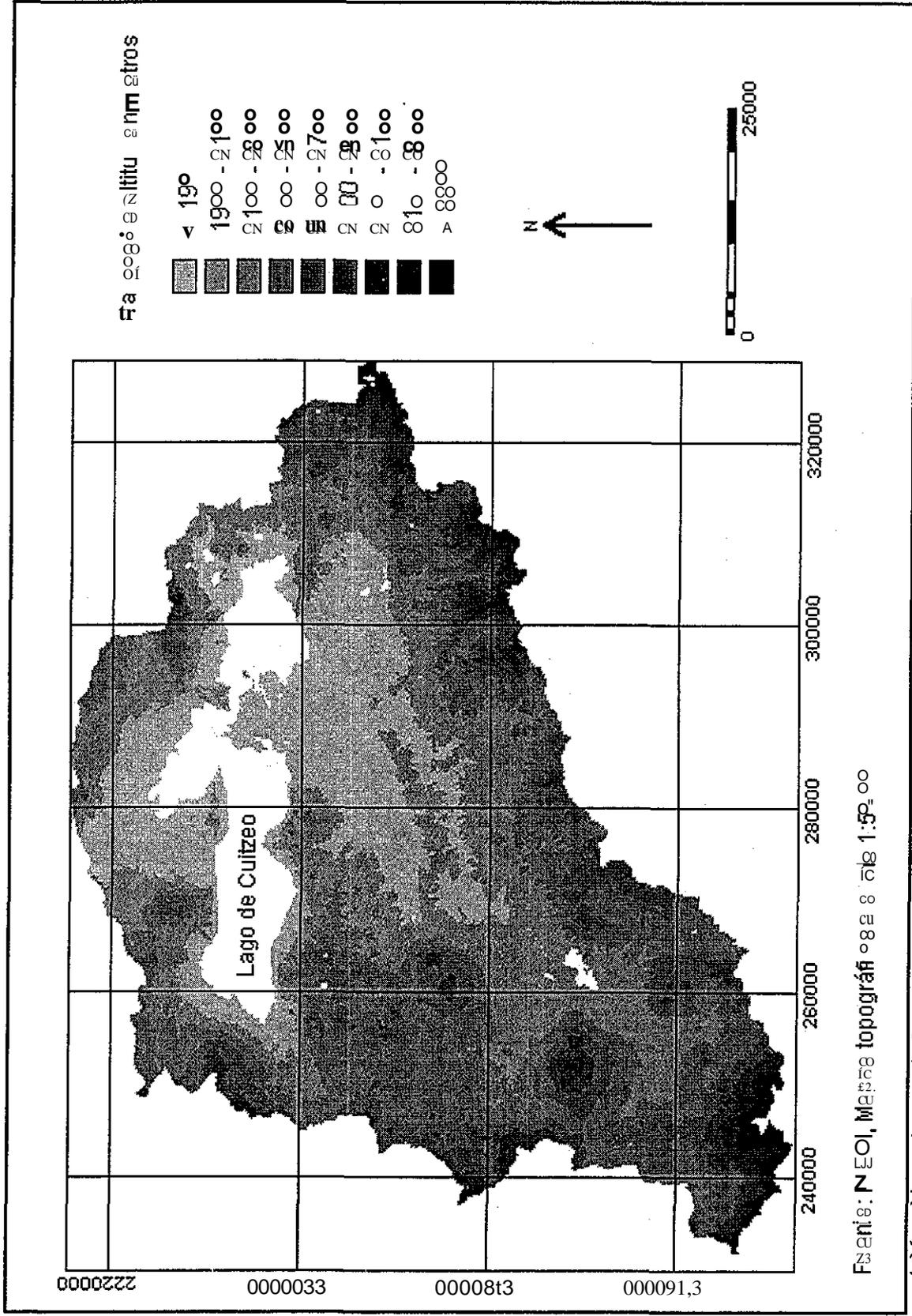
-Regionalización geomorfológica

Morfometría

La cartografía morfométrica (hipsometría, pendientes y densidad de drenaje) indica que la cuenca es en general una unidad hidrológica de baja amplitud de relieve; la cuenca se desarrolla desde los 1,830 hasta los 3,420 msnm; sin embargo, el 90 % de la cuenca se localiza por debajo de la curva de 2,500 msnm (Figura 4). En relación a las pendientes, estas valían principalmente entre 0 y 20° (90 %) (Figura 5), En consecuencia, el 90 % de la densidad de la disección es de nula a moderada (Figura 6), lo que tiene importantes implicaciones en los procesos de desprendimiento y transporte de materiales (erosión). Las características morfométricas de la cuenca no favorecen los procesos erosivos y en consecuencia no existe suficiente material para ser depositado en las porciones más bajas de la cuenca, especialmente en el vaso del lago de Cuitzeo,,

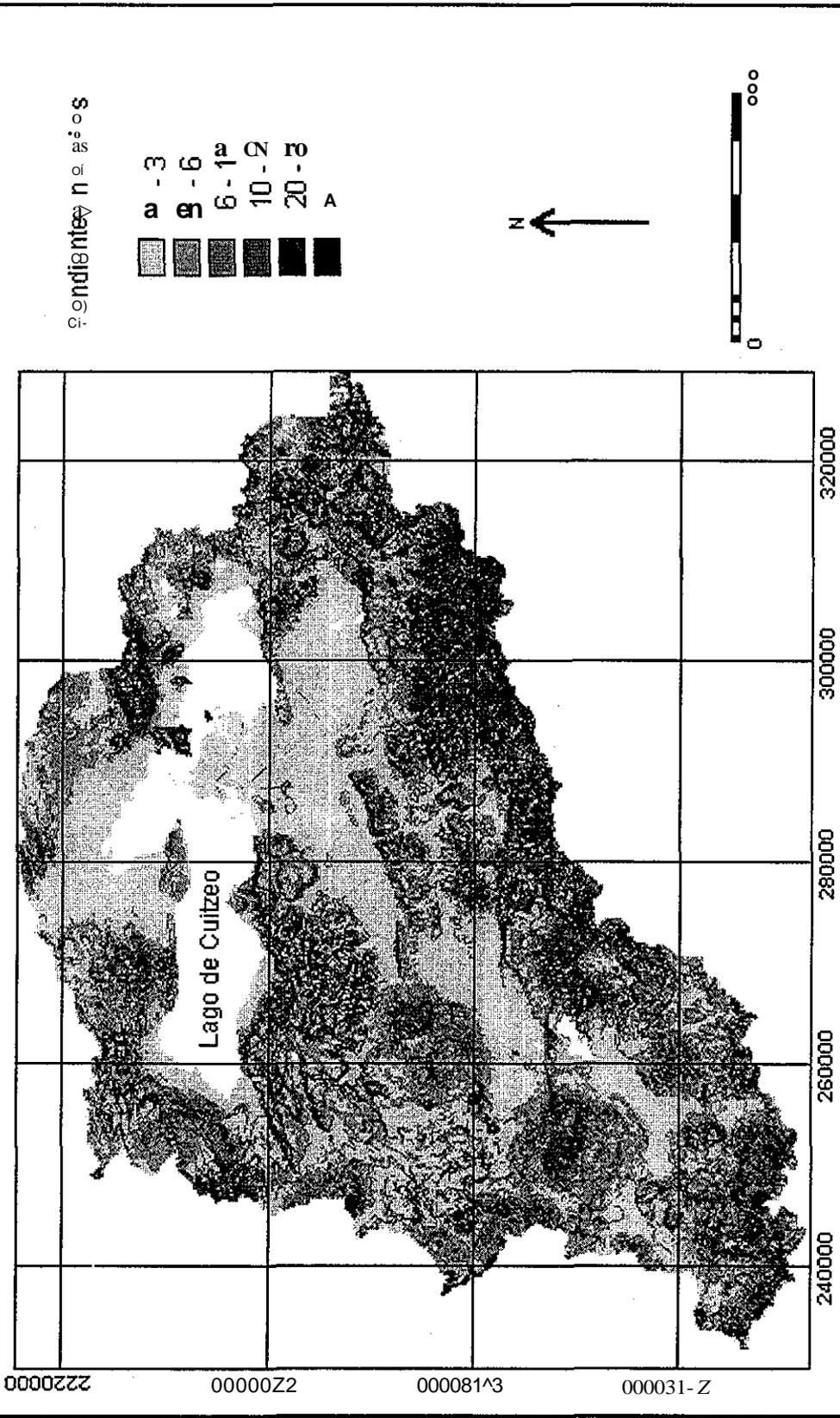
Zonificación geomorfológica

La distribución espacial de los paisajes geomorfológicos o zonificación geomorfológica se presenta en la Figura 7 y su superficie en la Figura 8, La caracterización se realizó en función de la información ambiental existente (rocas, hidrología superficial y subterránea, suelos, pendientes, hipsometría y distribución de localidades de la cuenca de Cuitzeo) (Figuras 4 a 6).



Fuente: NEOL, Mapa topográfico a escala 1:50,000

Figura 4. Mapa hipsométrico de la Cuenca del Lago de Cuitzeo



Mapa S. Mapa de pendientes de la Cuenca del Lago de Cuiztzo. Fuente: INEGI, M. Escala: 1:50,000.

Mapa S. Mapa de pendientes de la Cuenca del Lago de Cuiztzo

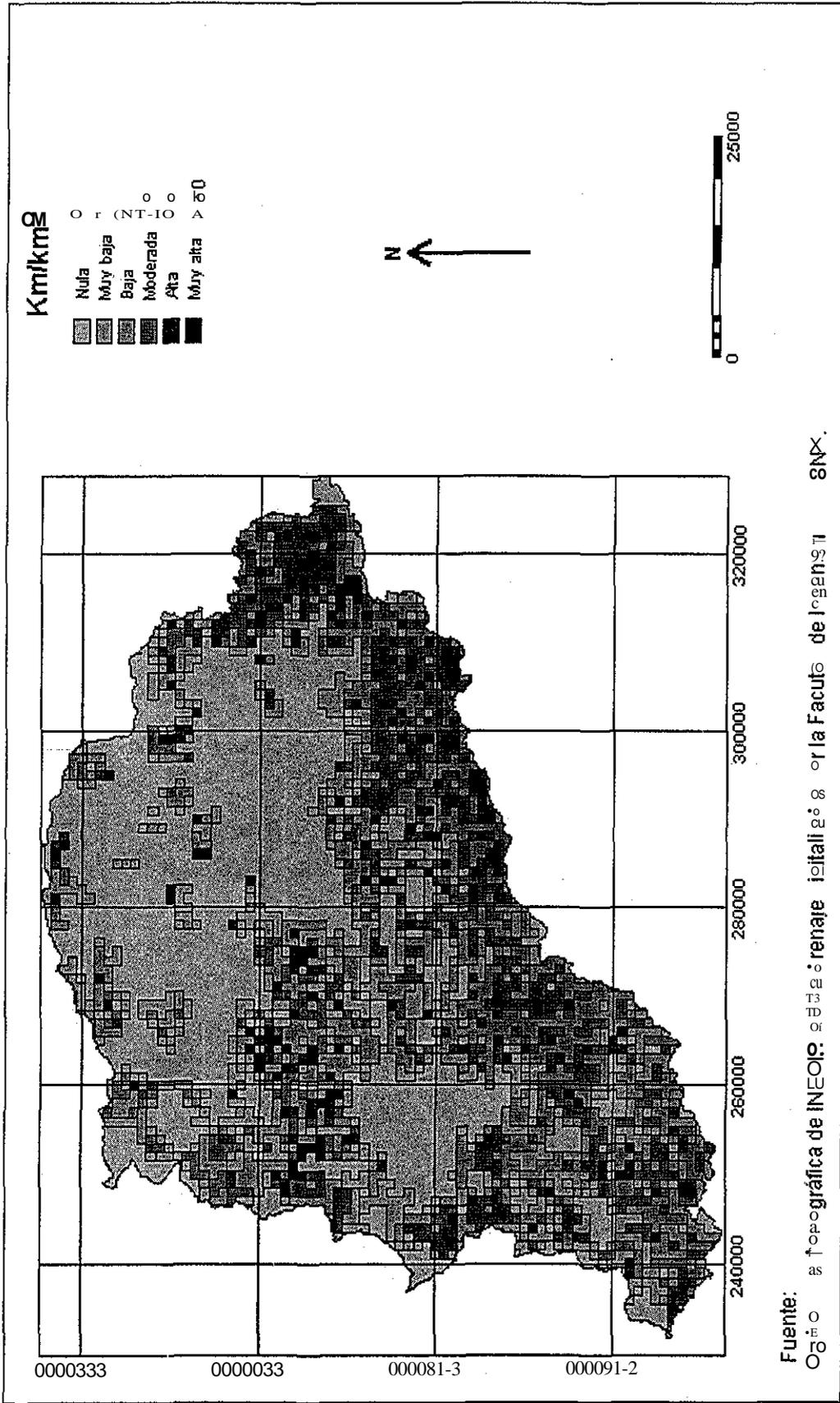


Figura 6. Mapa de densidad de la disección de la Cuenca del Lago de Cuitzeo Se excluyeron los canales de riego y drenaje.

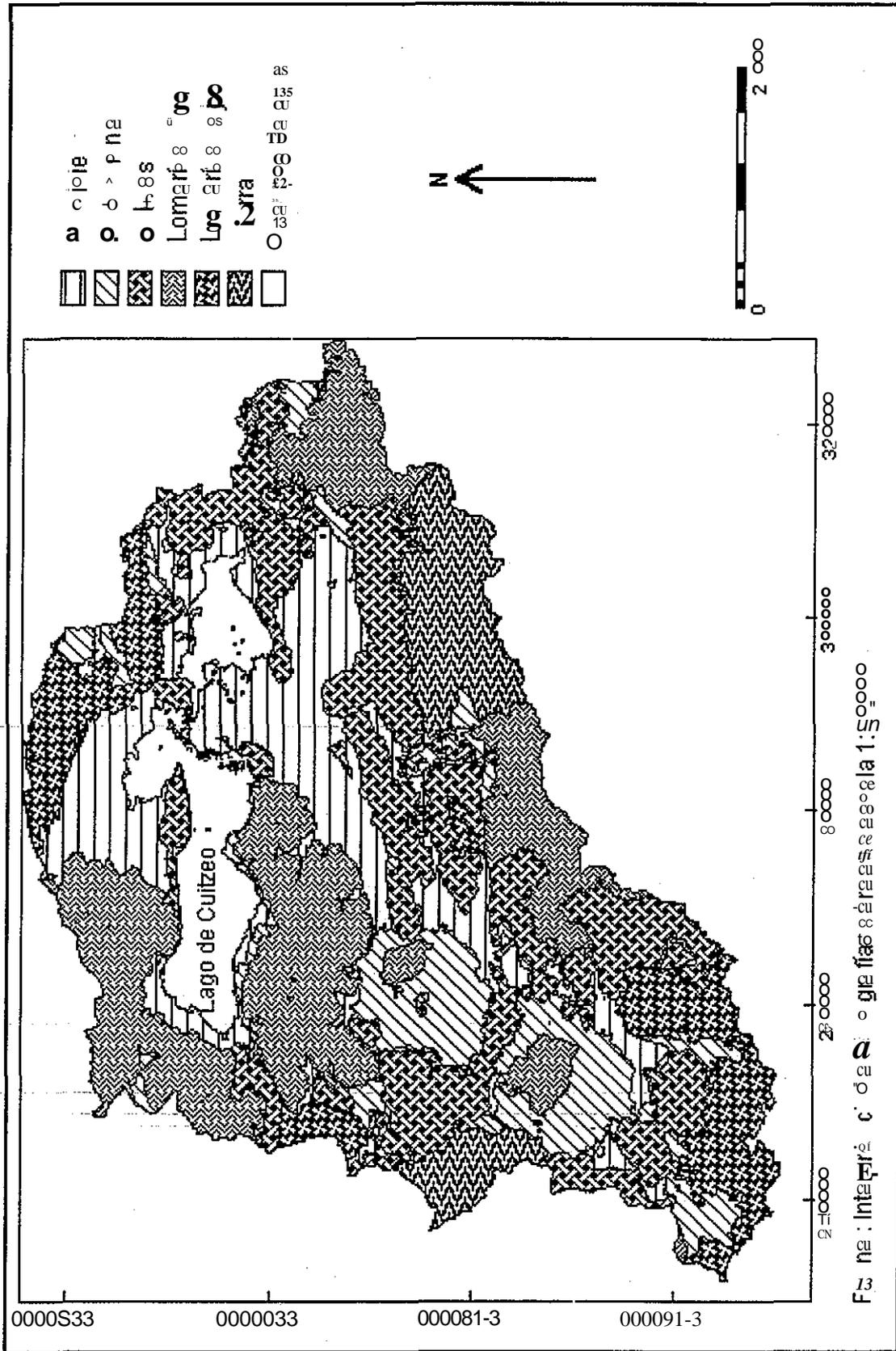


Fig. 7. Mapa de Zonificación Morfológica de la Cuenca del S. 5.

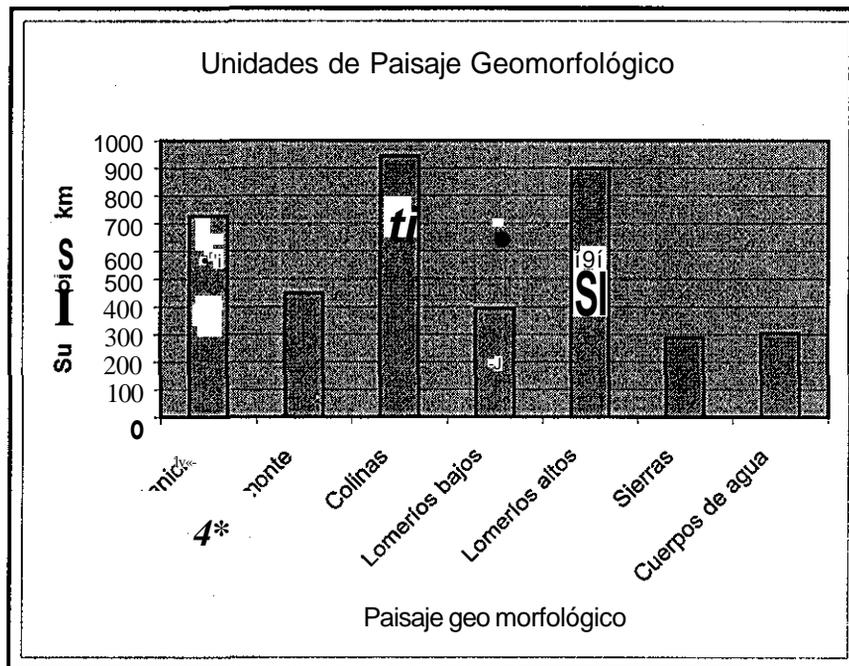


Figura 8. Unidades de Paisaje Geomorfológico.

Las planicies cubren una superficie de 727 km² (18.6% de la cuenca), Se caracterizan por encontrarse en altitudes menores a los 1900 m y presentan pendientes menores al 3°, se conforman por depósitos superficiales y lacustres recientes, en ellas se desarrollan suelos tipo Vertisol, Feozem y Zolonchak. El coeficiente de escurrimiento predominante se encuentra entre 10% y 20%, con materiales no consolidados con posibilidades bajas y altas de almacenamiento de agua; En las planicies se localizan 95 localidades (19%),

Los piedemontes cubren una superficie de 449 km² (1.2%); su altitud dentro de la cuenca varía de los 1900 a los 2500 msnm, con pendientes menores a 10°. Los piedemontes se conforman principalmente por conos de lava y cenizas del Pleistoceno y depósitos superficiales del reciente, en ellos se desarrollan principalmente Luvisoles, Vertisoles y Andosoles, El coeficiente de escurrimiento varía de 10% a 20%, en materiales consolidados con posibilidades bajas de almacenamiento de agua, En este paisaje se localizan 67 localidades (15.5%),

Las colinas representan una superficie de 943 km² (23.6% de la cuenca); 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 dentro del Cuaternario., Los suelos predominantes son Vertisol, Feozem, Luvisol, Acrisol y Andosol, El coeficiente de escurrimiento que domina se encuentra entre 10 y 20 %, en materiales consolidados de posibilidades bajas de almacenamiento de agua; en las colinas se localizan 190 localidades (38%),

Los lomeríos bajos tienen una superficie de 393 km² (9.7%). Se presentan en altitudes entre los 1900 hasta los 2700 msnm, con pendientes de entre 6° y 20°. Se desarrollan sobre conos andesíticos, de lava y cenizas, derrames de basaltos, domos dacíticos y riolíticos y

depósitos superficiales. Los suelos predominantes son Vertisol, Andosol, Luvisol y Acrisol. El coeficiente de escunimiento oscila entre 5 y 20%, en materiales consolidados de posibilidades bajas de almacenamiento de agua, En este paisaje se localizan 33 localidades (6,6%),.

Los lomeríos altos cubren una superficie de 899 km² (22 5 %),. Se ubican entre los 2100 y 2500 msnm, sus pendientes oscilan entre los 6° y los 20°. Se desarrollan sobre Ignimbritas, en conos andesíticos y de lava y cenizas y derrames de andesitas y basaltos. Los suelos predominantes son Vertisol, Luvisol Andosol y Acrisol. El coeficiente de escunimiento varía entre 5 y 20%, en materiales consolidados de posibilidades bajas de almacenamiento de agua, En los Lomeríos altos se ubican 84 localidades (16,9%),.

Las sienas cubren sólo 286 km² (7,2 %),. Sus alturas sobre el nivel del mar varían desde los 2100 hasta los 2900 msnm, con pendientes desde 6 hasta mayores de 30°, Se desarrollan sobre basaltos y andesitas, conos de lava, cenizas y derrames andesíticos., El coeficiente de escunimiento predominante es de 10 a 20%, sobre materiales consolidados con posibilidades bajas, En ella se ubican solo 28 localidades (5,6%),.

Caracterización de las unidades de relieve generalizadas

El mapa original de unidades de relieve se generalizo y se construyó un mapa simplificado (Figura 9) donde se aprecia la distribución de las distintas unidades de relieve presentes en la cuenca. El mapa no generalizado es una herramienta muy útil para el análisis de procesos biofísicos a nivel de municipios y subcuencas, Además, estas unidades pueden a través de algoritmos de evaluación de tierras convertirse en unidades de manejo a nivel de fbrmas de relieve, A continuación se incluye una síntesis de las características ambientales de las unidades de relieve generalizadas en el Cuadro 5.

Las unidades más representativas de la cuenca son las laderas suaves y muy suaves, las laderas inclinadas y escarpadas y la planicie, Ellas cubren el 65% de la cuenca, La clase que más superficie presenta corresponde a las laderas suaves y muy suaves con 1321 km² (33 % de la cuenca); la unidad está compuesta por depósitos superficiales, conos andesíticos, basaltos, conos de lava y ceniza, e ignimbritas, Los suelos que se desarrollan sobre la unidad son principalmente Vertisoles, Acrisoles, Luvisoles, Andosoles y Feozem, Su pendiente varía de algunos grados hasta 20°, Se ubica preferentemente entre los 1900 y los 2500 msnm, Considerando los datos de cobertura elaborados por¹ López et al. (2001) (escala 1:50,000) para 1975 y 2000, esta unidad presentó preferentemente cultivos de temporal, bosque templado y arbustos.

La segunda unidad en importancia corresponde a las laderas inclinadas y escarpadas, las cuales cubren una superficie de 711 km² (18 %). Se caracterizan por presentar pendientes superiores a los 20° y por ubicarse en un rango variado de altitudes desde los 1900 hasta los 2700 msnm; esta unidad se desarrolla sobre basaltos andesíticos, conos andesíticos, ignimbritas y conos de lava y ceniza, Los suelos representativos son Luvisoles, Acrisoles, Vertisoles y Feozem, Para 1975 y 2000 las laderas estaban cubiertas por bosque templado, cultivos de temporal, arbustos y pastizal.

5. Unw de reli Q realizad s de la O del E o de O itzeo. Los datos entre ■ ■ ■ sis correpo cop: a las superficies de coincidencia en je.

Relieve generalizado	Area en km ²	Area %	Geología	Suelos	Pendiente	Hipsometria	Cobertura 1975	Cobertura 2000
Planicie fluvio-lacustre	585.79	14.55	Depositos superficiales (80); Depositos de agua (18)	Vertisol (66); Luvisol (18); Luvisol (11)	0-3 (94)	< 1900 (88); 1900-2100 (1)	Cultivos de riego (70); cultivos de temporal (20)	Cobertura 2000 Cultivos de riego (70); cultivos de temporal (17)
Planicie fluvial	6.9	0.17	Depositos superficiales (63); Depositos de agua (22)	Vertisol (90); Luvisol (10)	0-3 (82); 3-6 (7)	2100-2300 (75); < 1900 (21)	Cultivos de riego (81); pastizal (7)	Cobertura 2000 Cultivos de riego (81); cultivos de temporal (15)
Planicie lacustre inundable	136.39	3.39	Depositos superficiales (77); Cuerpos de agua (18)	Luvisol (40); Luvisol (34); Luvisol (16); Luvisol (9)	0-3 (100)	< 1900 (98)	Lago (69); vegetación acuática (6)	Cobertura 2000 Lago (52); vegetación acuática (22); cultivos de agua (15)
Planicie lacustre inundable con depósitos de sal	39.17	0.97	Depositos superficiales (81); Cuerpos de agua (13)	Zolonehach (87)	0-3 (99)	< 1900 (100)	Vegetación acuática (92)	Cobertura 2000 Vegetación acuática (72); cultivos de agua (25)
Planicie montañosa con depósitos de sal	8.71	0.22	Depositos superficiales (75); Depositos de agua (17); Depositos de sal (6)	Luvisol (54); Luvisol (23); Luvisol (19)	0-3 (96)	< 1900 (100)	Lago (38); cultivos de pastizales (13); arbustos (23); cultivos de riego (11)	Cobertura 2000 Vegetación acuática (47); arbustos (23); cultivos de riego (11)
Piedemonte superior	57.24	1.42	Depositos superficiales (42); Depositos de agua (22); Depositos de sal (15); Depositos de sal (1)	Luvisol (58); Luvisol (29); Luvisol (7)	3-6 (30); 6-10 (27); 0-3 (24); 10-20 (16)	2300-500 (42); 2100-300 (27); 2500-700 (25)	Cultivos de riego (54); bosque (14); arbustos (17)	Cobertura 2000 Cultivos de riego (32); arbustos (14); bosque templado (28)
Piedemonte medio	196.32	4.88	Depositos superficiales (79); Depositos de sal (14)	Luvisol (61); Vertisol (26)	3-6 (40); 6-10 (28); 0-3 (21); 10-20 (10)	2100-2300 (53); 1900-2100 (27); 2300-2500 (18)	Cultivos de temporal (38); bosque templado (37); bosque templado (10)	Cobertura 2000 Arbustos (48); cultivos de temporal (18); bosque templado (4)
Piedemonte inferior	94.95	2.36	Depositos superficiales (54); Depositos de sal (28); Depositos de sal (14)	Luvisol (35); Luvisol (23); Luvisol (14); Luvisol (7)	0-3 (55); 3-6 (27); 6-10 (10)	1900-2100 (47); 2100-2300 (27); 2300-2500 (22)	Cultivos de temporal (55); cultivos de riego (19); arbustos (19)	Cobertura 2000 Cultivos de temporal (42); asentamientos humanos (20); cultivos de riego (18); bosque templado (9)
Piedemonte no diferenciado	169.59	4.21	Depositos superficiales (40); Depositos de sal (17); Depositos de sal (8); Depositos de lava y cenizas (8); Basaltos (7)	Luvisol (57); Luvisol (17); Luvisol (14)	0-3 (44); 3-6 (33); 6-10 (15)	1900-2100 (39); < 1900 (38); 2300-2500 (13)	Cultivos de temporal (35); cultivos de riego (23); bosque templado (16)	Cobertura 2000 Cultivos de temporal (38); bosque templado (7); bosque templado (8); asentamientos humanos (18)
Valle amplio	11.87	0.29	Depositos superficiales (26); Basaltos (20); Depositos de sal (7); Basaltos basálticos (7)	Luvisol (54); Luvisol (26); Luvisol (11)	0-3 (60); 3-6 (18); 6-10 (18); 10-20 (9)	< 1900 (40); 1900-2100 (32); 2100-2300 (27)	Cultivos de temporal (42); bosque templado (1); pastizal (16)	Cobertura 2000 Cultivos de temporal (42); bosque templado (1); pastizal (16)

Relieve generalizado	N ₂	Area %	Geología	Suelos	Pendiente	Altimetría	Cobertura 1975	Cobertura 2000
Valle estrecho	9.25	0.23	Volcanes monogenéticos (91)	Vertisol (9); Andosol (8); Andosol (9)	10-20 (34); 20-30 (17); 6-10 (16); 3-6 (13); 0-3 (11)	2100-2300 (62); 1900-2100 (32)	Arbustos (49); bosque templado (10); cultivos de temporal (21); cultivos de temporal (29); cultivos de temporal (1)	Bosque templado (59); arbustos (31); asentamientos humanos (30)
Cota de lava	40.15		Volcanes monogenéticos (91)	Vertisol (9); Andosol (8); Andosol (9)	0-3 (73); 3-6 (15)	2100-2300 (62); 1900-2100 (32)	Bosque templado (65); arbustos (32)	Bosque templado (59); arbustos (31); asentamientos humanos (30)
Cono volcánico	33.65	0.84	Volcanes monogenéticos (91)	Vertisol (9); Andosol (8); Andosol (9)	10-20 (36); 6-10 (17); 20-30 (16); 0-3 (11); >30 (10)	2100-2300 (36); 2300-2500 (26); 1900-2100 (17)	Bosque templado (3); arbustos (29)	Bosque templado (59); asentamientos humanos (20); Arbustos (30)
Elevaciones aisladas	17.86	0.44	Depósitos lacustres (40); depósitos superficiales (25); conos de lava y cenizas (18); ignimbritas (6)	Vertisol (61); Feozem (36)	0-3 (84); 3-6 (5)	< 1900 (83); 1900-2100 (17)	Asentamientos humanos (28); cultivos de riego (21); cultivos de temporal (20); arbustos (19)	Asentamientos humanos (65); cultivos de temporal (17); arbustos (13)
Laderas muy suaves y suaves	1320.91	32.81	Depósitos superficiales (16); conos andesíticos; basaltos (10); conos de lava y cenizas (10); ignimbritas (10)	Vertisol (40); Andosol (15); Andosol (14); Andosol (14); Andosol (11)	6-10 (27); 3-6 (27); 10-20 (23); 0-3 (18)	1900-2100 (39); 2100-2300 (31); 2300-2500 (13)	Cultivos de temporal (43); arbustos (24); bosque templado (9)	Cultivos de temporal (35); arbustos (24); bosque templado (9)
Laderas inclinadas y escarpadas	710.53	17.65	Basaltos andesíticos (25); conos andesíticos; basaltos (20); conos de lava y cenizas (10); ignimbritas (6)	Vertisol (49); Luvisol (19); Feozem (10); Andosol (9); Andosol (8)	0-3 (45); 3-6 (3); 6-10 (13); 0-3 (2); 3-6 (2)	2100-2300 (32); 2300-2500 (26); 1900-2100 (16); 2500-2700 (13)	Bosque templado (58); arbustos (29); cultivos de temporal (12)	Bosque templado (58); arbustos (29); cultivos de temporal (12)
Mesa volcánica	215.26	5.35	Volcanes monogenéticos (30); ignimbritas (17); depósitos superficiales (15); basaltos (10); domos dacíticos y riolíticos (6)	Vertisol (34); Luvisol (18); Andosol (16); Andosol (14)	0-3 (37); 3-6 (30); 6-10 (18); 10-20 (12)	2100-2300 (45); 1900-2100 (32); 2300-2500 (14)	Cultivos de temporal (47); pastizal (18); arbustos (16); bosque templado (15)	Cultivos de temporal (34); arbustos (30); pastizal (16); bosque templado (12)
Superficie cumbrial	49.22	1.22	Depósitos superficiales (23); ignimbritas (14); basaltos (14); depósitos de lava y cenizas (12); depósitos lacustres (8)	Vertisol (34); Luvisol (18); Andosol (16); Andosol (14)	0-3 (37); 3-6 (30); 6-10 (18); 10-20 (12)	2100-2300 (48); 2300-2500 (3); 2500-2700 (11)	Cultivos de temporal (53); arbustos (20); bosque templado (17); bosque templado (8)	Cultivos de temporal (40); arbustos (27); bosque templado (11)

La planicie, tercera clase en importancia, representa el 15% (586 km²) ubicada a menos de 1900 msnm y con pendientes inferiores a 3°, La planicie se conforma por depósitos superficiales (aluviales) y lacustres, sobre los cuales se desarrollan Vertisoles, Feozem y Luvisoles., Sobre estos suelos se practica actividad agrícola intensiva tanto de riego como de temporal

Erosión y erosión potencial

Como parte de la interpretación de formas de relieve de 1975 y de cobertura vegetal del 2000 se cartografió a la clase erosión, Por erosión entendemos las zonas de erosión severa; principalmente en cárcavas (detectable por medio de técnicas de percepción remota)..

Esta clase sólo se presenta en 8,8 km² (0,22%) de la cuenca en 1975 y se incrementó a 15 3 km² (0,38%) de la cuenca en 2000., Es decir; casi se duplicó su superficie en 25 años; sin embargo; a nivel de cuenca sólo se incremento en un 0,16 %.,

La erosión se localiza preferentemente sobre depósitos superficiales (41%); ignimbritas (13%); volcanes monogenéticos (10%) y conos andesíticos (9%),. Los suelos que principalmente se desarrollan dentro de la cuenca son Acrisoles (55 %); Vertisoles (13 %); Luvisoles (11%) y Planosoles (9%), Las pendientes predominantes de las áreas con erosión son de 6 a 10° (37%); de 3 a 6° (30%); de 10 a 20° (18%) y de 0 a 3° (13%),. Las formas de relieve en donde se localiza son las colinas con laderas muy suaves convexas (22%); colinas con laderas suaves convexas (16%); lomerío bajo con laderas muy suaves irregulares (8%); colinas con laderas suaves irregulares (8%) y colinas con laderas muy suaves rectilíneas (8%). Se observa que en general se desarrollan sobre paisajes geomorfológicos de colinas (66%) y sobre laderas suaves y muy suaves y en consecuencia el 85 % de las zonas erosionadas se ubica por debajo de los 2100 msnm.,

El análisis de la distribución de cárcavas o erosión severa, indica que los municipios con la mayor superficie erosionada fueron en orden ascendente en 1975: Chato, Morelia, Lagunillas, Acuitzio del Canje y Huiramba; para el año 2000 los municipios más afectados fueron: Zinapecuai, Lagunillas, Tarimbaro, Indaparapeo, Morelia y Huiramba (Figura 10),. Estos datos indican que los municipios con mayores problemas son aquellos localizados en la porción sur de la cuenca, y a excepción del municipio de Morelia, todos ellos con densidades, relativamente bajas de población.,

La erosión se asocia principalmente a los municipios medianamente poblados (50 a 100 hab/km²) y altamente, densificados (>350 hab/km²) (caso del Municipio de Morelia),. Es probable que el crecimiento de la Cd, de Morelia esté favoreciendo la degradación por cárcavas del municipio y de los municipios cercanos,

De las 53 subcuencas, 43 presentaron algún porcentaje de erosión; sin embargo las subcuencas más afectadas por erosión en cárcavas fueron cuatro en 1975: Arroyo Colorado, San Andrés, Atécuaro y el Pedregal, localizadas en el sector suioccidental de la cuenca., En el año 2000 las 6 subcuencas más afectadas fueron: Santa Inés, Cápula, Fontezuelas, Arroyo Colorado, San Lucas y Atécuaro (sector sur de la cuenca) (Figura 11). La erosión se presenta principalmente en subcuencas con densidades de población relativamente bajas

(hasta 100 hab/km²). Se observa que el desarrollo de superficies erosionadas se presenta en las subcuencas con menor densidad de población,

La caracterización permite reconocer que el problema de la erosión en la cuenca no está generalizado; es decir; no representa una superficie considerable; y está muy bien localizado en algunos municipios y subcuencas,

Esta primera caracterización permite generar un modelo espacial de erosión potencial; relativamente simple que ha sido utilizado con éxito anteriormente (Boceo; 1990a; Boceo et al., 1990b), Esta primera aproximación al modelamiento de la erosión potencial se basa en el uso intensivo de técnicas de sobreposición y reclasificación de bases de datos espaciales y tabulares dentro del marco de un SIG,

Con la distribución espacial de las zonas de erosión; éstas se caracterizaron por medio de sobreposición cartográfica,, La base de datos espacial de erosión se cruzó con las bases de datos de geología generalizada; suelos generalizados; pendientes; hipsometría y de unidades de relieve,, Este modelamiento permitió reconocer las características de las zonas donde la erosión está presente en la cuenca. Una vez caracterizada la erosión; se procedió a evaluar las clases por tema y reclasificar los mapas temáticos antes mencionados,, Cada mapa temático se convirtió en un mapa que representaba sitios de erosión potencial (según el tema), Luego estos mapas mediante álgebra booleana se conjuntaron para conformar un mapa de erosión potencial de la cuenca. El modelo aplicado indica que un 13% de la cuenca se tiene las características ambientales de las zonas de erosión (alrededor de 500 km²); en consecuencia; esta es el área con posibilidades de presentar este tipo de erosión. Es decir; la superficie con la erosión potencial es 56 veces la superficie observada con presencia de erosión en 1975,,

CONCLUSIONES

En relación a la información geomorfométrica, la conclusión más importante es que el 90 % de la cuenca tiene pendientes menores a 20°, y se encuentra por debajo de los 2,500 msnm, y como consecuencia la densidad de drenaje es a lo sumo moderada,

El levantamiento geomorfológico regional permitió diferenciar a la cuenca en 6 grandes unidades, las cuales definen que la unidad hidrológica está conformada principalmente por colinas; lomeríos altos y planicie,, Geológicamente el relieve está conformado por materiales volcánicos de composición intermedia a básica, con edades que varían desde el Mioceno hasta el Cuaternario,, -Las características del sustrato han definido un escurrimiento predominante relativamente bajo y permiten clasificar a los materiales rocosos en la clase de consolidados con posibilidades bajas para almacenamiento de agua, El nivel semidetallado del levantamiento permite concluir que las formas de relieve de la cuenca pueden ser descritas como laderas suaves y muy suaves, laderas inclinadas y escarpadas y planicie, las cuales cubren el 65 % de la cuenca,,

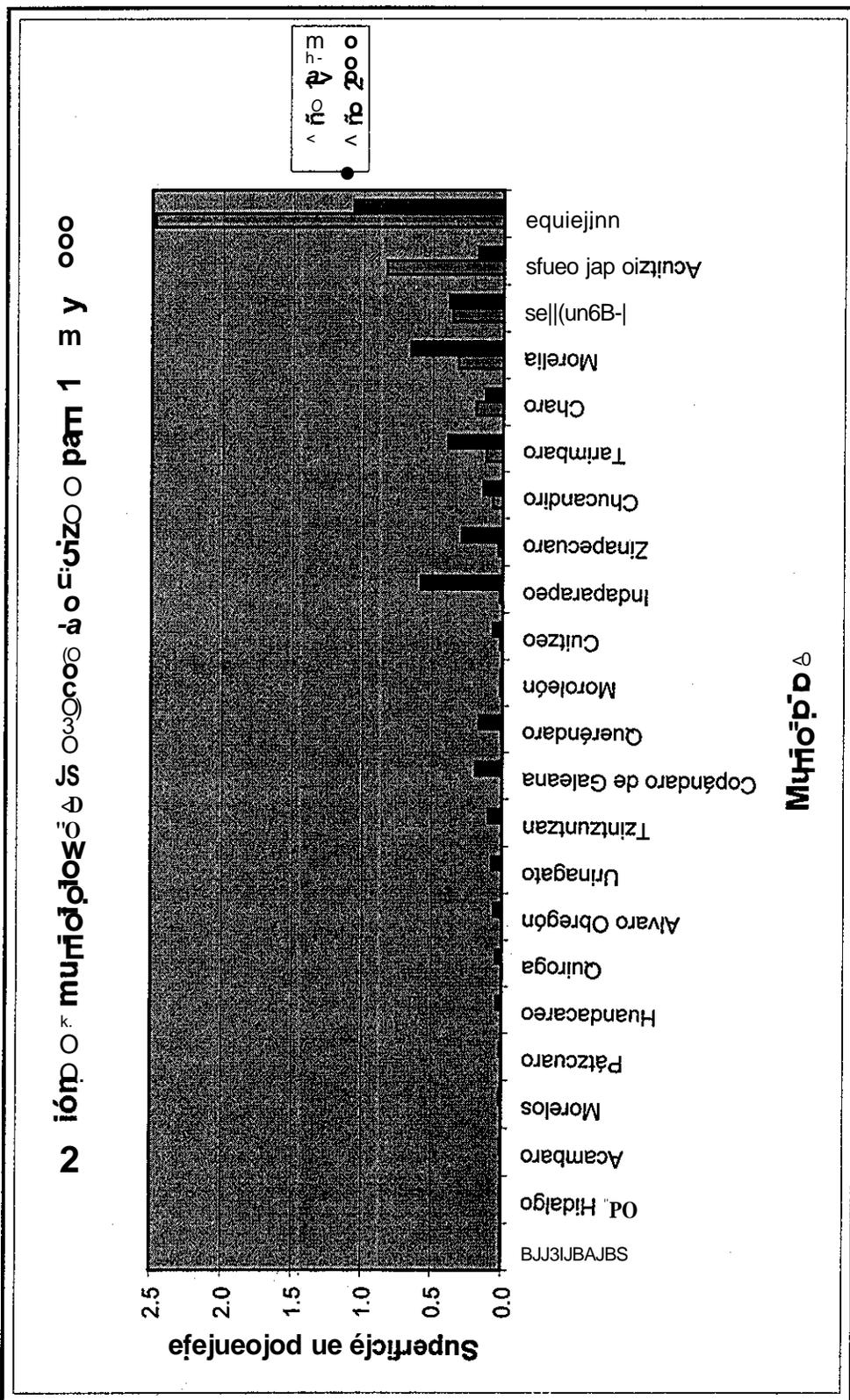
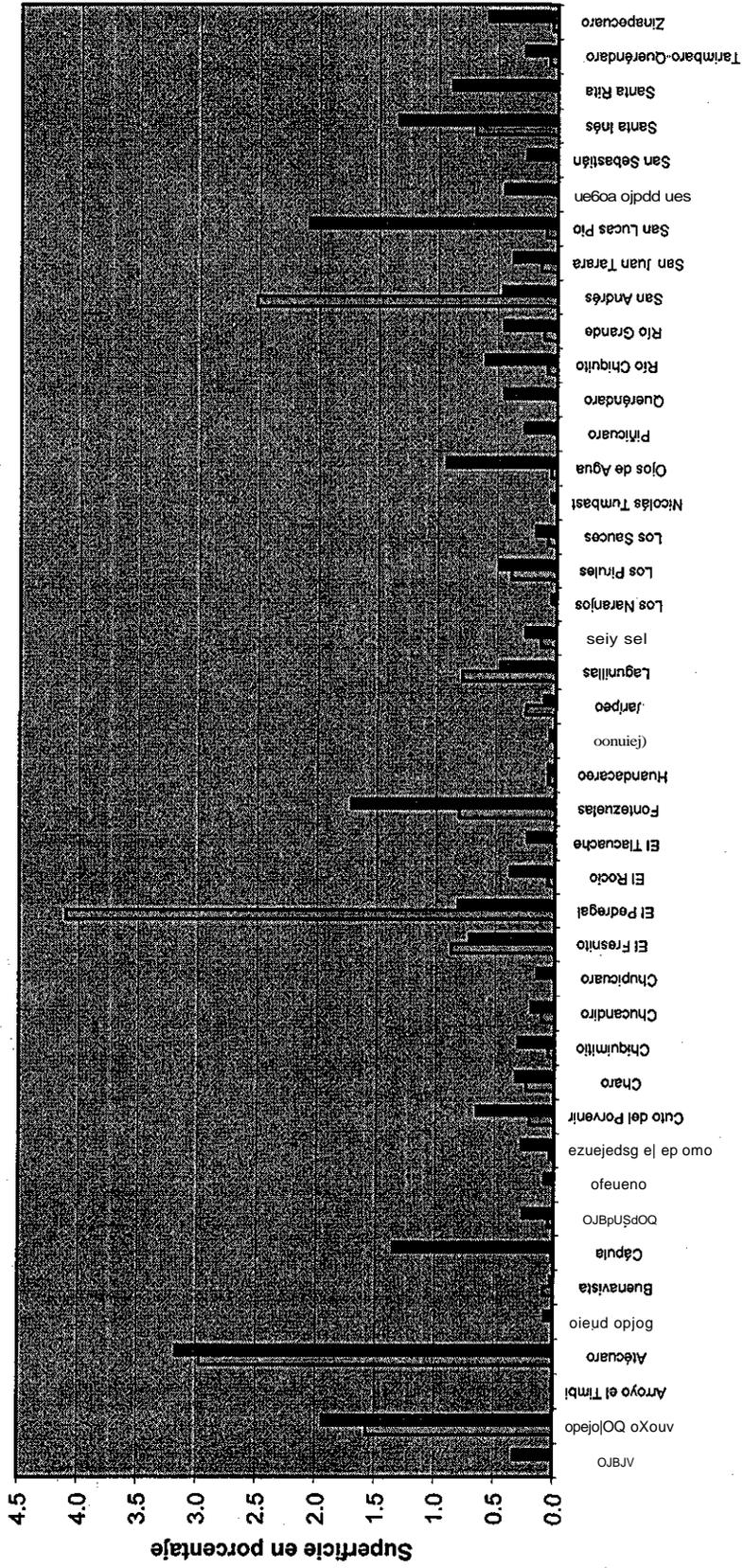


Figura 10. Porcentaje erosión en la cuenca por municipio y por año.

Estudio de la capacidad de almacenamiento de agua para 1975 y 2000

■ Año 075
■ Año 000



S o u r c e

11 Datos por subcuencas para 1975 y 2000.

En relación a la erosión y su modelamiento los resultados permiten concluir que el problema de la erosión en la cuenca no está generalizado; es decir; no representa una superficie considerable; y está muy bien localizado; contrariamente a lo especulado en años recientes (véase entre otros, Noriega, 1993). Las subcuencas más erosionadas están en los alrededores de la Cd. de Morelia (Anoyo Colorado, Atécuaro y San Lucas Pío); y en dos Municipios (Huífamba y Morelia), Sin embargo, las características físicas de la cuenca aunado a las prácticas de manejo; podrían incrementar de manera considerable la superficie erosionada (56 veces más); especialmente si se considera el incremento en el número de cabezas de ganado bovino y caprino, el número de cabezas de ganado bovino se incrementó 53,627 cabezas y el caprino duplicó su número pasando de 14,955 a 32,065 cabezas en el periodo 1970-2000 (Acosta, 2001),

Por último, la regionalización geomorfológica sirvió de base para definir las unidades de la regionalización ecológica de la cuenca, las cuales son potencialmente unidades de manejo de recursos naturales (Boceo y Ortiz 1994; Boceo et al., 2001), Esta delimitación es fundamental en el proceso de evaluación de tierras y del posterior marco de ordenamiento territorial elaborado recientemente (Pulido et al., 2001; Ortega, 2001). Este tipo de información permite concentrar los esfuerzos en restauración de suelos, en aquellas áreas donde este problema es realmente importante.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo* el cual se realizó en la UNAM-Campus Morelia. Agradecemos las sugerencias proporcionadas por tres referís anónimos, El primer autor agradece el apoyo proporcionado por el CONACyT y la UNAM a través de las becas de doctorado recibidas

REFERENCIAS

Acosta Villegas, A, 2001. *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Biología, UMSNH.

Boceo, G, 1990. *Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems. A case study in central México*. PhD thesis. Universidad de Amsterdam-irC. Enschede, the Netherlands: 130 p.

Boceo, G. I. Palacio y C.R. Valenzuela., 1990., Gully erosion modelling using GIS and geomorphologic knowledge., *ITC Journal 3*: 253-261.

Boceo, G. y H. Riemann, 1997., Quality Assessment of Polygon Labeling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 63 (4)*: 393-395.

Boceo; G, y M.A. Oitiz P. 1994., Definición de unidades espaciales para el ordenamiento ecológico. *Jaina \$ (1)*:8-9.

Boceo; G., 1984., Cartografía geomorfológica del Bajío y porciones adyacentes; 1:250;000., *Boletín del Instituto de Geografía 14:9 - 42*, UNAM México.

Boceo; G.; ME., Mendoza y A., Velázquez; 2001, Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - A tool for land use planning in developing countries, *Geomorphology* 39: 211-219.

Gallant, A.L., IR Whiter, D.P. Larsen, J.M. Omeinik y R.,M.Hughes, 1989. *Regionalization as a tool for managing environmental resources*. Environmental Protection Agency. Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon. USA: 152 p,

Guerra-Peña; F, 1980. *Fotogeología*. Facultad de Ingeniería; Universidad Nacional Autónoma de México: 337 p.

Lamadrid-Maron; T y R Horta-Carballal; 1984. *Geomorfología*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana; Cuba: 166 p.

Lugo-Hubp; J.I.; 1988 *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*. Instituto de Geografía; Universidad Nacional Autónoma de México: 128 p,

López-Granados, E. (En preparación). *Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán*. Tesis Doctoral en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, UNAM,,

Meijerink, A.Mi., 1988,, Data acquisition and data capture through terrain mapping units,, *ITC Journal ITC Publication 7* Enschede, the Netherlands: 23 - 44.

Mendoza; ME y G Boceo; 1998a. El relieve y las políticas de uso de suelo: el caso de la costa sur de Sonora. *Jaina* 9 (4): 2 -3.

Mendoza; ME, y G. Boceo, 1998b.. La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica. *Serie Varia 17* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México: 25-55.

Noriega, A.G., 1993.. *Degradación ecológica de los suelos del Estado de Michoacán*. UACH. Inédito.

Ortega, JM. 2001, Esquema de ordenamiento territorial. En: Mendoza, M., E. López-Granados y G. Boceo, 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: 266 pp,

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.

Pulido, J., J Péiez y S, Martínez, 2001,, Evaluación de Tierras para fines agrícolas y forestales.. En: Mendoza, M., E. López-Granados y G. Boceo, 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: 266 pp,

USDA, 1995, *Guidelines for the Use of Digital Imaginary for Vegetation Mapping*, Washington, D.C..

Valenzuela; C; 1991. *Introduction to Geographical Information Systems*. Enschede; The Netherlands:212p

Van Zuidam; R. y F.I.; Van Zuidam-Cancelado; 1979 *Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs* ITC Books VII-6; Enschede; The Netherlands: 309 p.

Verstappen, H. Th. y R. Van Zuidam; 1991. *The ITC System of Geomorphologic Survey. A basis for the evaluation on natural resources and hazards*. ITC publication No. 10. Enschede; The Netherlands: 89 p.

Verstappen; H. Th.; 1964 *Manual de Fotointerpretación; Tomo VII Fotografías Aéreas en Geología y Geomorfología; Capitulo VIII (Fase. I) Elementos de Fotogeomorfología*. ITC. Enschede; the Netherlands 53 p.

Walsh; S.J.; 1985. Geographical information system for natural resource management, *Journal of Soil and Water Conservation*; 40: 202 - 205.

Zinck; J.A.; 1988. *Physiography and Soils*. Soil Survey Course. ITC. Enschede; The Netherlands: 156p,

Zonneveld; I.S.; 1979. *Land Evaluation and Land(Scape) Science. Lectures of Land(Scape) Science; Land(Scape) Survey and Land Evaluation (Pragmatic Land Classification)*. Textbook VII4. ITC. Enschede; the Netherlands: 134 p.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Capítulo 5

Evaluación de la calidad espacial y temporal de estaciones meteorológicas. El caso de la cuenca de Cuitzeo* .

Resumen

En este trabajo se presenta una caracterización espacial y temporal de las estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca de Cuitzeo y sus alrededores. El análisis de las 42 estaciones se realizó utilizando técnicas de sobreposición cartográfica en un SIG diseñado para tal efecto, así como con técnicas estadísticas básicas (correlación, análisis de varianza y series de tiempo). Los resultados atrojan que el monitoreo de precipitación y la temperatura es moderadamente bueno, pero presenta serias deficiencias en la distribución de estaciones por tipo de cobertura y altitud. En consecuencia la distribución actual de las estaciones responde a criterios agroclimáticos y no de manejo de recursos naturales. La distribución espacial de los grupos agregados del análisis de varianza, muestran claramente un gradiente térmico y de humedad. La precipitación se incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura, asciende desde el sur hacia el norte. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado secos a climas templado húmedo.

Abstract

In this article a spatial and temporal characterization of meteorological stations located in Cuitzeo's watershed and surroundings areas is presented. Forty two stations were analyzed using cartographic overlying in a GIS; as well as basic statistics techniques (conelation, anova and times series analyses). Results indicate that rainfall and temperature monitoring is fairly good, but the location of the stations is deficient in relationship land cover and altitude distribution. As a consequence, the current spatial distribution of meteorological stations obeys to agroclimatic criteria, and no natural resources management criteria are used. The spatial distribution of aggregated groups of the analysis of variance shows a thermal and wet gradient. Precipitation increase from north to south, and temperature increase from south to north. The spatial distribution of this parameters shows that the study area is located in a transitional zone, between dry temperate climates and wet temperate climates.

INTRODUCCIÓN

En países subdesarrollados, la distribución y densidad de estaciones climáticas es una limitante en la construcción de modelos climáticos e hidrológicos. De igual manera la cantidad y calidad de los datos es una variable que afecta los resultados del modelamiento. Las estaciones climáticas deben ubicarse espacialmente en lugares que representen las características físicas de las cuencas. El número de estaciones y su ubicación dependen, de varios factores, entre estos figuran el

* Manuscrito enviado a *Serie Varia*, Instituto de Geografía-UNAM. Autores: Manuel E. Mendoza, Gerardo Boceo y Miguel Bravo

tamaño de la cuenca, el tipo de precipitación que domina en el área, la foima de la precipitación, variabilidad altitudinal, topografía y de la cobertura vegetal y uso del suelo,.

La evaluación de estos datos es vital, en países subdesarrolladós, principalmente en cuencas que rio cuentan con datos de aforos de escorrentía,., En este trabajo se planteó realizar la evaluación de la calidad espacio-temporal de datos meteorológicos que son útiles en la construcción de modelos cambio climático, hidrológicos y de aptitud de tierras que puedan ser aplicados en países en vías de desarrollo (Villers y Trejo, 1998; Seguin *etal*, 1989; Zuviría, 1992),

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca cerrada del lago de Cuitzeo se localiza en el Sistema Volcánico Tiasmexicano y ocupa una superficie cercana a los 4,000 km² (Figura 1),. La cuenca se caracteriza por albergar en su interior el segundo lago de la República Mexicana (300 km²) y a la capital del estado de Michoacán (Morelia),.

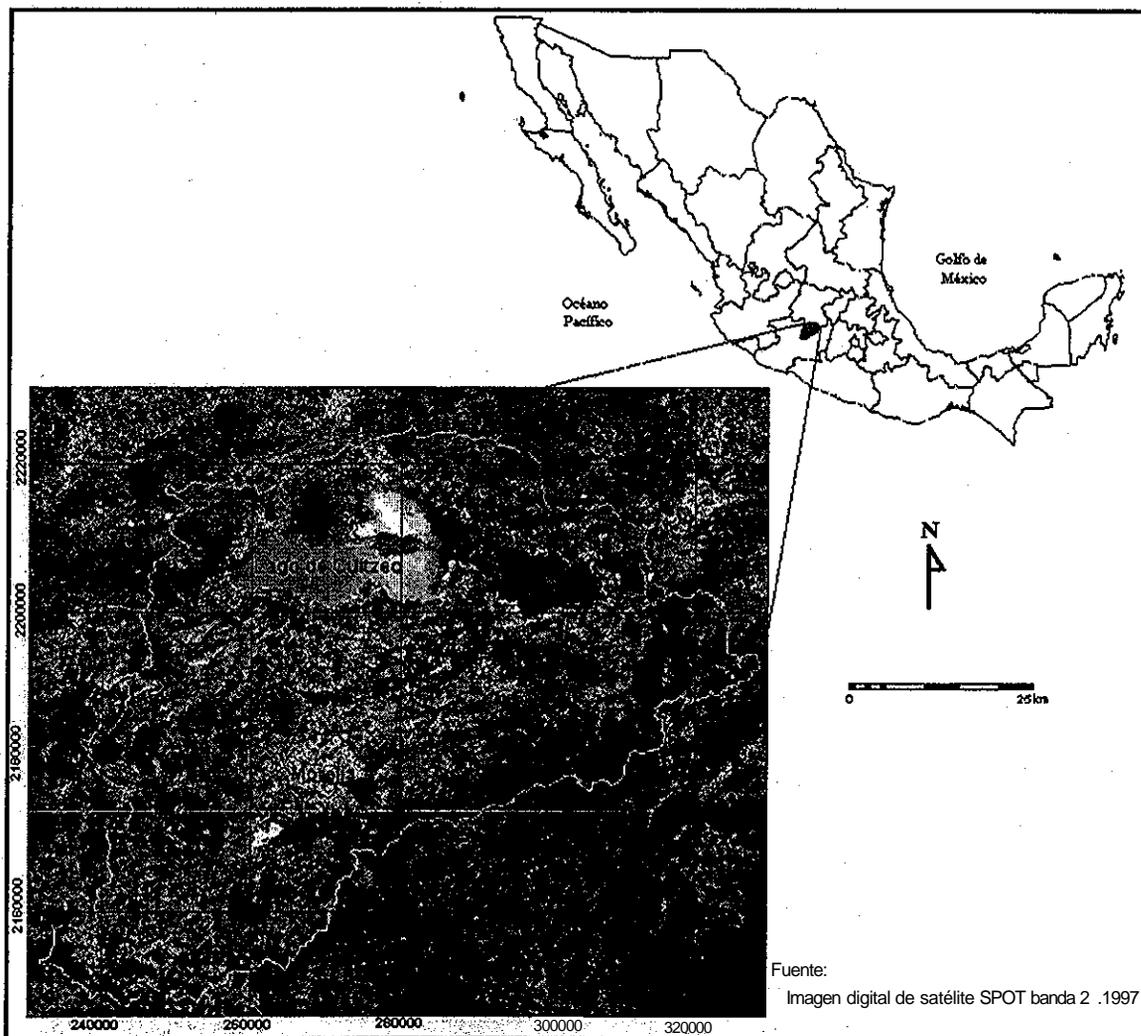


Figura 1. Área de estudio.

La cuenca está conformada por colinas, lómeños altos conformados por materiales volcánicos de diversas composiciones mineralógicas de edad Miocénica a Cuaternaria; y planicies desarrolladas sobre materiales lacustres y aluviales. Los suelos predominantes son Vertisoles, Luvisoles y Andosoles (Mendoza *et al*, en prensa). La cobertura vegetal predominante corresponde a las clases matorrales, bosque y cultivos (López *et al*, en prensa). En la cuenca, la precipitación media anual es de 847,4 mm, mientras que la temperatura media anual es 17,3°C,

MÉTODOS Y MATERIALES

Calidad espacio - temporal y análisis de áreas de influencia

El análisis temporal de la red meteorológica, consistió en un conteo de la cantidad de años de registro de temperatura media anual y precipitación media anual, para agrupar a las estaciones con periodos de registro de diez años.

El análisis espacial consistió en el cálculo de la superficie cubierta por la red meteorológica para la cuenca, tomando en cuenta las normas de densidad de la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.). La O.M.M ha definido para México cinco regiones: a) llanas tropicales, b) llanas templadas, c) montañosas templadas, d) montañosas tropicales, e) regiones áridas (Jáuregui, 1973). Según las normas, la cuenca de Cuitzeo se localiza en una región montañosa y como mínimo necesita que cada estación cubra una superficie de 250 km², con lo cual la red debería constar de 16 estaciones homogéneamente distribuidas. Mientras que el rango óptimo, cada estación debe cubrir 100 km²; la red pluviométrica debería contar con 40 estaciones homogéneamente distribuidas (Jáuregui, 1973). Tomando como base estos criterios se realizó un análisis de zonas de influencia (buffers). Es una operación realizada en el SIG que permite cuantificar un área circular a una estación; en este proceso se calcula la superficie del círculo ($S = \pi r^2$).

En ella se utilizaron radios de seis y nueve kilómetros para cuantificar la superficie cubierta por cada estación. Con un radio de seis kilómetros se cubren 100 km² de superficie, y con radio de nueve kilómetros se cubren 250 km² de superficie, cumpliéndose con las normas de la O.M.M. De esta manera se obtuvo la superficie cubierta por la red meteorológica estatal; los resultados se reportan en área y porcentaje cubiertos.

Sobreposición cartográfica

Se caracterizó la distribución de estaciones por sobreposición cartográfica en el SIG. La caracterización se realizó cruzando la base de datos de puntos de las estaciones meteorológicas analizadas con los diversos mapas temáticos que conforman el sistema de información geográfica de la cuenca de Cuitzeo.

Análisis estadístico

Con objeto de entender la estacionalidad climática de la cuenca y el arreglo espacial de las estaciones meteorológicas, se realizaron varios análisis, de probabilidades, de variabilidad y

temporalidad de la precipitación, así como un análisis de varianza de una vía de la precipitación, temperatura y del índice de Severidad de la Sequía de Palmer,,

La idea central del índice de Severidad de la Sequía (PDSI, por sus siglas en Inglés) o simplemente índice de Palmer es que la cantidad de precipitación requerida para la operación normal de un ecosistema, ciudad o zona agrícola durante un período depende del clima promedio de área y de las condiciones prevalecientes antes y durante el periodo en cuestión (Alcántara, 2002,,). La diferencia entre la precipitación real y la precipitación climáticamente apropiada para las condiciones existentes representa una medida directa de la influencia que tiene la humedad a lo largo del tiempo con respecto a la normal. La ponderación de las diferencias genera un índice que razonablemente comparable tanto en el tiempo como en el espacio (Palmer 1964), El método de Palmer comienza con un cálculo del balance hídrico el cual utiliza registros históricos de precipitación y temperatura,,

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización espacial y temporal de las estaciones meteorológicas

Dentro de la cuenca y en sus alrededores se ubican 42 estaciones, del total de estaciones analizadas, 23 se localizan dentro de la cuenca (Cuadro 1, Figura 2). La distribución de estaciones por rangos de precipitación y temporalidad de la toma de datos se presenta en las Figuras 3 y 4,, Los intervalos de años con mayor número de estaciones son: 20-30, 30-40,10-20 y 40-50,, Las estaciones, principalmente presentan medias mensuales entre 600 y 900mm, es decir, del total de estaciones, 34 presentan precipitaciones menores o iguales 900 mm.

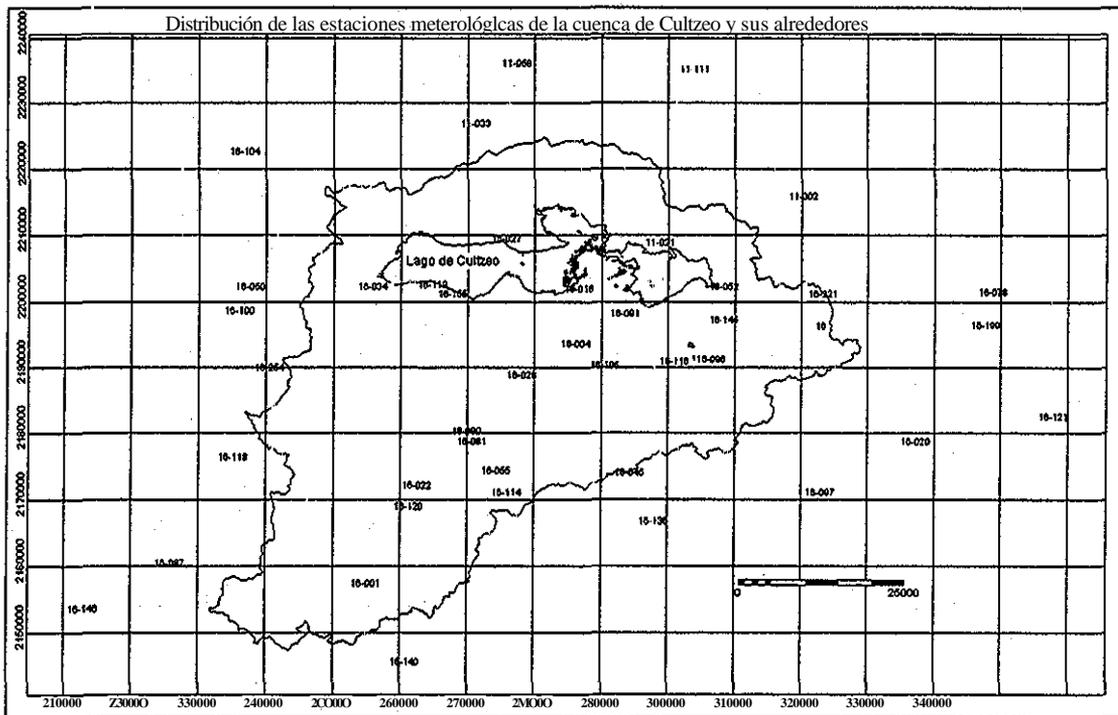


Figura 2. Distribución de estaciones meteorológicas de la cuenca de Cuitzeo y sus alrededores

Cuadro 1, Estaciones meteorológicas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo * Veintitrés estaciones se localizan en el interior de la cuenca, Cinco estaciones pertenecen al estado de Guanajuato (11) y el resto a Micfaoacán (16)

No. estación	Nombre	Clave
1	Acámbaro	11002
2	Íramuco*	11021
3	Moroleón	11033
4	Yuriria	11058
5	Salvatierra	11111
6	Acuitzio de Canje*	16001
7	Alvaro Obregón*	16004
8	Carrillo Puerto*	16016
9	Cd. Hidalgo	16020
10	Cointzio*	16022
11	Cuitzeo*	16027
12	Cuitzillo Grande*	16028
13	Chucándiro*	16034
14	El Temazcal Morelia	16045
15	Huaniqueo	16050
16	Huingo*	16052
17	Jesús del Monte*	16055
18	Maravatio	16078
18	Morelia SMN*	16080
20	Morelia centro*	16081
21	Pátzcuaro	16087
22	Planta de Bombeo Zinzimeo*	16091
23	Presa Malpaís*	16096
24	Pucuateo	16097
25	Puente San Isidro	16100
26	Puruándiro	16104
27	Quirio*	16105
28	San Miguel del Monte*	16114
29	San Sebastián Queréndaro*	16116
30	Santa Fé Quiroga	16118
31	Santa Rita*	16119
32	Santiago Undameo	16120
33	Senguio	16121
34	Tzitzio	16136
35	Villa Madero	16140
36	Zinapecuaro*	16145
37	Zirahuen	16146
38	Copándaro de Jiménez*	16155
39	San Miguel Curahuango	16199
40	Ucareo*	16221
41	Teremendo Morelia	16254
42	Jaripeo*	16

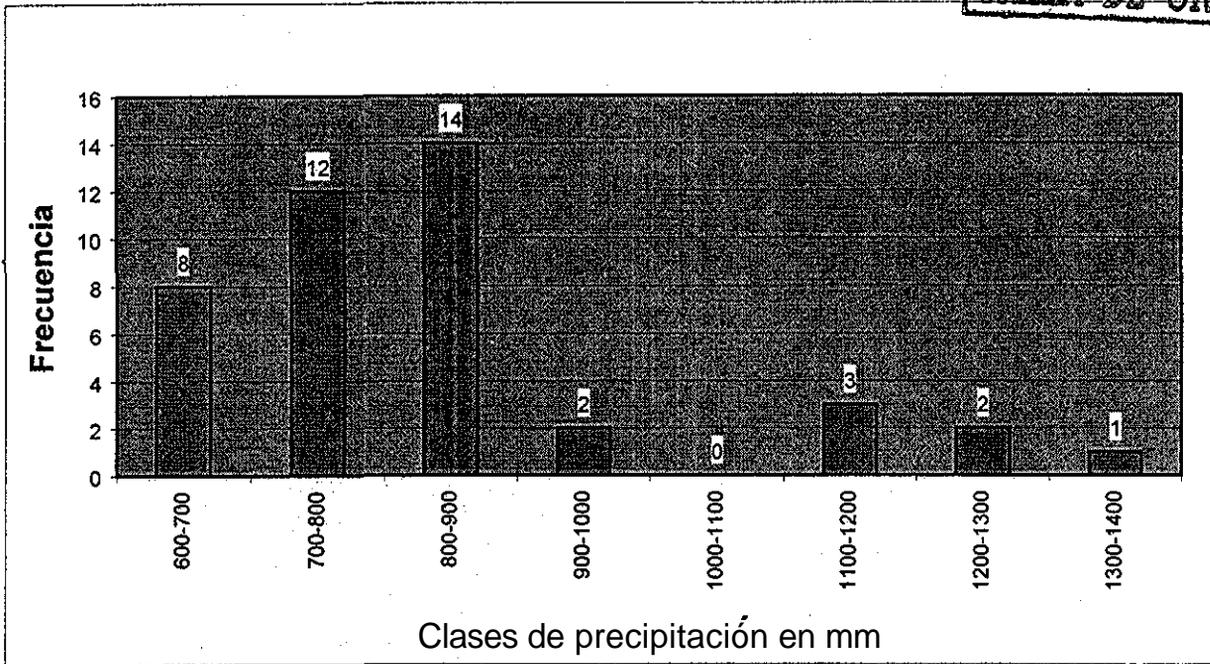


Figura 3.. Distribución de estaciones meteorológicas por clases de precipitación,

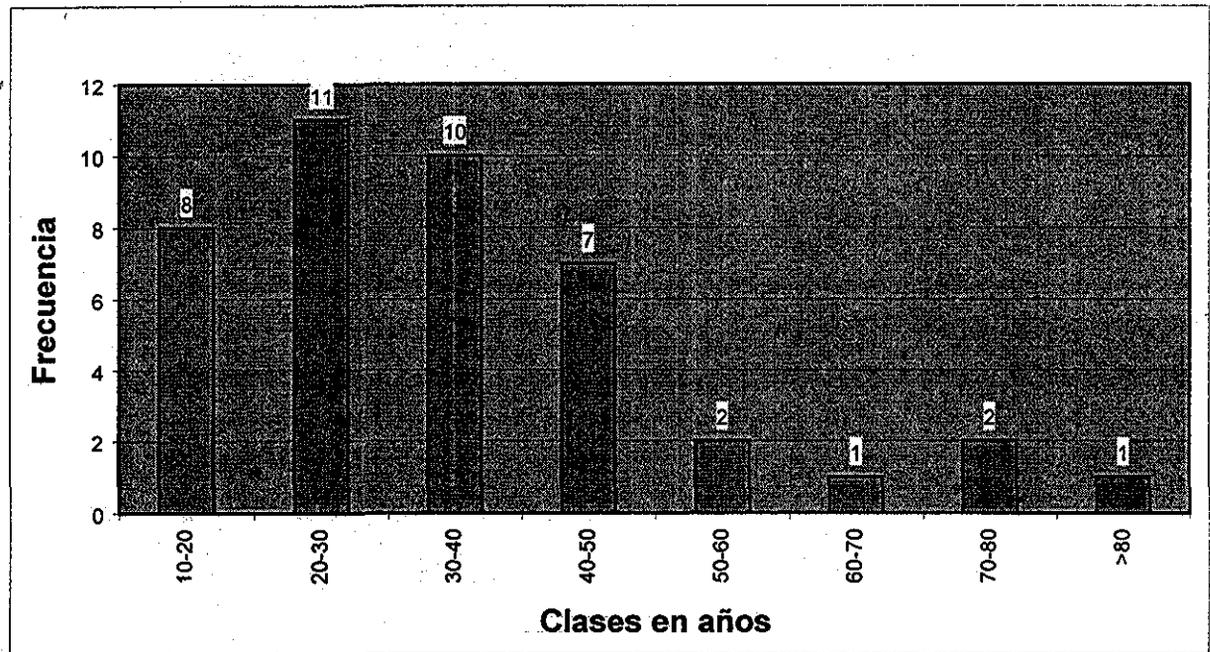


Figura 4, Distribución de estaciones meteorológicas por clases de años.

La catacteiización espacial mostró que las estaciones meteorológicas se localizan en un 39% sobre depósitos superficiales o aluviones, 17% sobre depósitos lacustres, alrededor del 13% en depósitos de caída y el resto sobre diversos materiales volcánicos (Figura 5). Las estaciones meteorológicas se asientan en un 39% sobre Vertisoles, 22% sobre Feozems, 13% sobre

Acrisoles y 13% sobre Luvisoles (Figura 6). Respecto a los paisajes geomorfológicos, el 61% se localiza sobre colinas, el 26% sobre la planicie, el 9% en piedemontes y el 4% (1 estación) en lomeríos altos (Figura 7). El 30% de las estaciones se ubican en diverso tipos de unidades de relieve de piedemontes, el 26% sobre planicies, 34% sobre laderas suaves y muy suaves, 4% sobre laderas inclinadas a escarpadas y el 4% restante sobre mesas (Figura 8). En relación a la posición altitudinal de las estaciones el 45 % se localizan por debajo de los 1900 msnm, el 40% entre los 1900 y 2100 msnm, un 14 % por arriba de los 2100 y antes de los 2700 msnm (Figura 9). Por último, con relación a las pendientes, las estaciones se ubican preferentemente en pendientes inferiores a los 3° (56 %), entre 3-6° (17%), entre 6 - 10° (13%) y entre 10-20° (9%), solo existe una estación en pendientes superiores a 30° (4 %) (Figura 10),

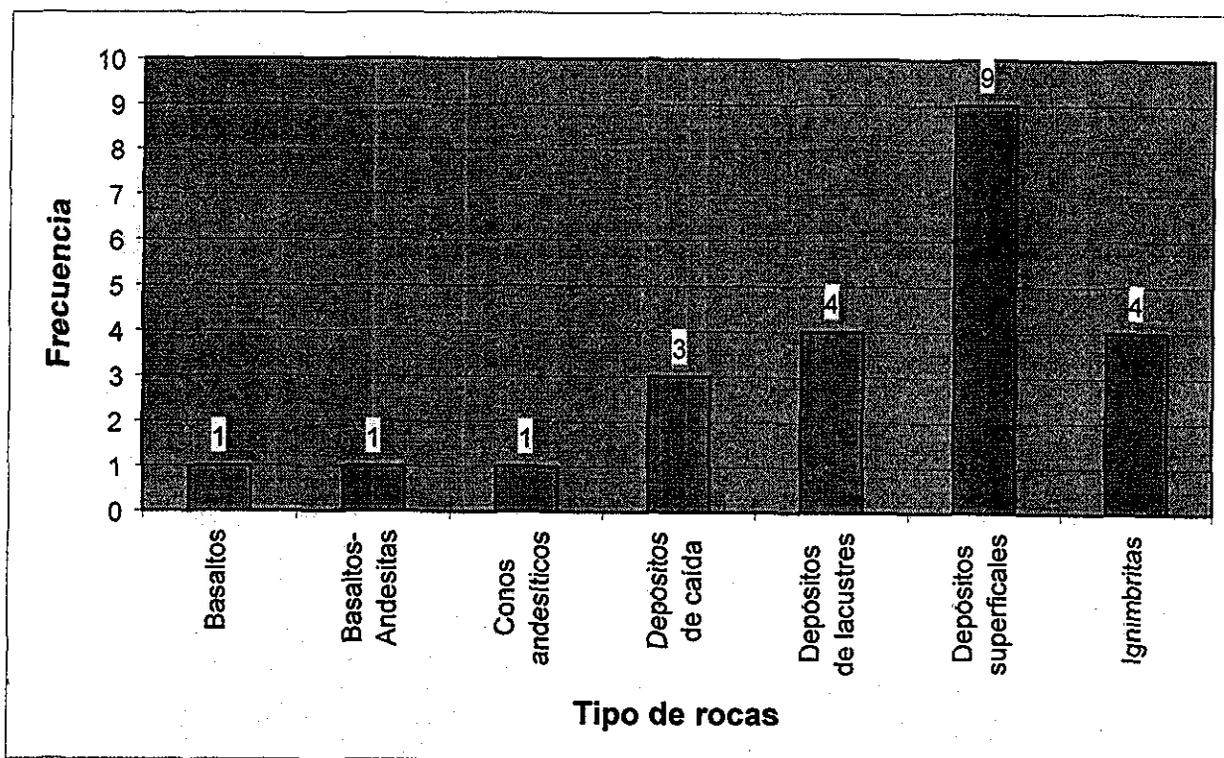


Figura 5, Frecuencia de estaciones meteorológicas por tipo de roca en la Cuenca del Lago de Cuitzeo,

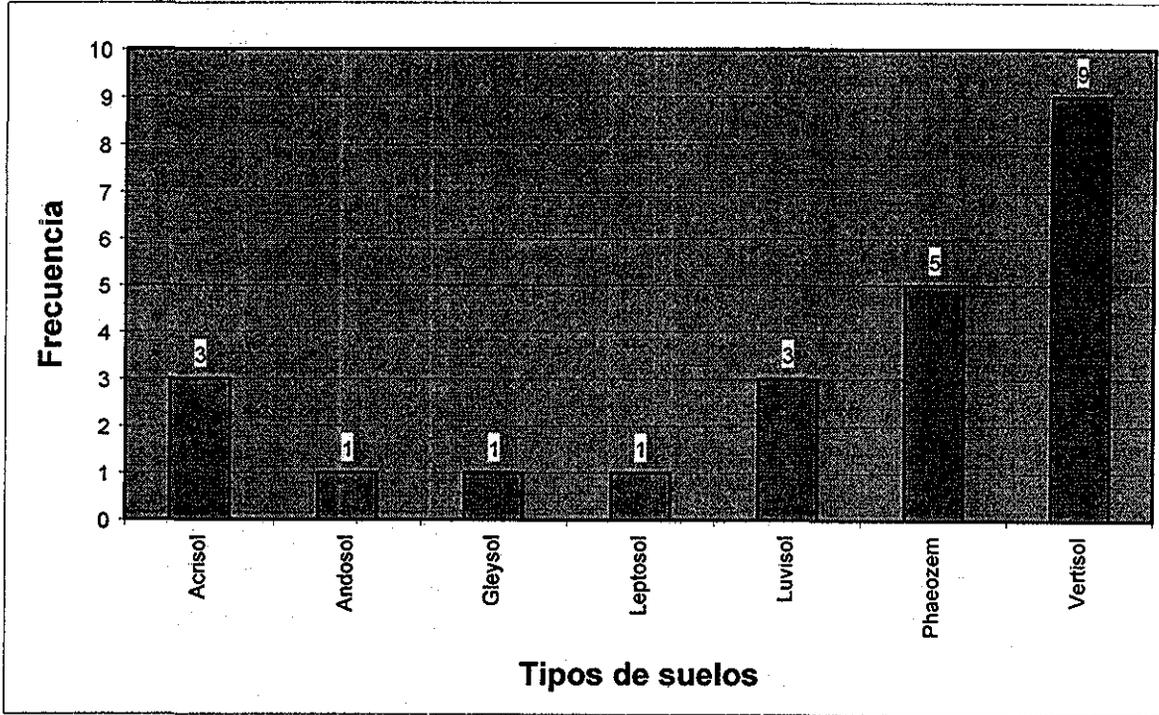


Figura 6. Frecuencia de estaciones meteorológicas por clase de suelo en la Cuenca del Lago de Cuitzeo

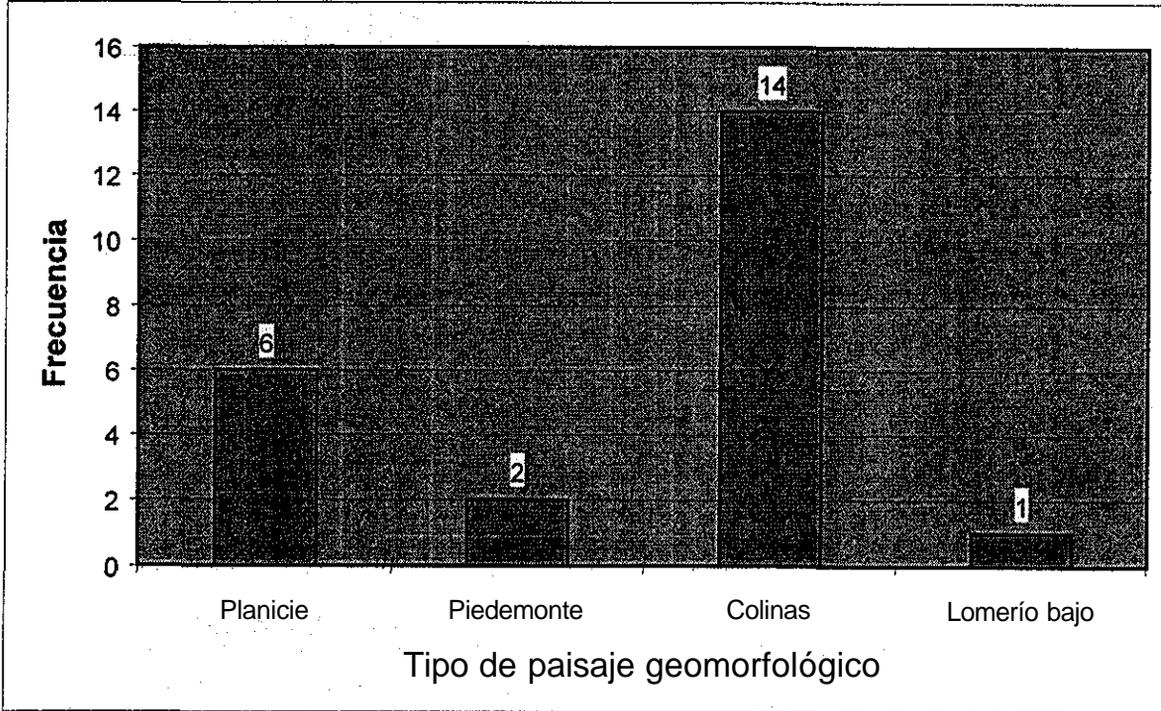


Figura 7. Frecuencia de estaciones meteorológicas por paisaje geomorfológico en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

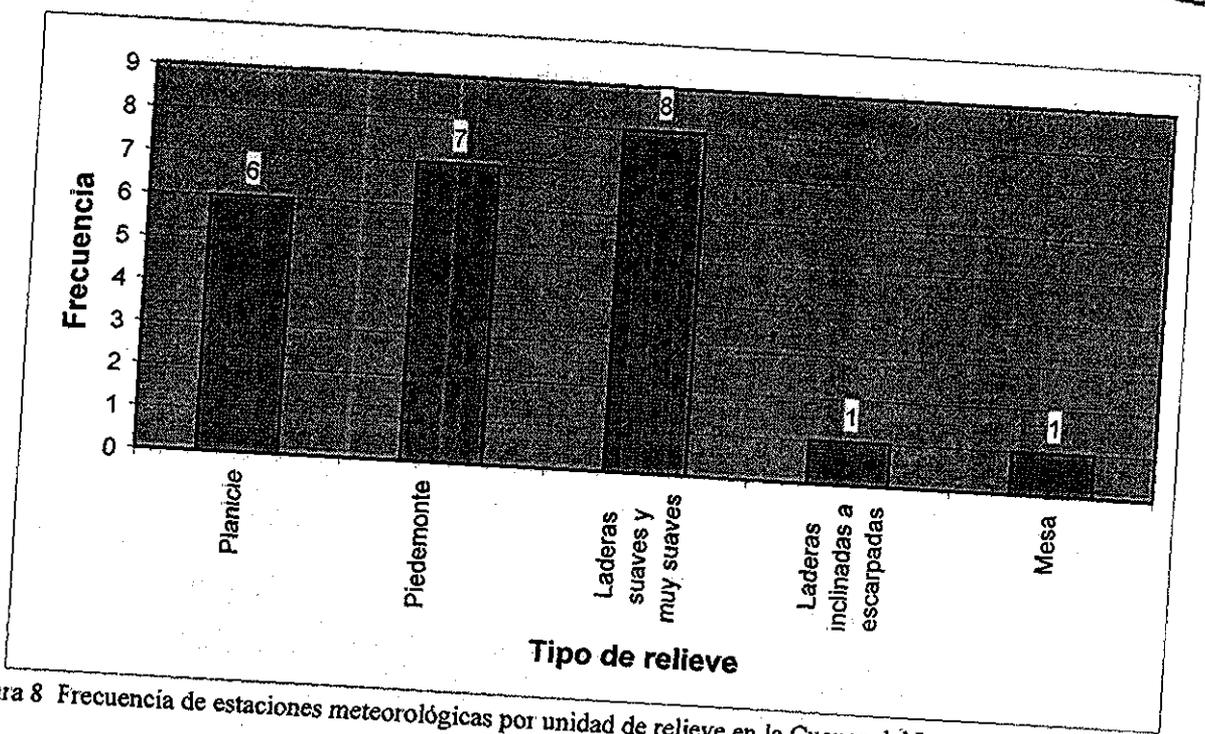


Figura 8 Frecuencia de estaciones meteorológicas por unidad de relieve en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

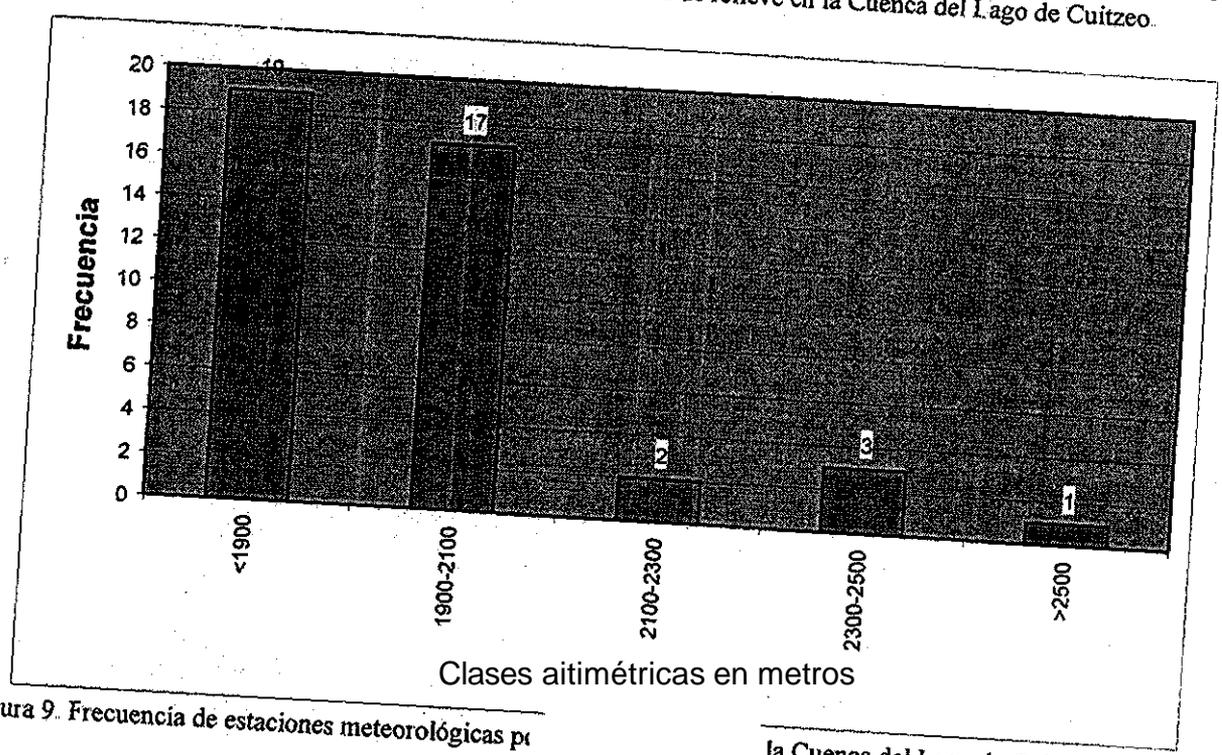


Figura 9. Frecuencia de estaciones meteorológicas por clases altimétricas en metros en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

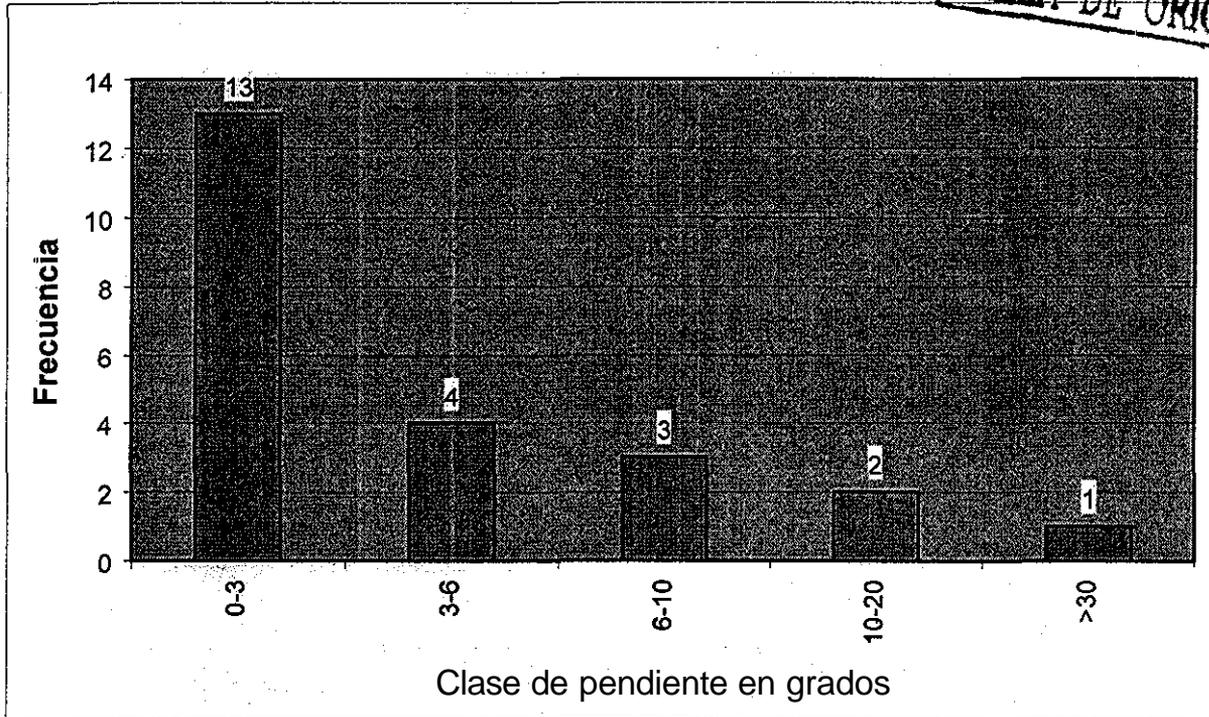


Figura 10, Frecuencia de estaciones meteorológicas por clase de pendiente en la Cuenca del Lago de Cuitzeo,

Se cruzaron las bases de datos de puntos de distribución de estaciones con las correspondientes a la distribución de cobertura vegetal y uso de suelo para 1975 y 2000 elaboradas a partir de fotointerpretación de fotografías aéreas escala 1:50,000 y 1:37,000, respectivamente (López *et al.*, 2001). El modelamiento permitió reconocer que alrededor de 30 % de las estaciones se ubicaron en zonas con cultivos en 1975, mientras que en el año 2000 solo 21% de ellas registraron datos en zonas de cultivo, principalmente debido que los asentamientos urbanos incrementaron su superficie, de esta manera el 43 % de las estaciones se ubicaron en áreas urbanas en 1975, mientras que en el año 2000 el 52 % de las estaciones se localizaron en asentamientos urbanos como resultado del incremento de las manchas urbanas localizadas en la cuenca (Figuras 11 y 12).

En relación a las subcuencas y municipios, es posible indicar que las estaciones se ubican solo en 11 de los 26 municipios; el municipio mejor monitoreado corresponde a Morelia, seguido por Zinapécuaro y Alvaro Obregón (Figura 13). Las estaciones se localizan en 11 subcuencas de las 45 que se delimitaron para este trabajo; las estaciones se ubican principalmente en tres subcuencas: Tarímbaro-Queréndaro, Río Grande y Copándaro (Figura 14).

El análisis espacial de la distribución de estaciones se realizó a través de la construcción de búfeis o zonas de influencia, considerando dos radios de cobertura, el primero desde 6 km (100 km² cobertura), es decir la superficie de cobertura óptima por estación; y el segundo con un radio de 9 km (250 km² de cobertura) o rango de cobertura máximo permisible por estación. Utilizando el rango óptimo por estación la cuenca queda cubierta en un 45 %, mientras que utilizando el rango máximo de cada estación, la cuenca queda cubierta en un 72 % (Figuras 15 y 16).

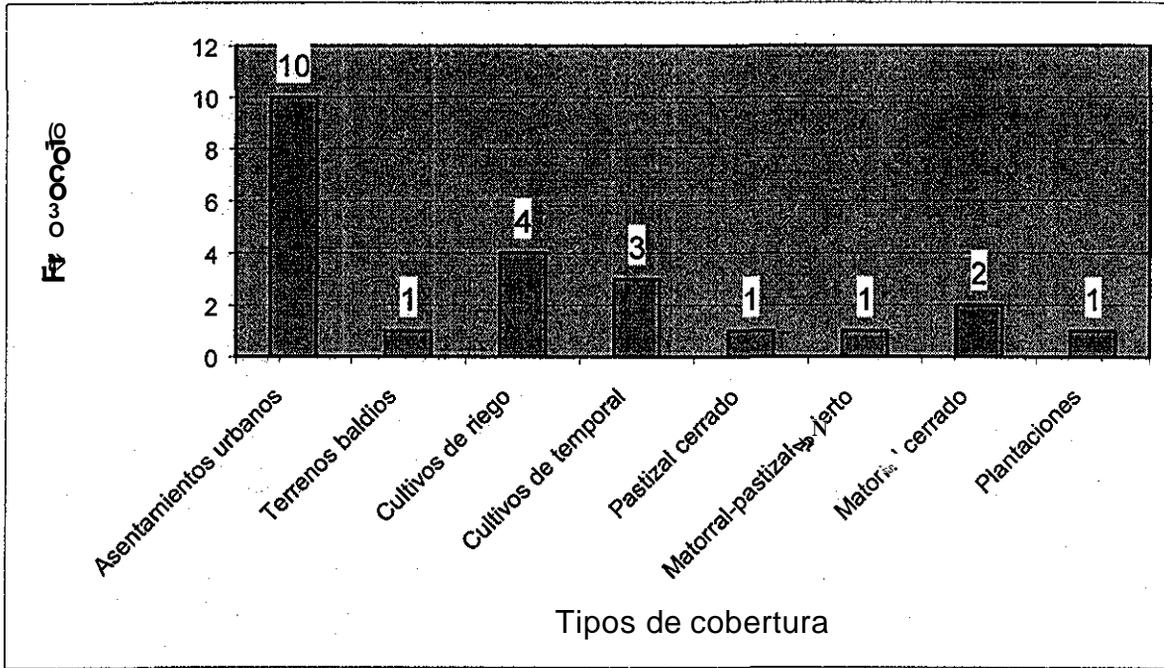


Figura 11, Distribución de las estaciones meteorológicas por tipo de cobertura para 1975.

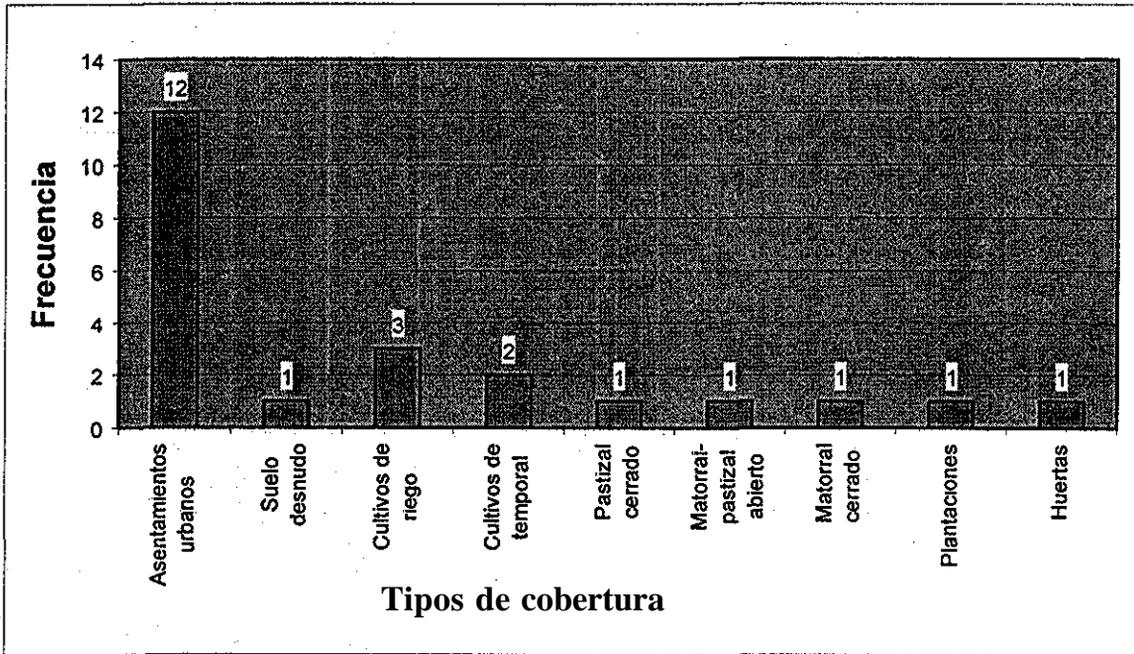


Figura 12, Distribución de las estaciones meteorológicas por tipo de cobertura para 2000.

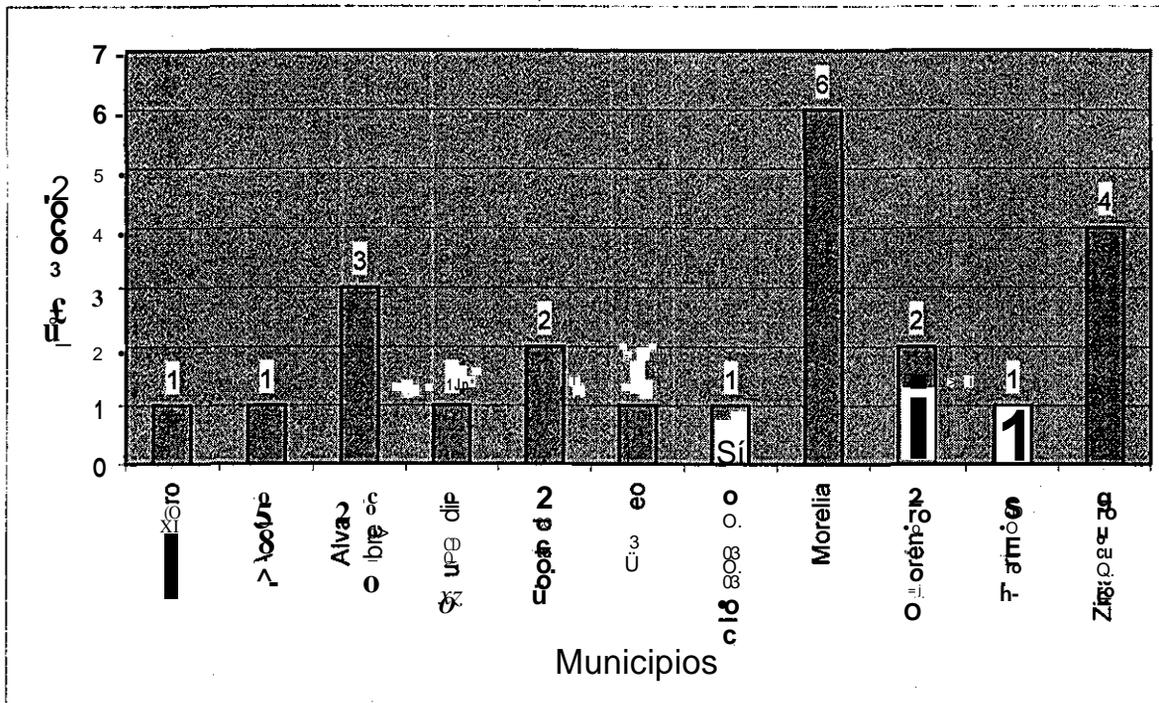


Figura 13. Distribución de estaciones por estaciones meteorológicas por municipios en la cuenca de Cuitzeo,

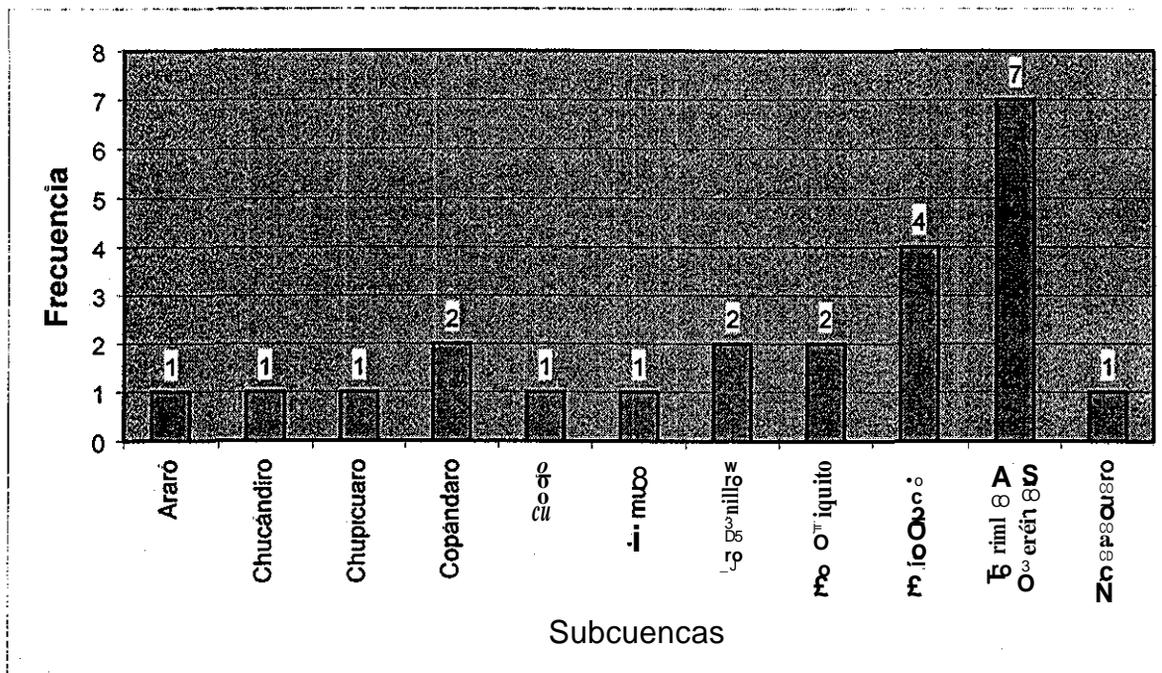


Figura 14. Distribución de estaciones por estaciones meteorológicas por subcuencas en la cuenca de Cuitzeo

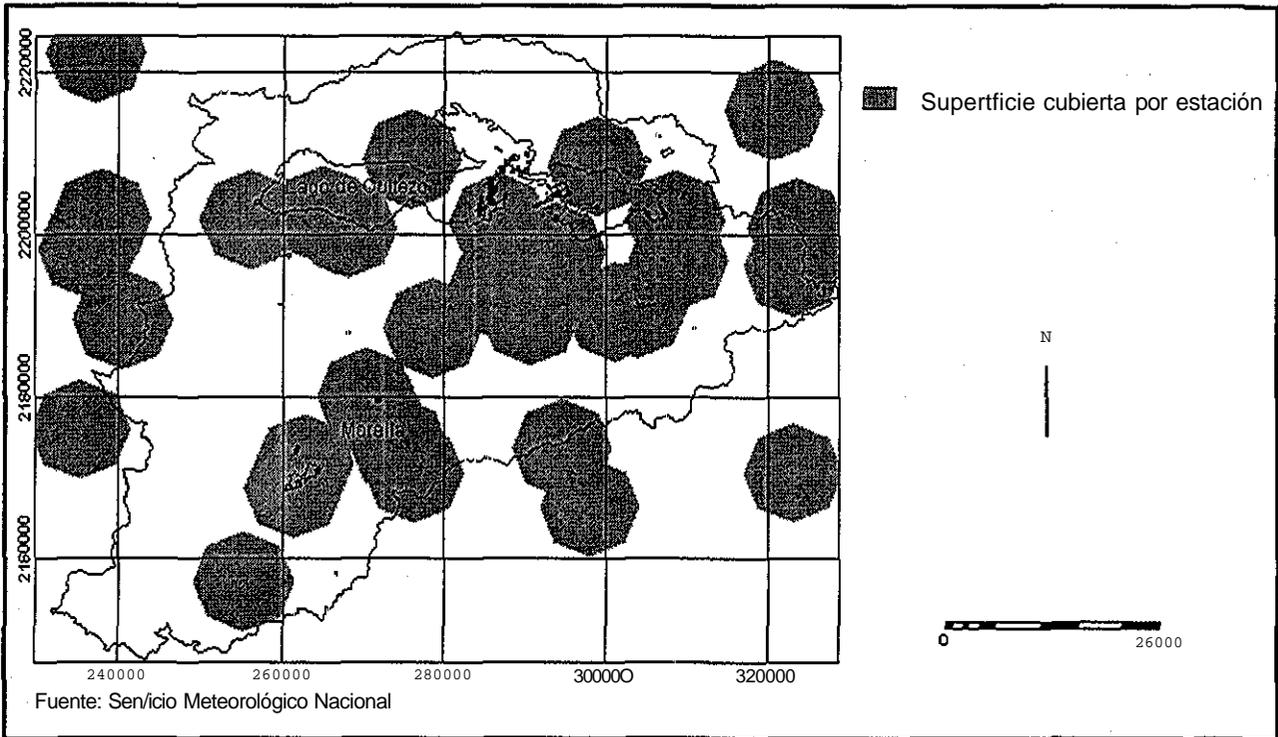


Figura 15, Mapa de búfers o zonas de influencia de las estaciones meteorológicas de la Cu «nca de Lago de Cuitzeo, Se considera un radio de 6 km por estación o 100 km² de superficie por cada estación,

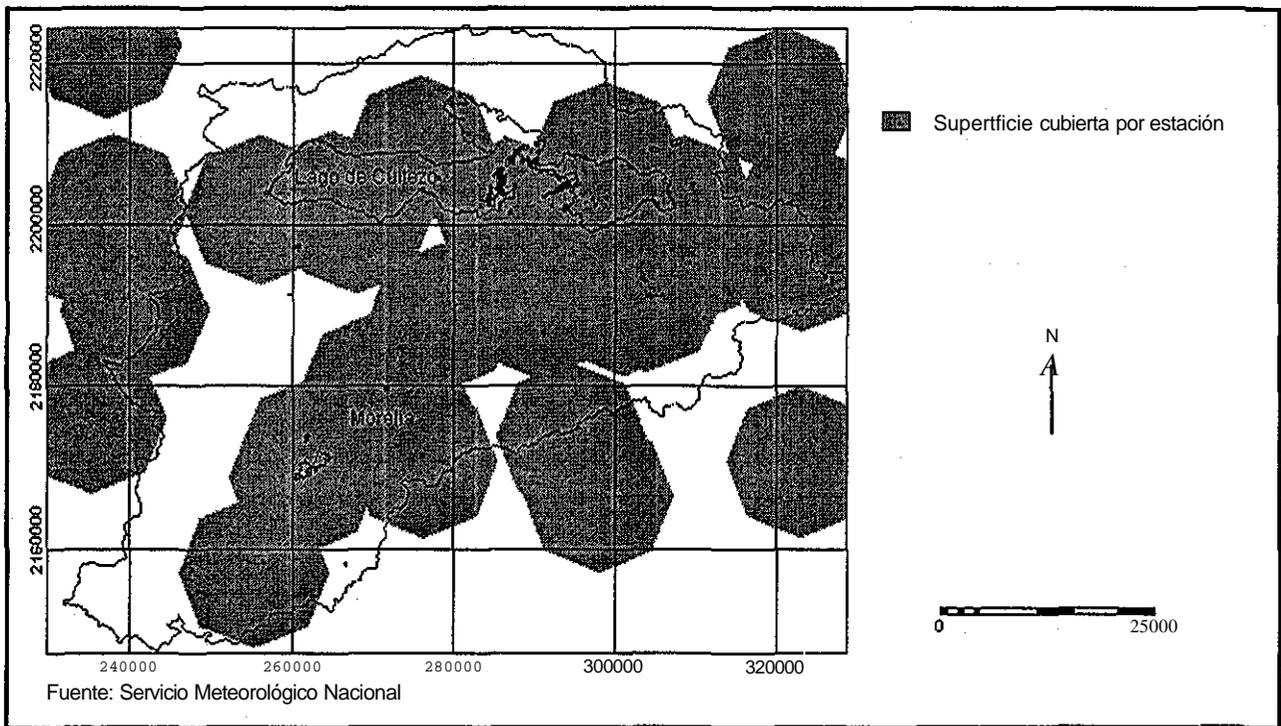


Figura 16, Mapa de búfers o zonas de influencia de las estaciones meteorológicas de la Cu «nca de Lago de Cuitzeo. Se considera un xadio de 9 km por estación o 250 km² de superficie por cada estación,

Variabilidad y estacionalidad

Precipitación

La diferencia entre el cuartil 3 y el 1 de probabilidad de precipitación anual (249.2) es una medida de concentración de la precipitación alrededor de su media, Cuanto menor es, tanto mejor es la concentración (Cuadro 2). Los valores se correlacionaron aceptablemente con la desviación estándar ($r = 0.78$) Los valores relativamente altos de las diferencias entre el cuartil 3 y 1 (promedio = 249,2) indica que en la mayoría de las estaciones la precipitación anual no ocurre frecuentemente en torno a la media, Lo cual es coherente con los valores altos de desviación estándar y coeficiente de variación,, La variabilidad de la precipitación es alta en la cuenca,

El índice de estacionalidad se ha utilizado para estimar la intensidad de la lluvia (Bergsma, 1980; Boceo, 1989). Los valores son altos con un promedio de 183,9 y la alta dispersión (desviación estándar = 195.5 y coeficiente de variación = 23.3) indica que existe una baja concentración de la lluvia en el tiempo, con fuertes variaciones del índice entre las estaciones (mínimo = 89.3, máximo = 638.3) (cuadro 3),

Temperatura

La diferencia entre el cuartil 3 y el 1 fue de de 1,2, es decir existe una alta concentración de los valores de temperatura alrededor de su media, lo cual es coherente con los valores altos de desviación estándar y coeficiente de variación de las estaciones de la cuenca; en consecuencia no existe gran variabilidad de la temperatura media en la cuenca (cuadro 4),, El índice de estacionalidad presenta valores bajos (31,4) cercanos a la media (33,0), aunado a la relativa baja dispersión (desviación estándar = 0,9 y coeficiente de variación = 5.1) indica que existe una alta concentración de la temperatura en el tiempo, con bajas variaciones del índice entre las estaciones (mínimo = 25,5, máximo = 48.9),,

Probabilidades

Los valores anuales de precipitación para la mayoría de las 42 estaciones se granean como curvas normales o casi normales, Once estaciones tienen promedios y medianas muy cercanas o iguales, lo que indica el mismo comportamiento (Cuadro 2),, En 15 casos el promedio es mayor que la mediana, indicando sesgo positivo, comportamiento similar se presenta entre el promedio total y promedio de la mediana,, En ocho casos las medianas son mayores a los promedios indicando distribuciones sesgadas negativamente,

Como es de esperarse, la mediana y el promedio presentaron una alta correlación ($r = 98$) (Cuadro 3), En consecuencia existe un 50% de probabilidades de que la precipitación de cualquier año en todas las estaciones pueda alcanzar su media; en promedio cada dos años,,

Cuadro B. Resultados estadísticos de datos de H. recibo ción.

Clt	Años	Prom (mm)	Prom (mm)					C. de Var	Variación	p/p	I. de H.	Mínimo	Amplitud	Altitud
			0.75%	0.25%	0.1er	1er	3er							
11002	21	76.53	82.10	68.80	14.81	2.03	116.50	1127.40	525.80	801.80	1850			
11021	21	222.2	78.90	61.10	17.83	19.10	309.54	105.08.0	445.80	805.00	1870			
11033	24	688.0	792.18	61.03	17.4	248.6	293.24	118.05.0	438.80	805.00	1833			
11088	19	738.89	742.50	60.80	17.740	24.03	314.70	110.09	463.0	682.90	1751			
11111	33	03.49	881.90	78.85	16.60	25.05	67.39	141.41	438.80	605.00	2070			
16001	21	99.42	88.30	79.80	25.69	21.82	40.95	155.2	187.0	857.00	2060			
16008	2	632.98	835.00	77.25	219.00	31.68	40.95	155.2	187.0	857.00	1840			
16018	26	695.88	888.75	774.85	607.60	125.93	18.10	180.67	478.90	498.00	2050			
16020	34	805.5	755.00	68.15	161.70	2.07	61.45	10.45	1194.20	686.30	2020			
16022	61	810.54	785.00	708.00	191.40	143.46	15.45	200.10	139.95	564.80	2096			
16081	74	82.9	837.00	810.55	256.90	194.45	21.55	878.12	45.4.20	1640.00	1830			
16088	81	650.6	853.0	712.0	58.20	128.50	28.90	184.79	134.08	1003.40	1831			
16034	26	84.78	857.5	10.06	70.28	198.7	28.25	8.01	102.12	122.10	488.00	744.10		
16045	27	848.0	1442.20	1709.80	125.20	494.60	22.03	110.61	20.45	2145.20	738.00	1473.0		
16081	48	853.23	882.5	938.32	734.95	143.53	18.85	21.65	1648.1	1521.10	498.60	728.50		
16052	51	729.63	710.10	888.5	629.50	158.5	22.55	2708.9	163.0	1513.60	406.10	975.00		
16055	71	828.6	888.0	8005.0	630.00	85.50	25.06	826.78	264.55	1517.60	418.00	1085.00		
16078	44	887.48	880.25	860.85	74.97	18.68	25.82	15.68	18.30	1610.50	544.00	1085.00		
16081	21	737.08	741.00	844.30	588.55	25.75	148.78	20.19	118.92	1042.00	515.30	524.50		
16081	48	79.14	811.00	901.50	658.00	242.30	161.97	21.50	228.4	107.4	522.00	628.90		
16081	24	905.65	899.85	803.10	803.10	118.70	121.22	148.95	128.55	1139.70	704.00	485.70		
16091	22	680.8	6608.0	734.40	608.5	132.55	18.963	21.15	89.23	1031.50	397.00	684.70		
16098	54	81.02	885.5	798.60	59.13	20.47	15.35	24.65	101.98	116.00	4108.0	917.70		
16097	49	890.00	1317.40	1454.10	1134.80	213.21	16.52	459.0	152.50	1687.80	804.00	883.90		
16100	92	831.66	815.00	898.85	839.0	159.5	168.7	20.29	286.2	174.1	488.0	1033.40		
16104	27	8188.0	7908.0	933.60	680.5	28.85	210.73	25.74	444.08	261.13	449.00	914.70		
16105	23	26.72	838.0	865.0	628.00	168.20	141.75	19.55	200.92	1112.50	478.10	684.40		
16114	21	1152.10	1091.00	1335.00	850.50	336.4	39.19	1130.55	22.8	200.50	573.80	1427.20		
16116	22	837.88	838.0	8418.0	576.58	165.22	159.05	25.27	18.80	838.16	883.16	2070		
16118	24	824.13	882.0	101.80	804.18	107.2	284.59	14.53	839.92	1440.50	271.40	1189.10		
16119	13	58.07	840.0	881.55	813.00	171.88	22.89	295.5	183.81	108.50	571.80	436.50		

Figura 2. Resultados de los estadísticos de datos de precipitación. Caracterización

Clave	Tipos	Precip. (mm)	Mediana* (mm)	0.75%	0.25%	75% %F%	Coef. de var.	Skewness	Kurtosis	Moda	Desv. Est.	Coef. de Asimetría	Coef. de Curtosis	Amplitud	Altitud
1612	10	849.0	855.0	920.0	740.0	203.00	172.00	2.00	1148.6	1148.6	127.07	421.80	844.40	200	
16121	10	875.7	911.0	1030.8	774.0	268.0	178.0	2.00	1418.9	1418.9	1112.05	498.20	613.0	211	
1613	10	1238.7	1282.9	1478.3	1120.1	234.20	215.71	17.14	4633	1478.3	168.85	872.40	990	110	
1614	10	1191.4	1234.5	1440.0	1015.9	329.10	277.22	21.50	13834	13834	1695.95	566.10	128.0	114	
16145	10	748.08	760.0	871.5	612.0	257.50	192.63	2.00	4200	4200	1277.00	364.20	910.0	1920	
16146	10	1180.4	1074.8	1300.5	923.5	143.44	425.66	3.00	18088	18088	139.60	554.70	84.90	2224	
1615	10	815.4	864.2	985.0	783.8	152.61	220.44	24.73	1668	1668	163.20	67.70	192.40	63	
1619	10	802.0	869.6	931.0	813.0	22.80	170.43	2.24	10046	10046	192.80	42.50	470	2020	
1621	10	81.8	85.6	103.8	67.0	361.10	299.67	2.44	1742	1742	163.15	464.40	84.40	1800	
1625	10	637.0	675.1	716.60	540.10	176.50	127.56	19.11	16272	16272	199.50	464.40	531.0	250	
16	13	727.9	670.0	882	581.2	204.1	198.91	2.33	1882	1882	139.00	40	6.20	1660	
Coef. de Correlación	30	841.98	835.2	960	707.1	249.2	195.51	2.23	42133	42133	1341.2	47.7		1666.6	
Coef. de Var.	18	190.41	190.1	221.8	188.2	88.2	63.87	49.53	1020	1020	351.0	140.5		228.8	
Coef. de Var.	40	22.6	23.0	23.8	23.0	35.4	32.4	21.2	55.5	55.5	26.2	28.5		1.7	

Cuadro 3. Matriz de correlación (Pearson) y 2. Valor crítico a 0.05 a) o b) captación

	PROM	MEDIANA	75%	25%	75%-25%	C.VAR.	D. EST.	MINIMO	MAXIMO	IVARIANZA	P ² R	AMPLITUD	ALTITUD
PROM	1												
MEDIANA	0.982	1											
75%	0.986	0.986	1										
25%	0.988	0.985	0.9342	1									
75-25%	0.988	0.988	0.737	0.443	1								
D. EST.	0.988	0.988	0.7355	0.443	0.828	1							
C.VAR.	0.988	0.988	0.149	0.119	0.7064	1							
P ² R	0.948	0.9857	0.32	0.32	0.3996	0.555	1						
IVARIANZA	0.982	0.988	0.7137	0.54	0.7544	0.6671	0.8351	1					
MAXIMO	0.799	0.7266	0.7687	0.745	0.5107	0.3718	0.546	0.8153	1				
MINIMO	0.733	0.825	0.865	0.735	0.1874	-0.441	0.18	0.154	0.388	1			
AMPLITUD	0.583	0.263	0.59	0.528	0.409	0.636	0.257	0.25	0.282	0.1423	1		
ALTITUD	0.152	0.125	0.144	0.144	0.097	0.2	0.07	0.201	0.038	0.2309	0.038	1	

b) t matura

	PROM	MEDIANA	75%	25%	75%-25%	C.VAR.	D. EST.	MINIMO	MAXIMO	IVARIANZA	P ² R	AMPLITUD	ALTITUD
PROM	1												
MEDIANA	0.979	1											
75%	0.9462	0.910	1										
25%	0.9702	0.931	0.8714	1									
75-25%	0.988	0.150	0.19	0.0344	1								
D. EST.	0.257	0.3	0.058	0.9029	0.861	1							
C. VAR.	0.1206	0.692	0.3725	0.719	0.328	0.3994	1						
P ² R	0.38	0.339	0.483	0.3015	0.8795	0.9079	0.364	1					
IVARIANZA	0.672	0.1697	0.107	0.878	0.64	0.9402	0.354	0.506	1				
MAXIMO	0.568	0.792	0.843	0.7387	0.795	0.5339	0.62	0.10	0.13	1			
MINIMO	0.915	0.639	0.8349	0.1661	0.22	0.3726	0.41	0.17	0.395	0.453	1		
AMPLITUD	0.3004	0.255	0.501	0.13	0.711	0.915	0.454	0.411	0.411	0.17	0.371	1	
ALTITUD	0.337	0.1249	0.3577	0.2737	-0.2435	0.318	0.229	0.411	0.411	0.17	0.371	0.371	1

o —ro 4. Resultados de los cálculos estadísticos de datos de temperatura

Clave	Años	Prom (mm)	Mediana (mm)	0.75%	0.25%	75%-25%	O.ost.	C+3 var	Vananza	σ-P	Máximo	Mínimo	Amplitud	Altitud
11002	488	18.0	18.0	18.3	17.7	0.6	0.5	2.1	0.2	2.0	18.1	17.1	2.1	1850
11001	38	18.2	17.5	18.0	17.1	0.9	1.7	8.1	2.1	3.8	23.0	18.0	7.0	1870
11033	24	18.0	18.8	2.8	18.0	1.0	1.1	5.3	1.2	3.8	18.7	18.2	0.5	1833
11058	17	18.2	18.2	18.8	18.0	0.8	0.4	2.8	0.1	1.1	18.3	18.0	2.3	1751
1100	33	18.2	18.2	18.8	18.5	1.1	0.8	2.8	0.8	3.1	18.0	18.0	4.0	2070
16001	17	18.2	17.0	18.2	16.5	2.1	1.1	6.5	1.2	3.0	19.2	14.2	4.0	2060
16004	18	18.2	18.2	19.8	17.7	1.0	1.3	1.0	2.2	3.3	18.1	18.0	0.1	1840
16016	31	18.3	18.8	18.8	16.2	0.7	0.4	2.8	0.2	3.9	18.2	18.0	1.2	2050
16020	33	17.1	17.1	18.2	16.0	0.4	0.4	2.1	0.1	2.1	17.1	18.1	1.0	2020
16022	57	18.0	18.1	18.1	17.1	1.0	0.7	3.8	0.5	3.1	18.1	18.2	3.0	2096
16027	12	18.4	18.2	18.2	17.5	1.7	1.3	7.0	1.1	0.3	21.0	18.0	5.0	1831
16028	20	17.0	17.0	17.2	16.1	0.5	0.2	2.0	0.1	4.0	17.0	18.3	1.3	1831
16034	20	18.0	18.1	18.5	17.8	0.1	0.8	4.2	0.8	3.0	18.2	16.1	3.0	1456
16045	32	17.0	18.1	18.2	16.1	0.7	0.8	5.1	0.8	3.4	18.1	18.0	3.1	1686
16050	24	17.8	18.0	18.0	17.5	0.5	0.4	2.8	0.2	2.9	18.0	18.0	2.0	1958
16052	51	18.5	18.4	18.8	17.2	0.8	0.4	3.0	0.3	2.0	18.1	18.2	2.8	1850
16055	64	18.0	18.0	17.8	15.0	1.0	1.2	1.3	1.1	3.3	18.1	14.4	3.7	1250
16078	43	18.1	18.4	18.4	16.1	2.1	1.4	8.1	2.0	3.4	18.1	14.1	4.0	2013
16080	21	17.1	18.1	18.1	17.4	0.7	0.4	2.2	0.2	2.1	18.0	17.1	1.0	1912
16081	59	18.1	18.2	18.0	17.4	1.1	0.8	3.1	0.8	3.0	20.0	18.0	4.0	1951
16087	21	18.5	18.8	18.8	16.1	0.7	0.4	2.4	0.2	2.1	17.1	18.8	1.7	2043
16091	20	18.1	18.0	18.2	17.8	0.8	1.0	3.0	1.1	3.1	18.0	18.0	0.0	1840
16096	47	18.1	18.3	18.8	17.0	0.8	0.8	4.1	0.8	3.3	18.1	18.8	4.4	1831
16097	48	18.7	18.8	14.5	13.2	0.8	0.7	4.0	0.4	2.1	18.0	18.1	3.4	2505
16100	44	18.2	18.0	18.4	15.1	0.7	0.4	3.4	0.2	2.0	18.1	18.1	1.0	2001
16104	38	18.1	18.1	18.0	18.0	1.1	1.0	3.0	0.8	3.2	21.1	18.1	5.0	1848
16105	33	17.8	18.1	18.2	17.4	0.8	0.8	2.8	0.1	3.2	18.1	18.1	3.6	1830
16114	50	18.2	18.0	18.1	15.8	1.1	1.1	8.0	1.2	3.0	18.0	14.4	4.5	2000
16116	28	18.8	18.5	18.8	16.3	0.8	0.4	2.1	0.1	2.6	18.1	18.0	1.4	2070
16118	31	18.1	18.0	18.1	15.8	2.1	1.1	8.0	0.2	3.0	18.2	18.1	0.1	1700

3. Resultados de los cálculos estadísticos

Clave	Años	Promi (mm)	Mediana (mm)	0.75%	0.25%	1.5%-2.5%	D. est.	C. de Var	Vananza	ω	Máximo	Amplitud	Altitud
18110	10	18.0	18.0	22.1	13.8	4.5	0.0	4.0	0.0	38.0	14.8	8.0	1700
18120	47	18.1	18.3	18.7	13.8	1.1	1.0	8.1	1.0	99.4	18.0	13.5	2000
18131	18	18.1	18.0	18.3	13.8	0.6	0.1	2.1	0.1	28.4	18.0	14.4	2511
18136	05	20.8	20.4	21.0	20.1	0.8	0.0	1.4	0.0	33.1	22.7	14.0	1850
18140	39	18.0	18.0	18.0	13.8	0.7	0.0	3.0	0.3	88.8	18.0	14.0	2134
18144	58	18.0	17.8	18.3	13.8	1.1	0.0	5.0	0.8	34.8	21.0	18.1	1920
18148	04	18.0	18.4	18.8	13.8	1.4	0.4	4.8	0.8	20.8	17.1	14.0	2224
18154	08	18.4	18.4	18.0	13.8	0.6	0.0	3.0	0.0	88.8	18.1	14.1	1863
18180	15	18.8	18.0	17.8	18.0	1.8	1.4	9.1	0.4	11.8	18.1	14.0	2020
16221	18	14.0	14.4	14.8	13.8	1.1	1.0	6.0	1.0	88.0	14.3	11.8	1800
16254	18	18.8	17.0	18.4	13.8	1.8	1.1	8.4	1.0	53.3	18.0	14.4	2350
18	13	18.0	17.8	18.4	13.8	0.6	0.4	2.4	0.0	27.1	18.7	14.1	1960
18	20	17.3	18.3	18.0	18.0	1.2	0.0	5.4	1.0	11.4	18.1	14.1	1966
18	14	1.4	1.3	1.8	1.4	0.8	0.4	2.0	1.3	4.3	1.0	1.0	228.81
18	44	8.0	8.0	8.0	8.0	66.3	54.9	5.0	132.0	3.7	8.0	8.0	11.7

Análisis espacial de la precipitación y la temperatura

Se realizó un análisis de correlación a fin de explorar la relación existente entre la altitud y la precipitación media anual (Cuadro 4),. Considerando las diferencias altitudinales se probó la existencia de una correlación positiva entre la precipitación media anual de las estaciones de la cuenca y la altitud de las mismas, debido a un efecto orográfico,. Sin embargo, la correlación entre estas variables fue extremadamente baja para toda la cuenca ($r = 0,18$). Las correlaciones más altas se encontraron entre la precipitación con la varianza y la desviación estándar (0,68 y 0,66, respectivamente),. Esto es resultado de la alta variabilidad de la precipitación y por la ausencia de diferencias significativas en estacionalidad entre las estaciones,. En consecuencia se dificulta de manera considerable el mapeo de precipitación con el uso de este método,.

La temperatura media mensual de las estaciones de la cuenca también mostró una relativamente baja correlación negativa con la altitud (-0,33); y las correlaciones entre la temperatura con la varianza y la desviación estándar se consideran bajas (0,26 y 0,12) (Cuadro 4); esto se interpreta como una baja variabilidad de la temperatura aunado a la presencia de diferencias significativas en estacionalidad entre las estaciones, Sin embargo, este método no es lo suficientemente robusto en la creación de mapas de temperatura mensual.

Análisis de varianza

El análisis de varianza de una vía de los datos de precipitación y temperatura media anual arrojó que hay diferencias significativas ($p = 0,001$) entre las medias de las precipitaciones medias anuales y temperaturas medias anuales de las 42 estaciones analizadas en este trabajo. Se definen quince grupos distintos, considerando la precipitación; y veintidós grupos de temperatura (Cuadros 5 y 6), La reagrupación de los grupos define la regionalización de la precipitación y la temperatura de la cuenca (Figuras 17 y 18). En las figuras se muestra claramente un gradiente térmico y de humedad,. La precipitación se incrementa desde el Norte hacia el Sur, mientras que la temperatura asciende desde el Sur hacia el Norte,. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado secos a climas templado húmedo,.

Cuadro 5, Grupos de precipitación generados a partir de análisis de varianza de una vía para las estaciones dentro y fuera de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Grupo A	16045
Grupo B	16097,16136
Grupo C	16140, 16146
Grupo D	16114
Grupo E	16001
Grupo F	16087
Grupo G	15055, 16078
Grupo H	16121, 16221
Grupo I	16050
Grupo J	16120
Grupo K	16034, 16055, 16118, 16100, 16104, 16022, 16020, 16199,16081, 11002, 16119, 16145, 11058,16080.
Grupo L	16052, 16, 16105, 11021, 16096, 11071, 16016
Grupo M	11033 16027,16091,16254,
Grupo N	16028
Grupo N	16116,16004

Cuadro 6, Grupos de temperatura generados a partir de análisis de varianza de una vía para las estaciones dentro y fuera de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Grupo A	16136
Grupo B	11033
Grupo C	16104,11058,16119, 11111
Grupo D	16004
Grupo E	16027
Grupo F	11021, 16081
Grupo G	11002,16134,16
Grupo H	16105, 16145, 16050, 16080
Grupo I	16091
Grupo J	16022, 16052
Grupo K	16078, 16096
Grupo L	16020
Grupo M	16045, 16028, 16001
Grupo N	16055, 16254
Grupo N	16199, 16116
Grupo O	16016
Grupo P	16118, 16087
Grupo Q	16146,16114,16100,16120
Grupo R	16121
GrupoS	16140
Grupo T	16155
Grupo V	16221, 16097

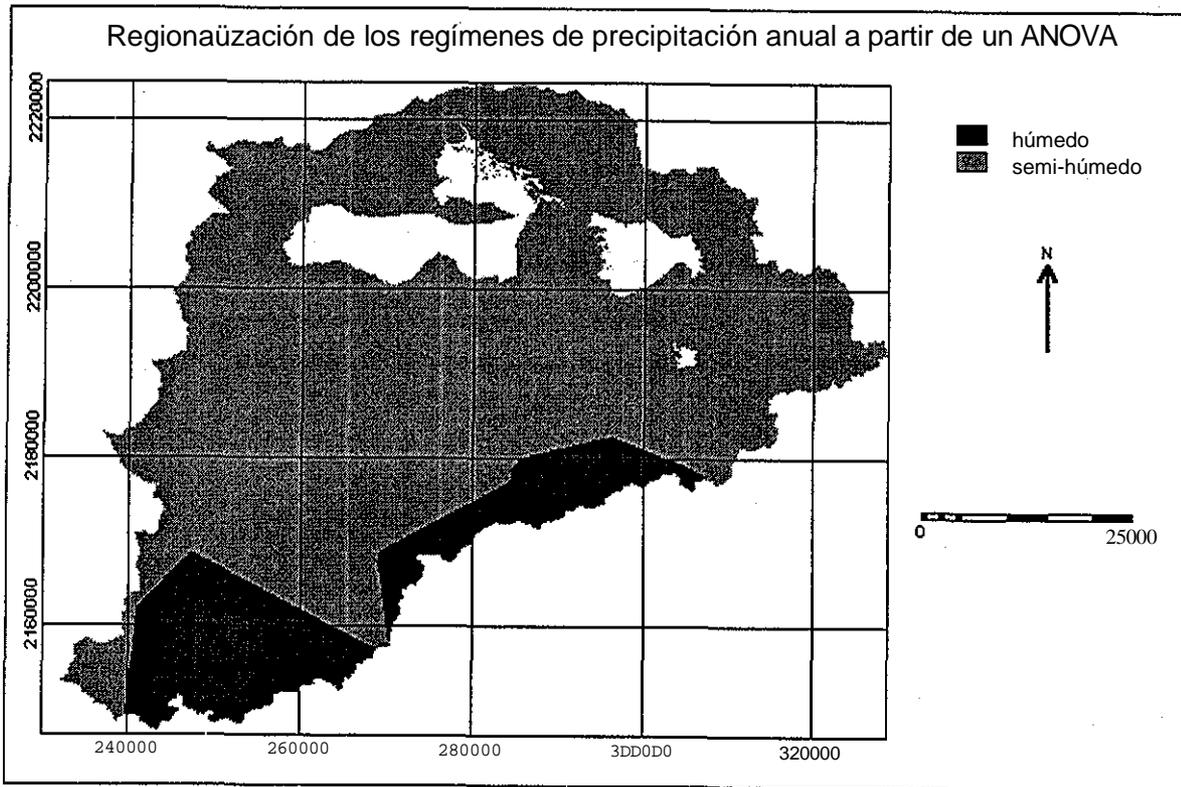


Figura 17 Regionalización de los regímenes de precipitación media anual a partir de un ANOVA de una vía

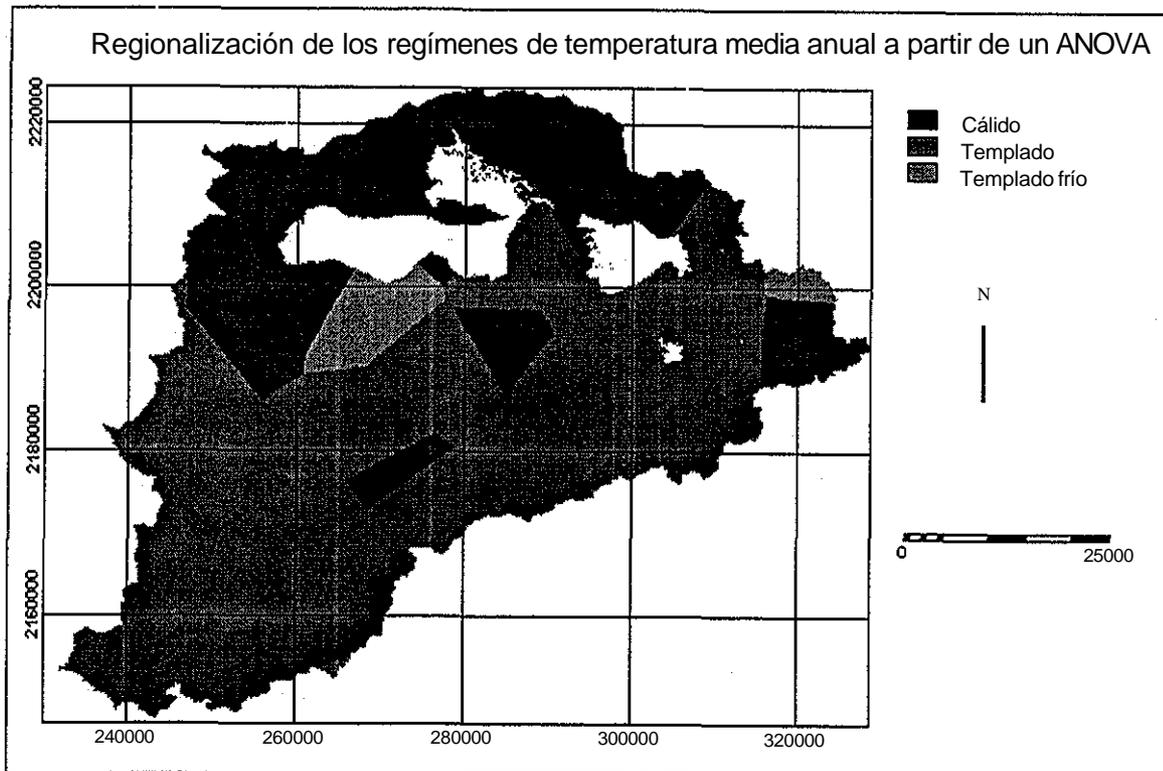


Figura 18, Regionalización de los regímenes de temperatura media anual a partir de un ANOVA de una vía

Series de tiempo

Considerando las pocas estaciones con registros amplios, el análisis de series de tiempo de datos de precipitación, temperatura e índice de sequía de Palmer, indica que las estaciones Cuitzeo, Huingo, Cointzio y Puente San Isidro, que registran datos anteriores a 1960 presentan un marcado descenso de precipitaciones entre 1940 y 1960 (Figuras 19, 20, 21, y 22); sin embargo, en 1958, todas las estaciones presentaron un incremento considerable de la precipitación, este incremento es cercano a la media anual de cada estación., Este incremento ocasiona que en varias estaciones el periodo de precipitación por debajo de la media termine y comience un nuevo ciclo más húmedo.

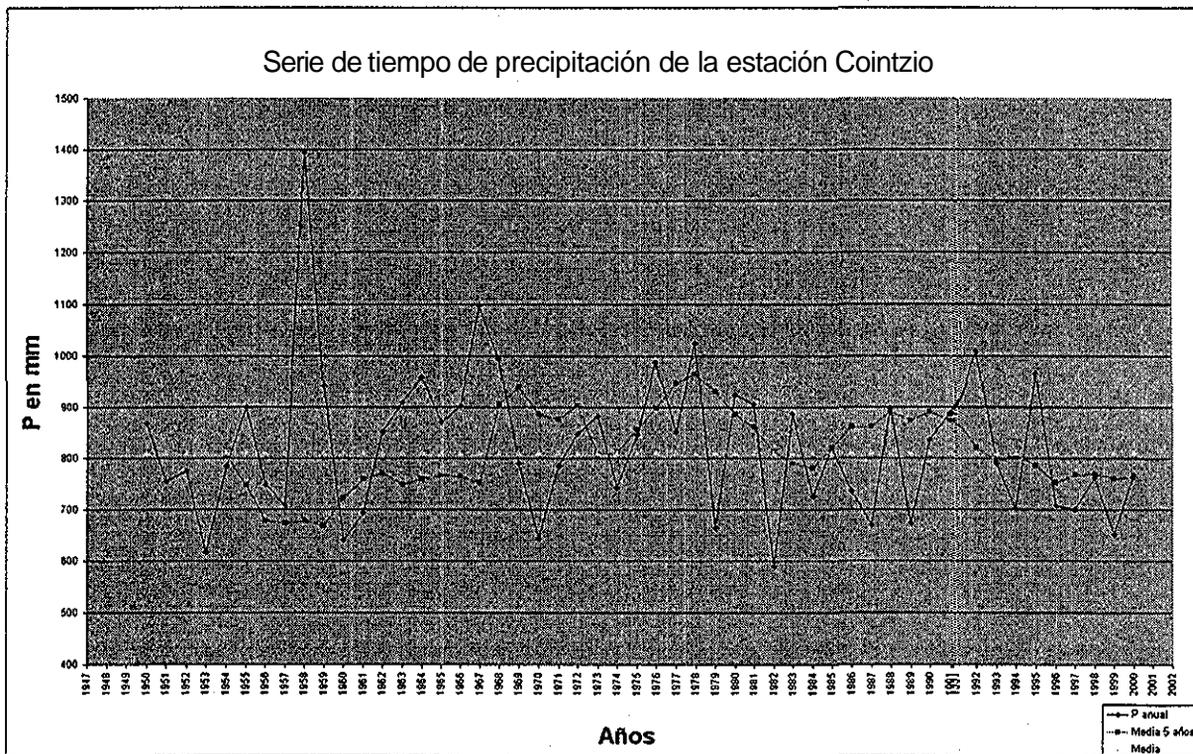


Figura 19, Serie de tiempo de precipitación de la estación Cointzio.

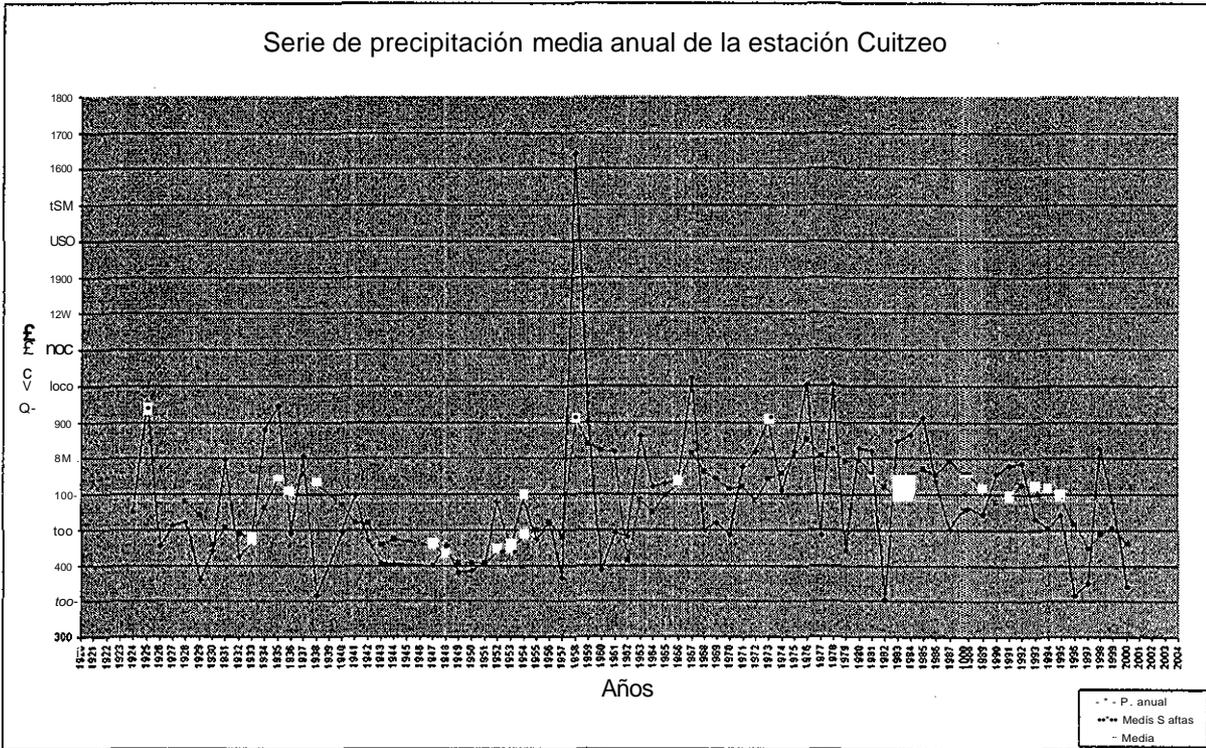


Figura 20. Serie de tiempo de precipitación de la estación Cuitzeo.

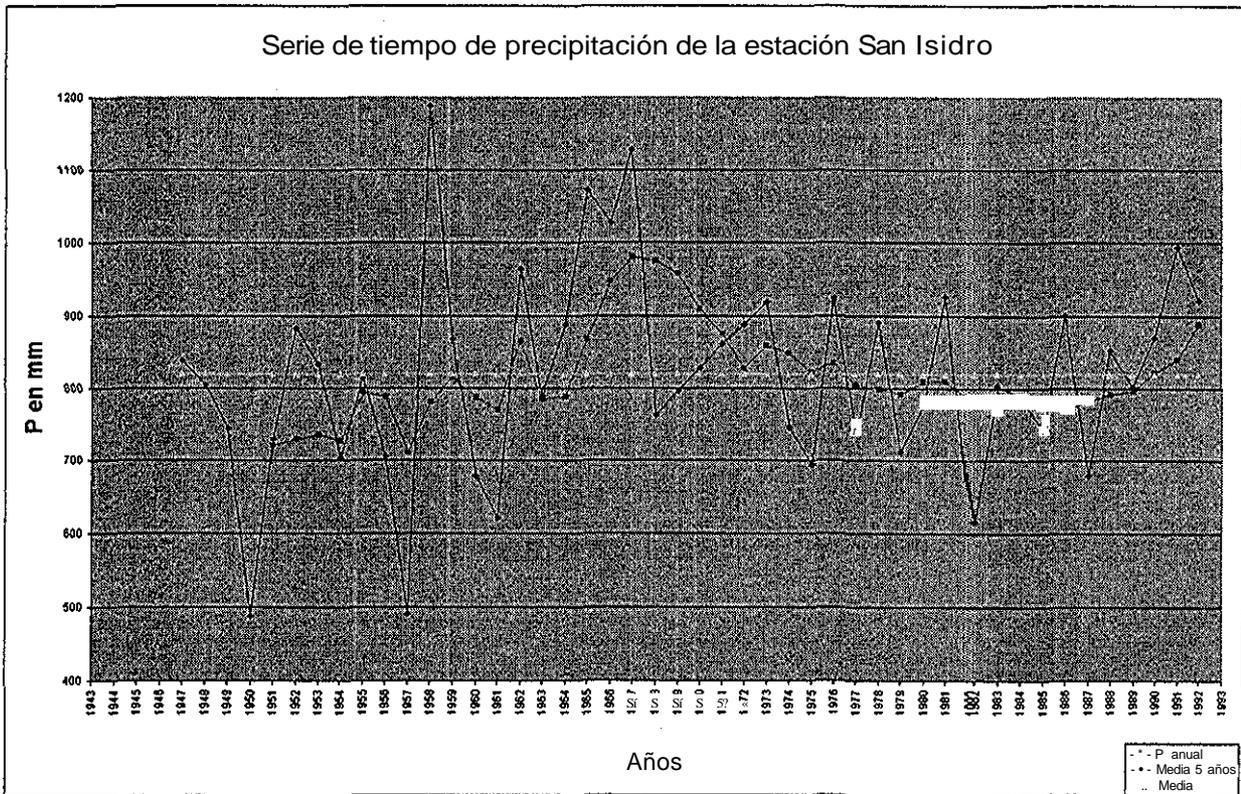


Figura 21 Serie de tiempo de precipitación de la estación San Isidro

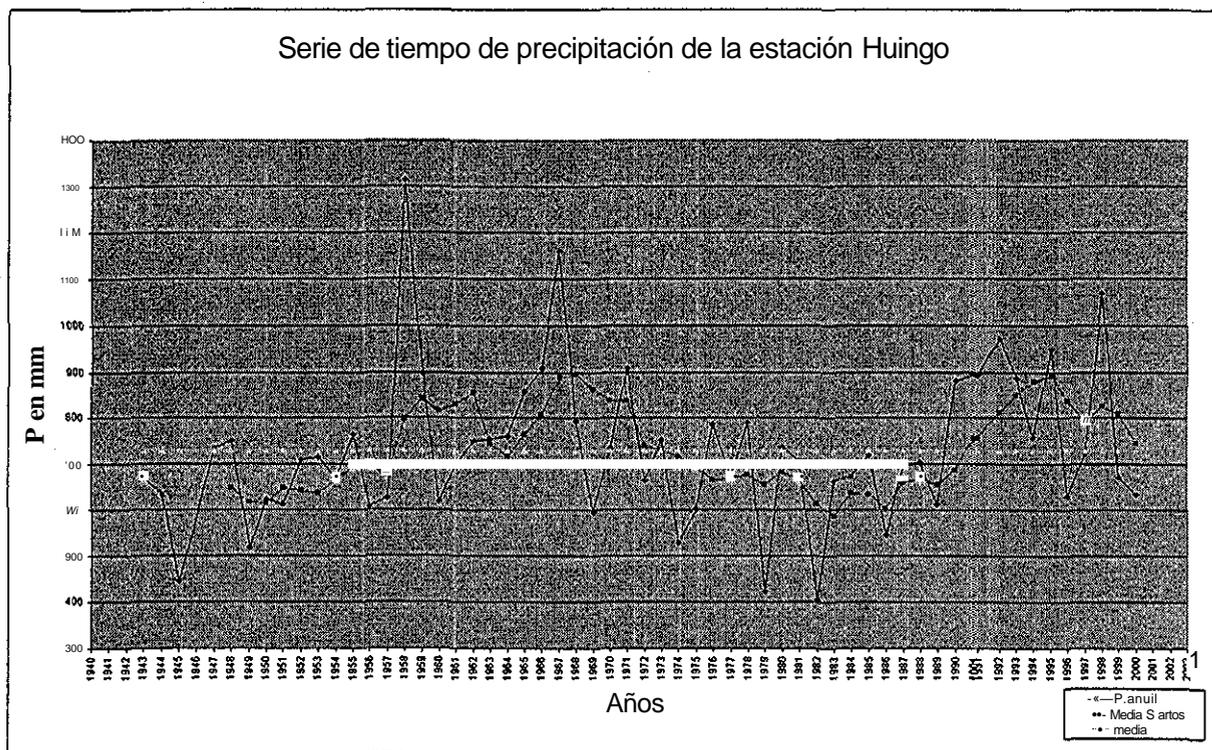


Figura 22, Serie de tiempo de precipitación de la estación Huingo,

La reducción en la precipitación empieza nuevamente a finales de los años 1970's y termina al principio de la década de 1990; este periodo es seguido por un periodo húmedo, relativamente corto (aproximadamente 5 años),. A mediados de la década de los 90's nuevamente se aprecia una reducción de las precipitaciones medias anuales y un aumento en la presencia de índices de sequía en las estaciones de la cuenca.

En síntesis la serie de precipitación muestran tres periodos relativamente secos: a) 1940 a 1960, b) 1980 a 1990 y c) 1995 a 2000; estos periodos corresponden con la reducción de la superficie del lago, En la bibliografía se reporta que la mayor reducción de la superficie de lago corresponde a la desecación total del cuerpo de agua (Alvarado-Díaz, 1994); la cual sucedió en los años de 1942 y de 1962, Estas fechas se localizan dentro del periodo de sequía más importante,. La amplitud del lago se redujo para el año de 1986, como se evaluó con la imagen de satélite Landsat MSS ($250,8 \text{ km}^2$); esta reducción corresponde al segundo periodo de sequía importante. Por último, de 1995 a la fecha, el lago también presenta niveles bajos y corresponden al tercer periodo de sequía en la cuenca,

El análisis de la estación Cuitzeo muestra evidencias de ciclos recurrentes con una duración aproximada de 20 años,. El primer ciclo es seco, este empieza en 1934 y termina en 1957, con una duración de 23 años,. El segundo corresponde a un ciclo húmedo con una duración de 21 años, los cuales inician en 1957 y culminan en 1978, el último ciclo es seco y tiene una duración de 20 años, que inició en 1978 y termina en el año 2000 (año en que termina la serie de datos) (Figura 20),.

Estos resultados sugieren que la cuenca y especialmente el vaso del Lago de Cuitzeo atraviesan actualmente por un periodo seco en la historia reciente (últimos 75 años).

CONCLUSIONES

Este análisis permite reconocer que las estaciones se asientan principalmente en zonas de unidades de relieve con baja pendiente, en las porciones bajas de la cuenca y principalmente en zonas agrícolas y pecuarias. Las zonas de mayor pendiente y altitud, con coberturas de bosque no se encuentran bien representadas por los datos meteorológicos que son capturados por las estaciones existentes. Esto permite concluir que la cuenca se encuentra medianamente monitoreada con respecto los parámetros de precipitación y temperatura.

En base a los datos disponibles y el modelamiento espacial efectuado, se puede concluir que el monitoreo de precipitación y la temperatura es moderadamente bueno, pero presenta serias deficiencias en la distribución de estaciones por tipo de cobertura y altitud. En consecuencia la distribución actual de las estaciones responde a criterios agroclimáticos y no de manejo de recursos naturales.

El procedimiento estadístico efectuado permite concluir que la precipitación es alta y muy variable para la zona de estudio (841.98 mm), mientras que la temperatura presenta menos variaciones alrededor de la media (17.3). El análisis de varianza permitió definir 15 grupos de precipitación en función de las estaciones; y veintidós grupos de temperatura en función de las estaciones.

La distribución espacial de los grupos agregados muestra claramente un gradiente térmico y de humedad. La precipitación se incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura, asciende desde el sur hacia el norte. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado secos a climas templado húmedo. Sin embargo, el área cercana a la ciudad de Morelia muestra una anomalía térmica que podrá estar explicada por la teoría de las islas de calor.

El análisis de series de tiempo indica que la precipitación, la temperatura y el índice de sequía de Palmer tienen un comportamiento estacional. La serie de precipitación muestra tres periodos relativamente secos: a) 1940 a 1960, b) 1980 a 1990 y c) 1995 a 2000; además de tres ciclos de duración aproximada de 20 años: 1) 1934-1957, 2) 1957-1978 y 3) 1978-2000. Estos periodos y ciclos se asocian con la reducción de la superficie del lago a lo largo del tiempo.

RECOMENDACIONES

Debido a las condiciones fisiográficas y la predominancia de tormentas de tipo convectivo, con una precipitación media variable, es recomendable incrementar el número de estaciones meteorológicas en el área. La distribución de las estaciones meteorológicas no debería de realizarse al azar, pero si considerar su accesibilidad en relación a vías de comunicación y localidades. En este sentido la distribución de la red meteorológica estaría concebida para ser aplicada en estudios de cobertura vegetal, sustentabilidad, manejo, conservación de bosques, y disponibilidad del recurso hídrico en zonas de alta biodiversidad.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (GONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*. Se agradece la colaboración en la construcción y edición de bases de datos a Vicente Salinas, Camilo Alcántara y Alejandra Acosta. El primer autor agradece el apoyo económico proporcionado por el CONACyT y la UNAM a través de las becas de doctorado recibidas. Se agradece la cuidadosa revisión de manuscrito por parte de Erna López,

REFERENCIAS

Alcántara, C. (2002). *Ajustes para México del índice de Severidad de Ca Sequía de Palmer (PDSI)*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, ITN Universidad Nacional Autónoma de México,

Alvaiado-Díaz, I. T. Zubieta-Rojas, R. Oitega-Murillo, A. Chacón-Tones y R. Espinoza-Gómez, (1994). "Hipertrófica en un lago tropical somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México)". In: Comisión de Ecología del H. Congreso de Michoacán LXVI Legislatura, *El deterioro ambiental, de la cuenca del lago de Cuitzeo*. H. Congreso del Estado de Michoacán.

Beigsmma, E. (1980). *Aerialphoto-interpretation for soil erosion and conservation survey. Part I Soil erosion features* ITC Lectures notes Enschede, The Netherlands: 47 p.

Boceo, G., (1989). Análisis estadístico de datos hidrometeorológicos en estudios de erosión acelerada. *Boletín del Instituto de Geografía*, 20:9-27. UNAM. México.

Jáuregui, O.E., (1973), Hacia una planeación de la red meteorológica nacional, *Recursos Hidráulicos II(I)*: 98 - 112.

López, E.M., G. Boceo y M.E. Mendoza, (en prensa). "Cambio de uso del suelo en la cuenca del lago de Cuitzeo" En: Barón, L., F. Peña y C. Ramírez *La cuenca del lago de Cuitzeo: problemas y perspectivas de desarrollo*. Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), UACH.

Mendoza, M.E., G. Boceo y E. López-Granados, (en prensa), "Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, Bases para su ordenamiento territorial". En: Barón, L., F. Peña y C. Ramírez *La cuenca del lago de Cuitzeo: problemas y perspectivas de desarrollo*. Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), UACH.

Palmer, W.C., (1965). *Meteorological Drought, Research Paper No. 4*, Washington, D.C., USA, Department of Commerce. Weather Bureau: 59 pp,

Seguin, B., E. Assad, J.P. Freteaud, I. Imbernon, Y. Ken y J.P. Lagouarde, (1989), "Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions", *International Journal of Remote Sensing*, 19 (6): 1101 -1117.

Thornthwaite, C.W. y J.R. Mather, (1957) *Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance* Publications in Climatology 10 (3). Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. Centerton, New Jersey,

Villiers, L., e L. Tiejo, (1998), "Climate change on mexican forests and natural protected áreas", *Global Environmental Change, Human and policy dimemiom* 8(2): 141-157.

Zuviría, M. De, (1992), *Mapping Topoclimates by integrating topographic, meteorológica! ana lamí ecological data in a geographic information systemu A case study oj the Loam Sak área, north central Thailand*, Ph.D. Thesis Univetsity of Amsteidam-ITC, TheNetherlands: 183 pp,

Capítulo 6

Estimación del escurrimiento superficial en cuencas pobremente aforadas. Un caso en el centro de México¹

Resumen

La estimación del escurrimiento superficial por métodos indirectos implica el uso de modelos basados en las características físicas de la cuenca (roca, suelos, relieve, cobertura vegetal). Las características físicas determinan la tasa y tipo de ocurrencia de los procesos hidrológicos. En este trabajo se comparan y evalúan los resultados de la estimación de escurrimientos en subcuencas utilizando dos métodos desarrollados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 1964) y Número de Curva (USDA, 1986) con un enfoque espacialmente distribuido. Los resultados obtenidos indican que ambos métodos sobrestiman el escurrimiento a nivel de pequeñas subcuencas. La sobrestimación es resultado de la composición geológica, variabilidad de coberturas vegetales y del uso del suelo en la zona. Sin embargo, las sobrestimaciones se encuentran dentro de los rangos de error registrados en trabajos que calculan el escurrimiento espacialmente distribuido para grandes áreas geográficas.

Abstract

The runoff estimation by indirect methods implies the use of models based on physical characteristics of a watershed (rocks, soils, landforms, and land-cover). The rate and type of hydrological processes are controlled by these characteristics. In this paper, a comparison and assessment of runoff estimations based on the United States Department of Agriculture (USDA, 1964) and the Curve Number (USDA, 1986) methods applied on a sub-basin scale were carried out. A spatially distributed approach was used to compute the runoff. These calculations showed that both methods overestimate runoff in small sub-basins. This overestimation obeys to geologic composition, land cover and land use diversity in the area. Nevertheless, overestimations are in the range of error found in studies carried out over large areas.

INTRODUCCIÓN

En cuencas poco aforadas es necesario estimar la magnitud y variación del escurrimiento; esta información es requerida en la planeación y manejo de recursos hídricos, especialmente en aquellos relacionados con el control, disponibilidad y uso del agua. La evaluación del escurrimiento por métodos indirectos implica el uso de modelos basados en las características físicas de la cuenca (roca, suelos, relieve, cobertura vegetal), las cuales determinan la tasa y tipo de ocurrencia de los procesos hidrológicos. Entre los modelos basados en propiedades físicas y pocos datos meteorológicos se encuentran el de balance hídrico (sensu Thorhwaite y Matter, 1955) y la curva numérica (USDA, 1986), entre otros. Este tipo de modelos han sido criticados por su carácter empírico; sin embargo, son herramientas valiosas para estimar componentes del balance hídrico en lugares donde solo existen registros de precipitación y temperatura (Thorhwaite y Matter, 1955; Mora e Iverson, 1998). Estos enfoques han probado su eficiencia en pequeñas cuencas aforadas (Calvo 1986; Fernández *et al.*, 1999) y en

¹ Manuscrito preparado para someterse a la revista *Tercer Cuadernillo de la Universidad Autónoma de Chapingo*. Autores: Manuel Mendoza, Gerardo Boceo, Miguel Bravo y Erna López

grandes cuencas aforadas (Knigh *et al*, 2001), La construcción de modelos de balance hídrico para cuencas pobremente aforadas y no aforadas, implica una selección rigurosa de los parámetros físicos de la cuenca; además, es conveniente utilizar el menor número posible de éstos (Xu y Vandewiele, 1994), ya que un número reducido de parámetros facilita la construcción y replicabilidad de los modelos. Entre los parámetros más útiles se encuentran la textura del suelo, pendiente, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo.

La estimación de la escurrentía y el balance hídrico puede realizarse a través de dos tipos de modelos con distinto requerimiento en el nivel de información, los modelos agregados y los modelos espacialmente distribuidos. En los modelos agregados los parámetros y las variables representan valores promedio de las propiedades de toda la cuenca; es decir, la consideran como una unidad (Chow *et al*, 1964; Chow *et al*, 1988; Brooks *et al*, 1992; Dunne and Leopold, 1978),. Por otra parte, en los modelos espacialmente distribuidos, se considera la variabilidad espacial de los parámetros y variables en la cuenca (Olsson and Pilesjo, 1999; Meijerink *et al*, 1994; Olivera, 1996; Maidment (1993y 1996),.

Existe consenso en que las estimaciones indirectas son útiles en el análisis del efecto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo (Harbor, 1994; Badhuri *et al*, 1997), cambio climático a largo plazo (Gleick, 1987; Vörösmarty y Moore, 1991; McGuffie *et al*. 1998; Xu, 2000) y si se expanden pueden incluir la dinámica del carbón, nutrientes y sedimentos, pueden servir además, como una herramienta semi-mecánica para cuantificar el transporte de materiales y contaminación no puntual (Vörösmarty *et al*, 1989; Olivera, 1996).

Este trabajo tiene por objetivo comparar y evaluar los resultados de la estimación de escurrimientos en subcuencas utilizando dos métodos desarrollados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 1964) y el Número de Curva (USDA, 1986). En este artículo se optó por utilizar un enfoque espacialmente distribuido con objeto de evaluar el escurrimiento y validar la capacidad predictiva de dos modelos. El enfoque se basa en el análisis de documentos aeroespaciales, técnicas de percepción remota y modelamiento de datos dentro de un sistema de información geográfica, con objeto de entender las condiciones hidrológicas en cuencas no aforadas., Mendoza *et al* (2002, en prensa) consideran que este enfoque facilita la comprensión del efecto de la degradación y cambios de cobertura vegetal y uso del suelo sobre los componentes del balance hídrico en cuencas no aforadas.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del lago de Cuitzeo se localiza en el Cinturón Volcánico Transmexicano y ocupa una superficie cercana a los 4,000 km² (Figura 1), La cuenca está conformada por colinas, lomeríos altos y planicies, desarrolladas sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica que va del Mioceno al Reciente (Mendoza *et al*, en prensa; Pasquaré *et al*, 1991),. La cobertura vegetal predominante corresponde a las clases matorrales, bosques y cultivos (López y Boceo, 2001), La precipitación media anual es de 847 mm y la temperatura media anual es de 17.3 °C.

En este trabajo se seleccionaron tres subcuencas de la cuenca de Cuitzeo, las subcuencas de arroyo Guadalupe, Lagunillas y Queréndaro por presentar diferentes coberturas, suelos y rocas, además de los mejores registros hidrométricos (Figura 2),.

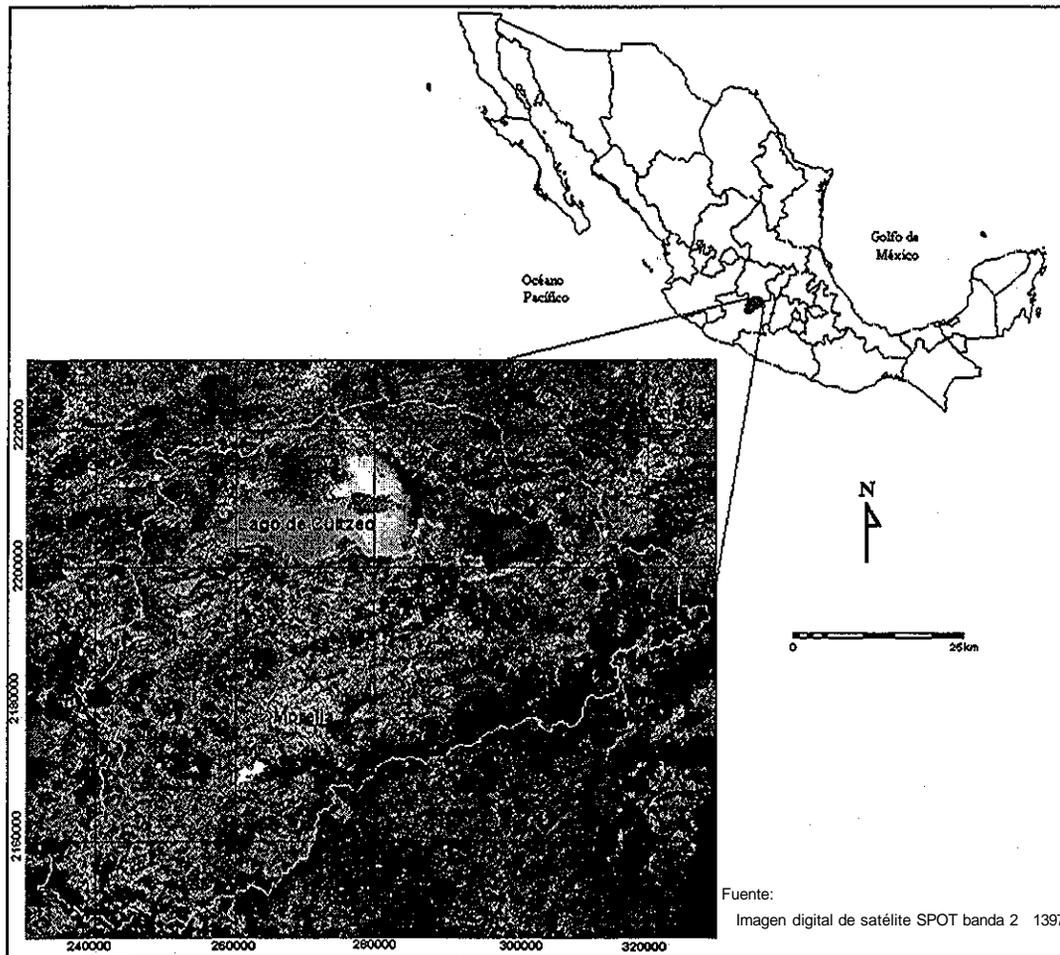


Figura 1 Área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La interpretación geomorfológica se realizó en fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro a escala aproximada 1:50,000 de 1975 elaboradas por INEGI. La interpretación se realizó a partir de claves estándar de fotointerpretación (Verstappen y Van Zuidam, 1991), con las cuales se discriminan laderas en forma jerárquica. Los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo (CVUS) se derivaron de la interpretación de fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro de 1975 y 2000, a escala aproximada 1:50,000 y 1:37,000, respectivamente. La interpretación de la CVUS se realizó bajo criterios de clasificación fisonómica-estructural (Anderson *et al.*, 1976); las categorías de CVUS son unidades mixtas dominadas por un elemento del cual se deriva el nombre de la clase. Se identificaron 35 clases diferentes (López y Boceo, 2001); sin embargo, para el análisis y manipulación de la información fue necesario generalizar las clases de acuerdo a los requerimientos de los modelos hidrológicos utilizados.

La distribución de la profundidad de suelos y de la textura preliminar se obtuvo de la reclasificación de las unidades de relieve en función de la clase de profundidad más representativa. Se utilizaron los datos de 156 pozos de suelo y sus análisis de laboratorio, los cuales fueron elaborados por INEGI (1971; 1973; 1979; 1982; 1983). Con objeto de incluir en el modelamiento hidrológico el carácter volcánico reciente en la cuenca y su capacidad de retención de agua, se extrajeron del mapa de relieve las clases "conos volcánicos" y "coladas de lava". Las zonas con vulcanismo reciente se

caracterizan por poseer una alta permeabilidad por sus características físicas (estructura y textura de las rocas). El mapa de texturas final es el resultado de la integración del mapa de texturas de suelo preliminar¹ con el mapa de conos y coladas.

Los datos de precipitación mensual provienen de 42 estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca de Cuitzeo y en sus alrededores (Figura 2), La precipitación, que es uno de los parámetros de entrada en el método de balance hídrico para el cálculo del escurrimiento, requiere de una adecuada distribución espacial. La interpolación los datos puntuales es compleja cuando la presencia de estaciones meteorológicas es baja, como es el caso en la cuenca en estudio. En el presente trabajo, la distribución espacial de la precipitación mensual (Pm) se realizó mediante técnicas de interpolación lineal utilizando el inverso de la distancia,

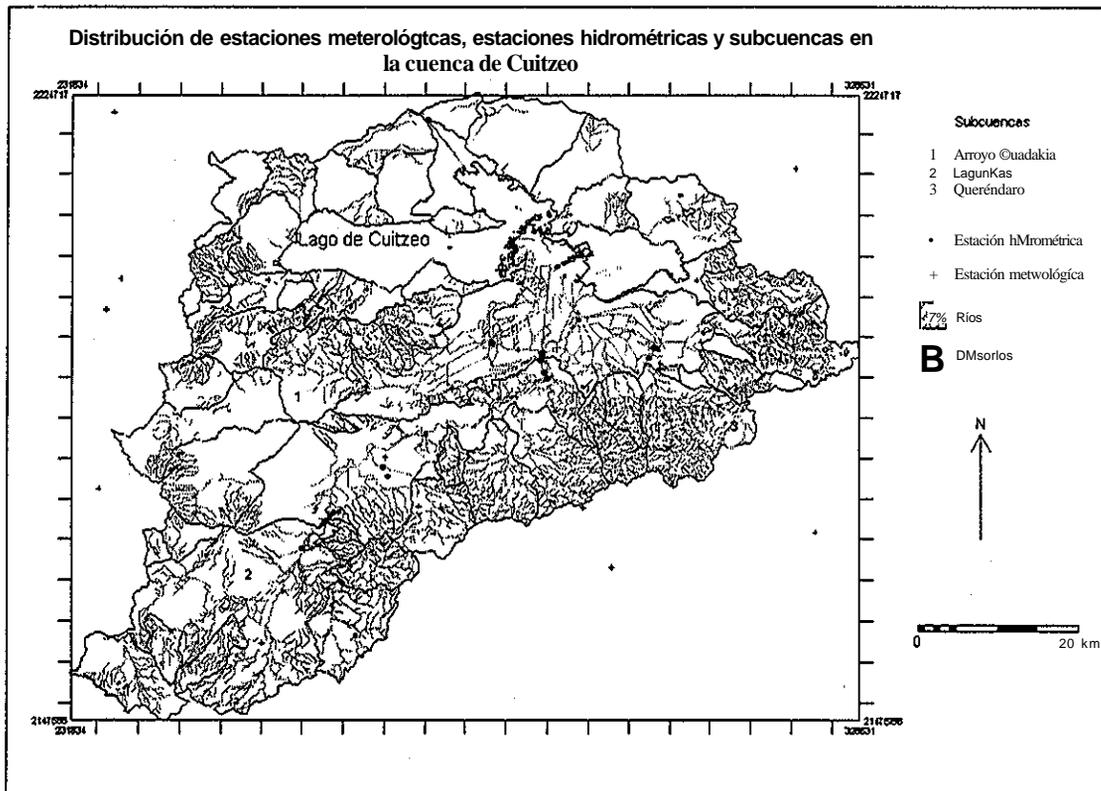


Figura 2 Mapa de distribución de estaciones meteorológicas, estaciones hidrométricas y subcuencas de la cuenca de Cuitzeo.

En la cuenca de Cuitzeo se localizan 18 estaciones hidrométricas, los datos de escurrimiento fueron proporcionados por la CNA (Figura 2), Los registros diarios de aforo fueron agregados mensualmente utilizando promedios ponderados, con intención de comparar con la estimación mensual resultado de los modelos aplicados. Del total de estaciones hidrométricas se seleccionaron tres aforos en tres subcuencas; el resto de estaciones no se consideraron porque se localizaron aguas abajo del vertedor de la presa Cointzio o sobre canales de riego.

Escurrecimiento superficial por el método de USDA, 1964 (balance hídrico)

El escurrimiento superficial (Esc) es la porción de la precipitación que no se infiltra ni se acumula en la superficie en el suelo, pero que fluye agua abajo como flujo laminar o concentrado (Chow *et al*, 1988), El primer método utilizado en el presente trabajo es

simple, asume que el Esc se produce a partir del exceso de agua que se genera en toda la cuenca. Considera que el Esc se almacena temporalmente en el suelo, acuíferos o cauces naturales para contribuir al escurrimiento del mes siguiente., También presupone que la cobertura vegetal y la velocidad de infiltración se mantienen constantes a lo largo del año., En este método el Esc es una función de la precipitación, textura del suelo, velocidad de infiltración, CVUS, y pendiente del terreno (USDA, 1964 citado por Beek, 1996).

Con fines prácticos se relacionó la permeabilidad y la velocidad de infiltración (SARH-CP, 1991). La permeabilidad es una característica física del medio poroso; por lo tanto, está relacionada con la distribución y tamaño de poros y la continuidad de éstos (Hillel, 1998). Es muy probable que un suelo con alta porosidad exhiba una alta velocidad de infiltración., A su vez, la infiltración puede ser estimada a partir de las clases texturales (SARH-CP, 1991). Para representar la distribución de las clases texturales en la cuenca se utilizó la cartografía de INEGI (1971; 1973; 1979; 1982; 1983); en ésta se identificaron tres clases de textura de suelos: fina, media y gruesa, Estas clases texturales se asociaron con velocidades de infiltración baja, media y alta, respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Reclasificación de la vegetación, velocidad de infiltración y pendientes en coeficientes de escurrimiento.

Vegetación* Velocidad de infiltración		Pendientes en %				
		<1	1-5	5-20	20-50	>50
Bosque y vegetación densa	Alto	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2
	Moderado	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
	Bajo	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
Pastos y bosques abiertos	Alto	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	Moderado	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
	Bajo	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
Arbustos	Alto	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
	Moderado	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
	Bajo	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
Cultivos	Alto	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
	Moderado	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
	Bajo	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7
Sin vegetación	Alto	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
	Moderado	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
	Bajo	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6

Los mapas de CVUS de cada fecha (1975 y 2000) se reclasificaron en cinco clases (bosque y vegetación densa, pastos y bosques abiertos, arbustos, cultivos y áreas sin vegetación). El mapa de CVUS reclasificado se cruzó con el mapa de velocidad de infiltración para obtener una tabla de dos dimensiones. Posteriormente se generó un mapa de pendientes en porcentaje a partir de la aplicación de filtros direccionales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT). La tabla anterior de vegetación y velocidad de infiltración se cruzó nuevamente con el mapa de pendientes obteniendo una matriz de dos dimensiones con la cual se clasificó el porcentaje de escurrimiento (US Soil Conservation Service, 1964, en Beek, 1996)., Finalmente, los mapas de porcentaje de escurrimiento mensual se multiplicaron por cada mapa de Pm, con objeto de generar los mapas mensuales de Esc medio.

Escurrimiento superficial por el método de Número de Curva

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica (USSCS) desarrolló un método directo de estimación del escunimiento que integra la intercepción, infiltración y el almacenamiento en pequeñas depresiones, excepto la evapotranspiración potencial, en una sola abstracción,, El método, conocido como Número de Curva, establece que la relación lluvia-escurrimiento es una función del tipo de suelo, uso del suelo y de condiciones hidrológicas (Chow *et al*, 1964; USDA, 1986).

La estimación del escurrimiento superficial por el método de Número de Curva se realiza con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,85)}$$

donde:

$$S = (25400/CN) - 254$$

P = Precipitación

CN = Número de curva (tablas)

Q = Escorr entía

En el método de la Curva Numérica cada tipo o clase de suelo es asignado a un grupo hidrológico. Los grupos hidrológicos se basan fundamentalmente en la capacidad de infiltración, la cual puede relacionarse con la conductividad hidráulica saturada de la superficie del suelo. Estos grupos son:

A Capacidad de infiltración rápida y bajo escurrimiento, arenas profundas y agregados de limos,,

B Capacidad de infiltración moderada, suelos de textura moderadamente fina a moderadamente gruesos, tales como los limo arenosos,,

C Capacidad de infiltración lenta con bajo contenido de materia orgánica, suelos de textura fina, tales como los limo-arcillosos, arcillas arenosas, poco profundas.

D Capacidad de infiltración muy lenta, suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y algunos suelos salinos,,

La información cartográfica de suelos de INEGI y la interpretación de CVUS fueron reclasificadas. La CVUS se reclasificó como cobertura/tratamiento y condición hidrológica,, La información de suelos se reclasificó con objeto de generar el mapa de grupos hidrológicos de suelo. La información anterior constituye los principales insumos de! método de SCS para la estimación del número de curva, que representa un coeficiente de escurrimiento para una zona, o una cuenca hidrológica (Cuadro 2) (Chow *et al*, 1994; USDA, 1986),,

Cuadro 2. Reclasificación de la cobertura vegetal y uso del suelo/tratamiento, condición hidrológica y grupos hidrológicos en número de curva.

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Es importante mencionar que los métodos utilizados fueron desarrollados para estimar el escurrimiento como una función del uso del suelo y clima y no tanto para predecir el gasto de una corriente natural. La sobreestimación por subcuenca, por el método de USDA fue 2.9, 2.2 y 1.6 veces respectivamente, mientras que utilizando el método de CN fue de 2.9, 2.6 y 1.6 veces. La sobreestimación promedio, por el método USDA (1964) fue de 2.3 y por CN fue de 2.4., (Figuras 3, 4, 5 y Cuadro 3). En síntesis, la comparación entre el escurrimiento observado y estimado por el método de USDA, (1964) y CN (USDA, 1995) arroja que ambos métodos indirectos sobrestiman de manera similar la esconetía anual en las subcuencas de Arroyo Guadalupe, Lagunillas y Río Queréndaro.

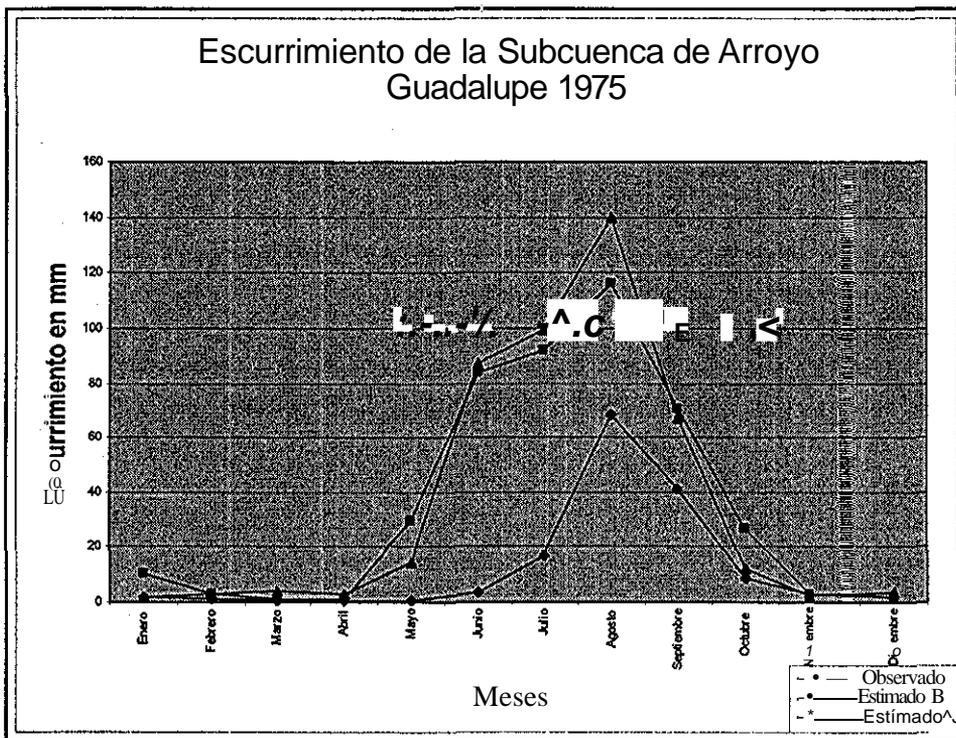


Figura 3., Escorrentamiento mensual de la subcuenca Arroyo Guadalupe de 1975

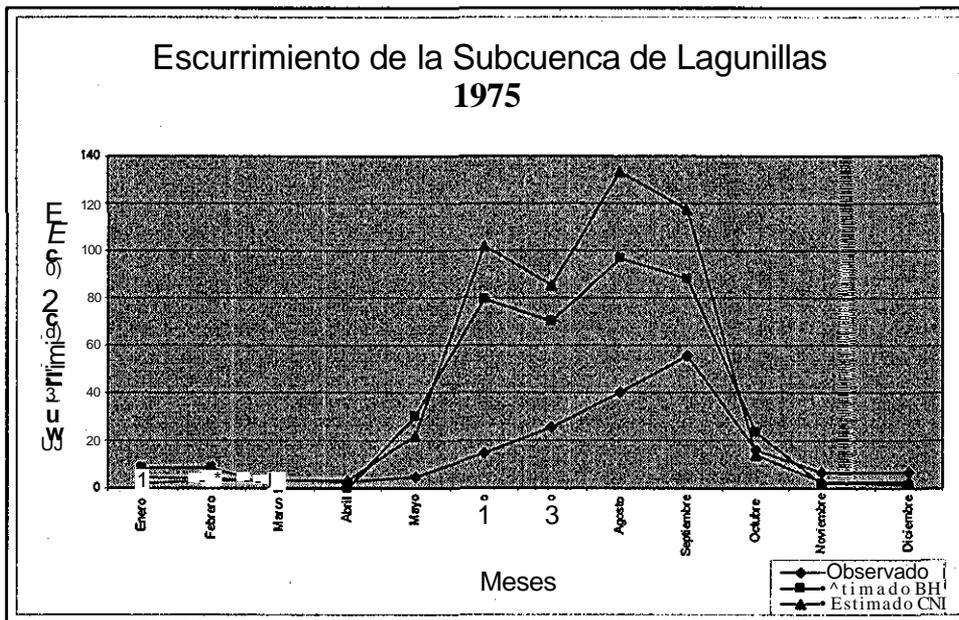


Figura 4 Escorrentamiento mensual de la subcuenca Lagunillas de 1975.,

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

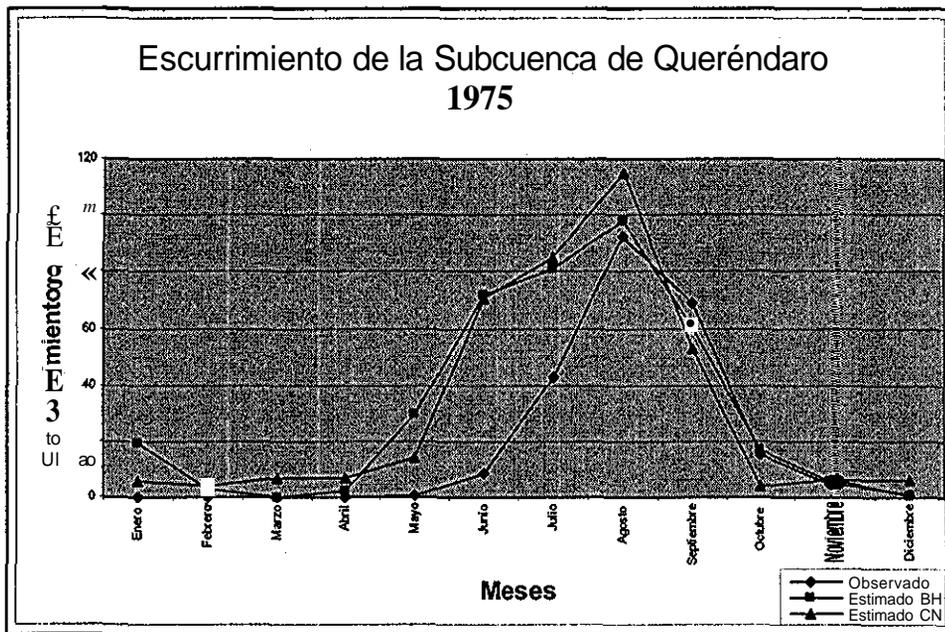


Figura 5 Escurrimiento mensual de la subcuenca Queréndaro de 1975,

Es importante mencionar que la estimación de la escotrentía se encuentra de los valores observados período comprendido entre los meses de enero - abril; sin embargo, para el periodo de mayo - agosto la sobrestimación aumenta; y al final de I año (agosto-diciembre) los modelos tienden a estimar mejor el comportamiento del escunimientto, Es decir, los modelos son menos eficientes para reproducir valores de esconentía durante la época de mayor producción de escunimienttos,, Sin embargo, los datos observados mensualmente presentan coeficientes de correlación de Pearson que indican dependencia lineal entre los dos conjuntos de datos (Cuadro 3).

Se utilizó una prueba de χ^2 con objeto de evaluar la semejanza entre los datos de escunimientto observados y predichos para el año de 1975,, Las hipótesis que se manejaron para aplicar la prueba, fueron: H_0 : No existen diferencias significativas entre los escunimienttos observados y las esperados en los modelos; y H_a : Existen diferencias significativas entre los escunimienttos observados y esperados con los modelos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Valores de escorrentía observados y estimados por los métodos de USDA (1964) y USDA (1986).

A. Gpe.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Oct	Nov	Dic	Annual	Pearson	1*
Observado	1.49	0.89	0.79	0.68	0.66	3.27	16.92	68.16	40.74	8.66	1.84	146.74		
Estimado BH	10.17	2.90	1.07	1.30	29.41	83.99	92.06	116.29	70.49	26.39	1.89	439.11	0.77	199.24
Estimado CN	1.84	2.64	3.81	2.64	14.55	87.08	99.57	139.63	67.17	11.94	3.21	436.59	0.79	197.52
Lagunillas														
Observado	4.77	3.77	3.25	2.61	4.76	14.50	25.28	40.33	55.20	16.01	6.46	183.41		
Estimado BH	8.85	8.45	0.00	0.25	29.97	79.02	69.87	96.58	88.11	23.27	1.83	407.40	0.86	122.12
Estimado CN	1.98	2.10	3.55	3.66	22.32	102.21	85.54	133.13	117.16	13.94	2.35	491.71	0.87	168.09
Observado	0.01	0.00	0.00	0.00	0.56	8.49	42.58	92.06	68.99	15.56	4.37	233.95		
Estimado BH	19.31	3.01	0.66	2.56	29.64	71.68	80.52	97.95	60.48	17.33	5.41	388.74	0.81	66.16
Estimado CN	5.48	4.14	6.83	6.75	14.00	70.46	84.62	114.87	52.78	4.23	6.42	376.94	0.83	61.12

Los datos analizados con el programa Statistica para Windows, versión 4,5, proporcionaron un valor de χ^2 relativamente grande, con 12 grados de libertad y con un nivel de significancia de 0,95 (Cuadro 4). Los valores obtenidos superan de forma notable los valores de χ^2 en tablas (28.20), por lo tanto se rechaza la hipótesis nula

Cuadro 4. Resultados de la prueba de χ^2 para las subcuencas.

Arroyo Guadalupe.			
BH		CN	
Chi-cuadrada total	63.16	Chi-cuadrada total	57.93
Valor P	0.0000	Valor P	0.0000
Grados de libertad	12	Grados de libertad	12
Lagunillas			
BH		CN	
Chi-cuadrada total	54.08	Chi-cuadrada total	60.59
Valor P	0.0000	Valor P	0.0000
Grados de libertad	12	Grados de libertad	12
Queréndaro			
BH		CN	
Chi-cuadrada total	83.99	Chi-cuadrada total	84.69
Valor P	0.0000	Valor P	0.0000
Grados de libertad	11	Grados de libertad	12

La caracterización de las subcuencas permite sugerir que la sobrestimación se incrementa en función de la complejidad de la CVUS. Por ejemplo, la subcuenca de Queréndaro se encuentra cubierta principalmente por bosques cenados con buena condición hidrológica (46%), seguido por cultivos en contorno con una condición hidrológica pobre (24%) y arbustos con condición hidrológica pobre (11%); es decir, el 81% de la subcuenca está cubierto por tres categorías distintas de cobertura. Mientras que las subcuencas de Lagunillas y Arroyo Guadalupe tienen una mayor variedad de CVUS (Cuadro 5).

Otro factor, que influye en los resultados es la alta permeabilidad de las laderas de origen volcánico reciente de las subcuencas. La caracterización geológica de las subcuencas indica que Arroyo Guadalupe y Lagunillas están constituidas por conos de lava y pequeños volcanes escudo del Pleistoceno medio a temprano (13 - 0.83 Ma) en 41 % y 31 %, respectivamente; mientras que la subcuenca de Queréndaro está constituida por la sucesión volcánica conformada principalmente por flujos de lava basálticos y andesíticos del Mioceno medio (16 - 14 ma) (28 %) y Conos andesíticos compuestos probablemente del Mioceno tardío (24 %) (Cuadro 6). Es decir, en la subcuenca conformada por materiales volcánicos relativamente más antiguos los modelos de estimación de escurrimientos son más eficientes.

Cuadro 5. Tipos de cobertura/tratamiento y condición hidrológica por subcuena en km² y porcentaje.

Subcuena	Cobertura/tratamiento y condición hidrológica	Area km ²	Area %	
Arroyo Guadalupe	Espacios abiertos (terrenos baldíos > 50 % de pastos) (regular)	0.11	0.11	
	Suelos desnudo (principalmente cárcavas)	0.15	0.15	
	Bosques (pobre)	0.27	0.26	
	Espacios abiertos (terrenos baldíos < 50% de pastos) (pobre)	0.59	0.57	
	Bosques (regular)	5.08	4.94	
	Arbustos (buena)	5.26	5.12	
	Bosques(buena)	5.85	5.69	
	Cultivos (en surcos rectilíneos) (regular)	8.87	8.63	
	Arbustos (pobre)	9.20	8.95	
	Arbustos (regular)	12.80	12.45	
	Pastizales (regular)	22.30	21.69	
	Lagunillas	Pastizales (buena)	0.01	0.00
		Combinación de árboles (huerta) (regular)	0.07	0.02
		Combinación de árboles (plantación) (pobre)	0.09	0.02
Cuerpos de agua		0.60	0.16	
Combinación de árboles (plantación) (buena)		0.77	0.21	
Combinación de árboles (plantación) (regular)		1.16	0.31	
Suelos desnudo (principalmente cárcavas)		1.53	0.41	
Espacios abiertos (terrenos baldíos > 50 % de pastos) (regular)		3.03	0.81	
Espacios abiertos (terrenos baldíos > 50 % de pastos) (pobres)		3.44	0.92	
Arbustos (buena)		6.38	1.71	
Bosques (pobre)		8.82	2.36	
Bosques (regular)		19.22	5.14	
Arbustos (pobre)		26.50	7.09	
Pastizales (regular)		38.63	10.34	
Bosques (buena)		38.84	10.39	
Arbustos (regular)		45.49	12.17	
Cultivos (en surcos rectilíneos) (regular)		67.81	18.14	
Cultivos (en contomo) (pobre)		111.35	29.79	
Queréndaro		Cultivos (en terraza y a contomo) (regular)	0.01	0.01
	Suelos desnudo (principalmente cárcavas)	0.07	0.05	
	Espacios abiertos (terrenos baldíos > 50 % de pastos) (regular)	0.20	0.15	
	Espacios abiertos (terrenos baldíos > 50 % de pastos) (pobre)	0.79	0.59	
	Arbustos (buena)	2.27	1.70	
	Bosques (pobre)	3.89	2.91	
	Pastizales (regular)	4.06	3.04	
	Bosques (regular)	6.75	5.06	
	Arbustos (regular)	6.92	5.19	
	Arbustos (pobre)	14.16	10.61	
	Cultivos (en contorno) (pobre)	32.47	24.33	
	Bosques(buena)	61.87	46.36	

Cuadro 6. Tipos de roca y edad por subcuena en km² y porcentaje

Subcuencas	Geología	Area Km ²	Area %
Arroyo Guadalupe	Depósitos piroclásticos de caída (varias posiciones estratigráficas)	0.39	0.379
	Depósitos superficiales	4.34	4.222
	Ignimbrita Laguna de Cuitzeo (Pleistoceno Tardío) (2.3 Ma)	26.39	25.67
	Basaltos y Andesitas Tarímbaro (Mioceno Tardío) (7.8 Ma)	29.15	28.36
	Conos de lava y pequeños volcanes escudo (Mioceno Medio a Temprano) (1.3-0.83 Ma)	42.53	41.37
Lagunillas	Cuerpos de agua	0.24	0.064
	Domos riolíticos y dacíticos (Pleistoceno Tardío y Medio) (1.03 - 0.14 Ma)	3.26	0.873
	Conos compuestos andesíticos (Mioceno tardío?)	4.48	1.2
	Sucesión volcánica estratificada de Mil Cumbres y área de Anganguero (principalmente flujos de lava basálticos y andesíticos (Mioceno medio) (16.2-14.1 Ma)	15.75	4.22
	Domos andesíticos de Pátzcuaro (Pleistoceno Medio) (0.66 Ma)	24.55	6.577
	Volcanes monogenéticos (Holoceno a Pleistoceno Medio) conos cineríticos y flujos relacionados (con emisión ventana de emisión)	26.43	7.081
	Conos de lava andesíticos (Pleistoceno temprano - Pleistoceno tardío) (2.9 - 1.3 Ma)	32.23	8.635
	Sucesión volcánica estratificada del área de Tafetán (conglomerado volcánico, flujos de lava basálticos a dacíticos y tefras) (Mioceno temprano a Oligoceno)	32.66	8.75
	Depósitos superficiales	116.3	31.17
	Conos de lava y pequeños volcanes escudo (Pleistoceno medio a temprano) (1.3 - 0.83 Ma)	117.3	31.43
Queréndaro	Depósitos superficiales	0.38	0.286
	Basaltos Laguna de Cuitzeo (Pleistoceno medio) (0.87 - 0.75 Ma)	1.38	1.038
	Domos riolíticos y dacíticos (Pleistoceno tardío y medio) (1.03 - 0.14 Ma)	3.23	2.43
	Volcanes monogenéticos (Holoceno a Pleistoceno medio) conos cineríticos y flujos relacionados (con emisión ventana de emisión)	5.36	4.032
	Ignimbrita El Terreno (Mioceno tardío) (6.1 Ma)	10.38	7.809
	Domos riolíticos y dacíticos (Pleistoceno tardío y medio) (1.03 - 0.14 Ma)	11.35	8.538
	a) piroclastos de caída y depósitos de flujo		
	Conos compuestos andesíticos (Mioceno tardío?)	31.54	23.73
	Depósitos piroclásticos de caída (varias posiciones estratigráficas)	31.87	23.98
	Sucesión volcánica estratificada de Mil Cumbres y área de Anganguero (principalmente flujos de lava basálticos y andesíticos (Mioceno medio) (16.2-14.1 Ma)	37.44	28.17

La estimación por medio de métodos indirectos implica un grado de diferencia con relación a los datos observados en el campo. Los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran entre los rangos de sobrestimación y subestimación previamente obtenidos en estimación de escurrimientos con modelos espacialmente distribuidos en grandes cuencas (Arnell, 1999; Wood y Blackburn, 1984).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la comparación de la estimación del escurrimiento a partir de dos métodos útiles en la planeación de recursos en cuencas hidrológicas. Los resultados obtenidos indican que ambos métodos sobreestiman el escurrimiento a nivel de pequeñas subcuencas. La sobrestimación es resultado de la composición geológica de la zona y de la variabilidad de coberturas vegetales y del uso del suelo.

La sobrestimación de la escurrimiento se encuentra dentro de los rangos de error encontrados en trabajos que utilizan modelos hidrológicos espacialmente distribuidos para grandes áreas geográficas. Este tipo de enfoques basados en las características

físicas de la cuenca (roca, suelos, relieve, cobertura vegetal) son útiles en la elaboración de planes de manejo, especialmente en países subdesarrollados, donde la red de aforos hidrométricos es escasa o nula. Sin embargo, una tarea de investigación que se desprende de este trabajo es buscar coeficientes de corrección para ajustar las estimaciones de escofentía en ambientes volcánicos recientes y con una variada cobertura vegetal, lo cual permitirá construir modelos más eficientes bajo estas condiciones.

Cuando se trabaja el efecto del cambio de CVUS, especialmente, cuando los modelos son espacialmente distribuidos y se aplican a grandes áreas pobremente aforadas, en relación a ía precipitación, temperatura y escurrimientos, la comparación entre las condiciones hidrológicas antes y después del cambio CVUS se convierte en objeto del análisis; y la magnitud de los valores estimados para ambos pierde relevancia, ya que ambos presentan errores con el mismo orden de magnitud,, Especialmente, este tipo de enfoques es importante, si no se cuentan con datos de aforos para validar los resultados del modelo, La pobreza de datos de campo existe en la mayoría de los países subdesarrollados,,

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionatizaación ecológica, conservación de recunos y ordenamiento territorial de ía cuenca de Cuitzeo*. Se agradece la colaboración en la construcción y edición de bases de datos a Vicente Salinas, Alejandra Acosta y Ergilin Cuevas, El primer autor agradece el apoyo económico proporcionado por el CONACyT y la UNAM a través de las becas de doctorado recibidas.

REFERENCIAS

Anderson, IR, EJE. Hardy, J.T. Roach y RE. Witmer (1976), *A land use and land cover classification system for use with remote sensing data*. Geological Survey Professional Paper 964:28 pp.

Arnell, N.W., (1999), "A simple water balance model for simulation of streamflow over a large geographic domain", *Journal of Hydrology*, 217: 314-335.

Beek, M. (1996), *Drainage pattern analysis and extraction of hydrologic properties from digital elevation models*, M.Se. Thesis in Land Resources and Management, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe: 45 p.,

Bhaduri B., M Grove, C. Lowry y J. Harbor (1997), "Assessment of long-term, hydrologic effects of land use change., The curve number technique for calculating runoff is modified to estimate lost groundwater recharge". *Journal of American water works association* 89 (11): 94-106,

Brooks, K, PF. Ffoíliott, H.M. Gregersen y I.L. Thamnes (1992), *Hydrology and the management of watersheds*, Iowa: Iowa University Press/AMES.

Calvo, J.C (1986), "An evaluation of Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica", *Hydrological Science Journal*, 31 (3): 51-60.

Chow, V.T. (1964), *Handbook of Hydrology. A Compendium of Water-resources Technology*. New York: McGraw Hill.

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

- Dunne, T. y L.B. Leopold (1978), *Water in Environmental Planning*, San Francisco: W., H. Freeman and Company.,
- Fernández, D. S, J.,L. Otopeza, M, Martínez, B. Figueroa y O.L. Palacios (1999), "Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca "El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México", *Agrociencia*, 33: 1-9.
- Gleick P., H. (1987), "The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento basin", *Water Resources Research*, 23 (6): 1049-1061.
- Harbor, J. (1994), "A practical method for estimating the of land-use change on surface runoff groundwater recharge and wetland hydrology", *Journal of the American Planning Association*, 60 (1): 95-108.
- Knight C.G, H. Chang, M.P., Staneva y D. Kostov (2001), "A simplified basin model for simulating runoff: the struma river GIS", *Profesional Geographer*, 53 (4): 533-545.,
- López-Granados, E., y G. Boceo (2001), "Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo", En: Mendoza-Cantú, ME., López-Granados, E. y G. Boceo (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: 266 pp.
- Maidment, D.R. (1993), "GIS and Hydrologic Modeling". In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T. Steyaert, editors. *Environmental Modeling with GIS*. New York: Oxford University Press: 488 p
- Maidment, D.R. (1996), "GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress", In *Proceedings Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, Santa Barbara, CA, NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html,
- Mcguffie, K., A. Henderson-Sellers y H. Zhang (1998). "Modelling climate impacts of future rainforest destruction". In: Malovey, BK. (editor) *Human Activities and the Tropical Rainforests*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- Meijerink, A.M.J., H.A.M. de Brouwer, C.M. Mannaerts y C.R. Valenzuela (1994), *Introduction to the use of Geographical Information Systems for Practical Hydrology*, UNESCO, International Hydrology Programme and ITC publication No. 23, Enschede, The Netherlands: 243 p.,
- Mendoza, M.E, G. Boceo y E. López (en prensa), "Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, Bases para su ordenamiento territorial", In Barón, L, et al *La cuenca de Cuitzeo: problemas y perspectivas de desarrollo*. Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), Universidad Autónoma de Chapingo (UACH),
- Mendoza, M,E, G. Boceo, E. López y M. Bravo (2002, en prensa), "Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cenada del lago de Cuitzeo, Michoacán",

Investigaciones Geográficas núm. 49, Boletín del Instituto de Geografía UNAM, México,

Mota, F., y L.R. Iverson (1998), "On the sources on vegetation activity variation, and their relation with water balance in México", *International Journal of Remote Sensing*, 19 (10): 1843-1871.

Olivera, F. (1996), *Spatial distributed modeling of storm runoff and non-point source pollution using geographic information systems*, PhD Thesis University of Texas at Austin,

Olsson, L. y P. Pilesjo (1999), "Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment", In ITC Shoit Course of Environmental Modelling, <http://www.natgeo.ju.se/lennartweb>,

SARH-CP (1991), *Manual de Conservación del Suelo y el Agua*, SARH-CP-SPP, México.

Thorhwaite, C. y J. Matter (1955), *The Water Balance, Publication in Climatology*, Centeron, New Jersey: Drexel Institute of Technology,

USDA (1986), *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Conservation Engineering División Technical Release 55,

Verstappen, H.Th. y R. Van Zuidam (1991), *The ITC System of Geomorphologic Survey. A basis for the evaluation on natural resources and hazards*. ITC publication No. 10, Enschede; The Netherlands: 89 p.

Vörösmarty G.J., B., Moore III, A., L., Grace, M. P. Gildea, I.M. Melillo, B., Peterson, E., B. Rastetter y P.A. Steudler (1989), "Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America", *Global Biogeochemical Cycles*, 3 (3): 242-265,

Vörösmarty C.J., B., Moore III (1991), "Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi tivel", *Surveys in Geophysics*, 12: 271-311 pp

Wood, M.K. y W.H. Blackburn (1984), "An evaluation of hydrologic soil groups as used in the SCS runoff method on rangelands", *Water Resources Bulletin*, 20: 379-389.

Xu, C.Y. y G.L. Vandewiele (1994), "Sensitivity of rainfall-runoff models to input enois and data length", *Hydrological Science Journal*, 39 (2): 157-176.

Xu, C.Y. (2000), Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments. *Water Resources Management*, 13: 369-382.

Referencias cartográficas

INEGI, 1971., Carta de edafología., Puruandiro F14 C82, escala 1:50,000.

INEGI, 1973., Carta de edafología., Acámbaro F14 C84, escala 1:50,000,

INEGI, 1973., Carta de edafología., Moroleón F14 C83, escala 1:50,000.,

INEGI, 1979., Carta de edafología., Cuitzeo E14 A13, escala 1:50,000.

INEGI, 1979., Carta de edafología., Morelia E14 A23, escala 1:50,000.,

INEGI, 1979., Carta de edafología., Pátzcuaro E14 A22, escala 1:50,000,

INEGI, 1979. Carta de edafología., Tzitzio E14 A24, escala 1:50,000.,

INEGI, 1979., Carta de edafología., Villa Escalante E14 A32, escala 1:50,000.

INEGI, 1979., Carta de edafología., Zinapécuaro E14 A14, escala 1:50,000.,

INEGI, 1982, Carta de edafología. Coeneo de la Libertad E14 AI2, escala 1:50,000.,

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

INEGI, 1983, Carta de edafología, Maiavatio E14 A15, escala 1:50,000.,

Pasquaié, G, L. Ferrari, V.H., Garduño, A, Bibaldi y L. Vezzoli, 1991. *Geologicmap of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México*. Map and Chart Series MCH072., Geological Society of America.

Capítulo 7

Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo, Michoacán¹

Resumen

El presente estudio intenta contribuir en la comprensión de las implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS) a nivel regional en el balance hídrico espacialmente distribuido (BHED) en una cuenca poco aforada para los años de 1975 y 2000. Los resultados de esta investigación son producto de la integración de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica con un modelo de balance de agua; además, se utilizaron técnicas de análisis de dinámica de cambio. El análisis del cambio de los componentes del BHED a nivel de formas de relieve y por matrices de transición determinó que durante el periodo de estudio las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca no se modificaron sustancialmente. Sin embargo, las planicies y los piedemontes, mostraron un incremento en los valores de escorrentía, como resultado de un incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos. En ambos años, las formas de relieve de las zonas bajas de la cuenca, se apreció que existe fuerte presión sobre el recurso hídrico lo cual repercute en el deterioro del Lago de Cuitzeo, principalmente por contaminación y reducción del suministro de agua superficial al vaso. El enfoque integral utilizado puede representar una alternativa viable para entender el cambio en la distribución y cantidad del agua disponible en cuencas poco aforadas como resultado de un CCVUS.

Palabras clave: Sistemas de información geográfica y percepción remota, matrices de transición, análisis regional, cambio de cobertura vegetal y del suelo, balance hídrico, cuencas poco aforadas.

Abstract

This study was conducted to understand the implications of regional land-cover and land-use change (LCL-UC) in a spatially distributed water balance (SDWB) within a poor gauged basin for the years 1975 and 2000. To accomplish this purpose, remote sensing and geographic information system tools were integrated with a water balance model. Also it was used a transitional matrix analysis. The analysis of the water balance components, based on landforms and transitional matrix, indicated a small tendency of improvement in the regional hydrologic conditions in the basin. However, as a consequence of urban land use growth, the plains and footslopes of the basin showed an increase in runoff values. In addition, in both years, the topographically lower section of the basin exhibited a high demand for water resources due to increased urban land use, along with the Cuitzeo lake degradation, particularly in terms of pollution and reduction of superficial water supply. The approach used herein can be a viable alternative for understanding the change in quantity and spatial distribution of water available in poor gauged water basins as a consequence of LCLUC.

Keywords: Geographic information systems, remote sensing, transitional matrix, regional analysis, land-cover and land-use change, water balance, poor gauged basins,

¹ Mendoza, M E., G. Boceo, E. López y M. Bravo (2002, en prensa), "Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán", *Investigaciones Geográficas* 49, *Boletín del Instituto de Geografía UNAM*.

INTRODUCCIÓN

El ciclo del agua y sus componentes precipitación, intercepción, escunimiento, evaporación, transpiración y otros procesos subsuperficiales, incluyendo la recaiga del agua subterránea, son temas centrales de la hidrología., Cada uno de los conrponentes presenta una gran variación espacial y temporal, y juega un papel ciítico en «diversos procesos físicos, químicos y biológicos que regulan el sistema terrestre, donde la actividad humana es inseparable de los eventos naturales (Dunne y Leopold, 1978; Elkaduwra y Sakthivadivel, 1998). Actualmente se reconoce que el hombre está alterando el ciclo hidrológico a escala local y global. El cambio de la cobertura vegetal asociado con la expansión de la agricultura, la urbanización y la contaminación tienen una profunda influencia en los procesos hidrológicos, que es necesario investigar tanto en cuencas pequeñas como a nivel regional (Sahagian, 2000; Sharma *et al*, 2000),. El modelamiento a nivel regional del balance hídrico requiere de modelos hidrológicos capaces de sei aplicado-s sin calibración a nivel de cuenca, sobre grandes dominios geográficos (Ainell, 1999)

El modelamiento hidrológico en pequeñas cuencas o a nivel regional es ampliamente utilizado y ha demostrado su utilidad en la evaluación del impacto del cambio de uso del suelo (Henderson-Sellers *et al*, 1993; Kite, 1993; Harbor, 1994; BaAhuri *et al*, 1997; Sharma *et al*, 2000), cambio climático a largo plazo (Gleick, 1987; Vóiró'smarty y Moore, 1991; Rind, 1992; Nikolaidis *et al*, 1993; McGuffie *et al* 1998; Xu, 2000) y si el modelamiento incluye la dinámica del carbón, nutrientes y sedimentos pxxeden servir como una herramienta semi-mecánica para cuantificar el transporte de materiales y contaminación no puntual (V6"ró"smaity *et al*, 1989; Olivera, 1996),.

El manejo de cuencas hidrológicas proporciona el marco conceptual y esjpcial que permite elaborar e implementar normas y prácticas de conservación basadas en e2 entendimiento de procesos e interacciones ecológicas y sociales necesarias para aseg-urar la integridad ecológica de la cuenca y el suministro de productos para una població*n en aumento; así como evaluar el impacto de las actividades del hombre en los procesos hidrológicos; (EPA, 1995; Ersten, 1999; Jain *et al*, 2000). Sin embargo, debemos admitir que no se pueden realizar^l diagnósticos veraces o manejos apropiados, sí los datos hidrológicos son insuficientes para un análisis regional (véase Bergrtróm y Graham, 1995),. El problema se ha resuelto cuantificando los procesos hidrológicos en períodos del orde=n de varios años o bien simulado los procesos hidrológicos de la cuenca (Bastiaanssen, 2000a),

En hidrología, al igual que en otras ciencias, el desarrollo de nuevos métodos de medición han permitido avances significativos en el conocimiento de relacionéis funcionales. Sin embargo, existen insuficiencias de tipo metodológico para el análisisLs de cuencas con ausencia de datos hidrométricos (Mendoza *et al*, 2002a), En muchas regiones las redes hidro-meteoiológicas son muy poco densas e incluso inexistentes d_ebido, entre otras razones, a que su establecimiento y mantenimiento es oneroso, particulai miente, por^l el costo del equipo, su operación y el desarrollo de bases de datos., Lo anterior motiva la necesidad de desarrollar métodos indirectos (Meijerink *et ai*, 1994; Beek, 19^6; Osman, 1996; Olsson y Pilesjo, 1999; Bastiaanssen, 2000a; Bastiaanssen, 2000b),. Bajo una perspectiva no convencional, los métodos indirectos requieren reconocer las características y distribución espacial de escuiiimientos y los componentes bióticos y abióticos de las cuencas, así como las relaciones espaciales y temporales entre estos (Schaumm, 1964; entre otros).

El objetivo de este trabajo fue analizar el cambio en el balance hídrico medio anual espacialmente distribuido, para dos tiempos (1975 y 2000), en la cuenca del Lago de Cuitzeo Michoacán. La meta fue entender las implicaciones del cambio de cobertura vegetal a nivel regional en una cuenca poco aforada,

La estimación del balance hídrico medio anual se basa en la construcción de modelos mensuales de balance hídrico, los cuales son herramientas para el manejo de recursos hídricos (Xu y Vandewiele, 1994; Mendoza *et al*, 2002a,b). En consecuencia, la comprensión del cambio hidrológico regional proporciona bases para la planeación y manejo de recursos terrestres e hídricos de grandes cuencas.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Lago de Cuitzeo se localiza en el Cinturón Volcánico Transmexicano, entre los 19°30' y 20°05' latitud norte y 100°35' y 101°30' longitud oeste y ocupa una superficie de aproximadamente 4,000 km² (Figura 1). La cuenca está conformada por colinas, lomeríos altos y planicies, es decir, es una cuenca relativamente plana y con poca amplitud de relieve, la cual se desarrolla sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica del Mioceno al Cuaternario (Mendoza *et al*, en prensa; PasquarS *et al*, 1991). La cobertura vegetal predominante corresponde a las clases matorrales, bosque y cultivos (López y Boceo, 2001).

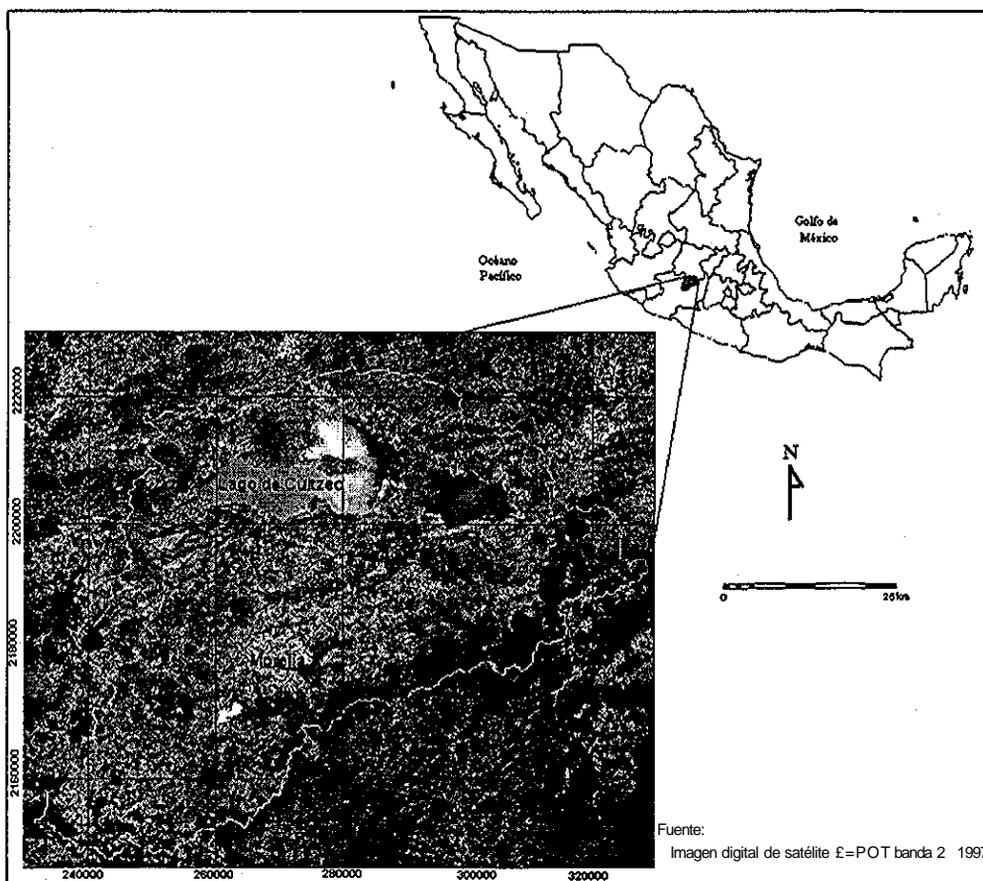


Figura 1., Localización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Balance Hídrico

El balance hídrico desarrollado por Thornthwaite y Mather (1957) puede estimarse para un pequeño volumen de suelo o para una cuenca. En esencia el método permite elaborar una contabilidad mensual de la humedad del suelo, la evapotranspiración real, el drenaje y la escorrentía a partir de registros de precipitación y evapotranspiración potencial y observaciones de la vegetación y los suelos (Dunne y Leopold, 1978). Al utilizar un sistema de información geográfica (SIG), el balance de agua se modela tomando en cuenta la distribución espacial de la precipitación, evapotranspiración potencial y las características del suelo, en donde cada píxel es tratado como un balance hídrico individual. Considerando el caso más simple, esto es, bajo condiciones naturales (pe., sin extracciones por bombeo), con referencia a una cuenca en donde coinciden los límites topográfico y freático, y donde el agua subterránea ocurre en acuíferos no confinados, el balance de agua se representa con la siguiente ecuación (Freeze y Chewy, 1979):

$$P - Q - ETA = (R_i + R_{sw}) - CR - Q_{GW} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde P es precipitación, Q es el escurrimiento superficial, ETA es la evapotranspiración actual, $(R_i + R_{sw})$ es la recarga del aerífero (por infiltración y/o desde cuerpos de agua superficiales), CR es el movimiento del agua subterránea hacia la zona de capilaridad y QGW es la contribución del agua subterránea al caudal de corrientes naturales. Todos los componentes representan flujos o almacenamientos sobre periodos de tiempo arbitrarios, en este caso, en el largo plazo (1 año), por lo tanto, los cambios en almacenamiento son insignificantes.

Para los fines del presente trabajo se hará énfasis en el cálculo de los términos del lado izquierdo, particularmente para cuencas que carecen de registros de aforo. La estimación de los términos del lado derecho escapan a los propósitos de este trabajo, sin embargo, se abordaran en términos generales,

En el modelo original de Thornthwaite y Mather (1957), la estimación del escurrimiento superficial, llamada excedente de humedad, se obtiene como una proporción del agua que no puede ser almacenada en el suelo; los autores sugieren que para grandes cuencas el 50 % del excedente de agua para cualquier mes escurre superficialmente y que el restante 50% es retenido temporalmente en la cuenca para abastecer la escorrentía del mes siguiente (Thornthwaite y Mather, 1957; Dunne y Lepold, 1978).

En el modelo del presente trabajo, primero se estimó la escorrentía en función de las características biofísicas de la cuenca (relieve, pendiente, textura y profundidad de suelos, cobertura vegetal y uso del suelo). Posteriormente, se sustrajo de la precipitación, el escurrimiento, para calcular la precipitación efectiva; ésta se define como la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento superficial. Se asume que el excedente de humedad en el suelo es, en este caso, principalmente agua para la recarga del manto freático. A continuación se describe el procedimiento utilizado para estimar los componentes del balance hídrico espacialmente distribuido (Figura 2).

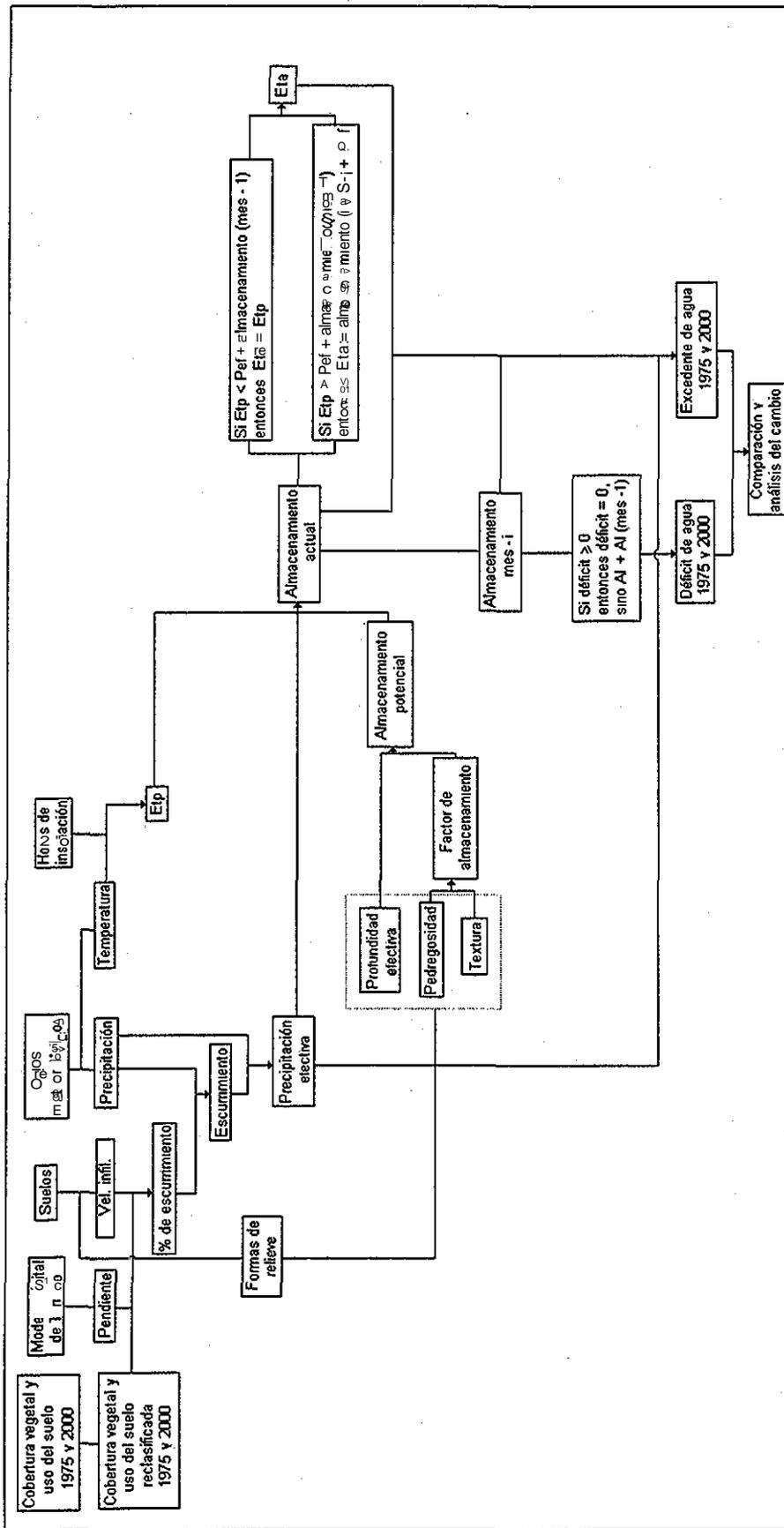


Figura 2. Esquema del método utilizado en la investigación. AI = almacenamiento

Geomorfología y cobertura vegetal y uso del suelo

La interpretación geomorfológica se realizó en fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro escala aproximada 1:50,000 de 1975 a partir de claves estándar de fotointerpretación (Verstappen y Van Zuidam, 1991), con la cual se discriminan laderas en forma jerárquica Mendoza *et al.* (en prensa)., Los mapas cobertura vegetal y uso del suelo (CVUS) se derivaron de la interpretación realizada por López-Granados (en preparación) sobre fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro de 1975 y 2000, a escala aproximada 1:50,000 y 137,000, respectivamente (López-Granados, en preparación; López y Boceo, 2001) La interpretación de la CVUS se realizó bajo criterios de clasificación fisonómica-estructural (Anderson *et al.*, 1976), considerando las categorías requeridas en el modelo hidrológico utilizado,

Cálculo de los componentes del balance hídrico

Precipitación y temperatura

La precipitación y la temperatura son parámetros de entrada en el balance de agua y su representación adecuada en un modelo hidrológico es importante, pero difícil, La interpolación de isoyetas e isotermas es compleja cuando la cobertura de estaciones meteorológicas es baja, como es el caso de la cuenca en estudio. En el presente trabajo, la precipitación media mensual (Pmm) y la temperatura media mensual (Tmm) se calcularon a partir de los registros históricos de 42 estaciones meteorológicas localizadas tanto al interior de la cuenca como en sus alrededores (Mendoza *et al.*, en preparación a). El cálculo y los mapas de Pmm y Tmm se realizaron mediante técnicas de interpolación lineal utilizando el inverso de la distancia,,

Evapotranspiración potencial

El cálculo de la evapotranspiración potencial (Etp) se realizó con el modelo de Serruto (1993); se usó este método porque considera dos variables que Thornthwaite y Matter (1957) incluyeron en sus modelos: la Tmm y la radiación solar (esta última calculada por la FAO, 1976) para diferentes latitudes. Siguiendo este procedimiento se construyó la distribución mensual de la Etp. El modelo propuesto por Serruto (1993) es el siguiente:

$$Etp = (0,003*(RS)^{25} + 0,16*(T)^{088}) * 31 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

T = temperatura media mensual en °C (mapas corregidos)

RS = radiación solar en equivalente de evaporación en mm/día

Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial es la porción de la precipitación que no se infiltra ni se acumula en la superficie en el suelo, pero que fluye aguas abajo como flujo laminar o concentrado (Chow *et al.*, 1988). Existen diversos métodos para medir y estimar el escurrimiento (Esc),. El método utilizado en el presente trabajo es simple, considera que el Esc se produce a partir del exceso de agua que se genera en toda la cuenca,. En este método

el Esc es una función de la precipitación, textura del suelo, velocidad de infiltración, CVUS, y pendiente del terreno (USDA, 1964 citado por Beek, 1996).

Con fines prácticos se relacionó la permeabilidad y la velocidad de infiltración (SARH-CP, 1991). La permeabilidad es una característica física del medio poroso; por lo tanto, está relacionada con la distribución y tamaño de poros y la continuidad de éstos (Hillel, 1998). Es muy probable, aunque no necesariamente que un suelo con alta porosidad exhiba una alta velocidad de infiltración. A su vez, la infiltración puede ser estimada a partir de clases texturales (SARH-CP, 1991). Para representar la distribución de las clases texturales de suelos en la cuenca se utilizó la cartografía de INEGI (1971; 1973; 1979; 1982; 1983); en ésta se identifican tres categorías: fina, media y gruesa. Estas categorías texturales se traducen en velocidad de infiltración baja (0.2 a 2 cm/h), media (2,0 a 12,5 cm/h) y alta (> 12.5 cm/h), respectivamente (SARH-CP, 1991).

Los mapas de CVUS de cada fecha (1975 y 2000) se cruzaron con el mapa de velocidad de infiltración para obtener una tabla de dos dimensiones para cada año. La tabla anterior de vegetación y velocidad de infiltración se cruzó nuevamente con el mapa de pendientes obteniendo una matriz de dos dimensiones con la cual se clasificó el porcentaje de escunimiento, de acuerdo con el US Soil Conservation Service (1964, en Beek, 1996). El mapa de pendientes en porcentaje se construyó a partir de la aplicación de filtros direccionales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT).

Finalmente, los mapas de porcentaje de escunimiento mensual se multiplicaron por cada mapa de Pmm, con objeto de generar la distribución mensual del Esc medio. Por sustracción en cada uno de los mapas de Esc medio mensual, y de los correspondientes mapas de precipitación, se crearon doce mapas de precipitación efectiva (Peí); es decir, la cantidad de agua que se infiltra en el suelo.

Almacenamiento potencial de la humedad del suelo

La cantidad de agua almacenada en el suelo, útil para las plantas, es factor importante en el balance hídrico. Es importante calcular la máxima cantidad de agua que puede almacenar el suelo, la cual puede definirse por una relación entre la textura y la pedregosidad de la matriz del suelo (Landon, 1984).

La pedregosidad fue estimada para toda la cuenca en función de las fases físicas y de las asociaciones de los mosaicos de suelo del mapa sin generalizar de INEGI. Del mapa de fases físicas se extrajo la categoría "pedregoso", y posteriormente se cruzó con las asociaciones de suelos. Para cada asociación con pedregosidad se estimó el porcentaje potencial de pedregosidad.

La distribución de la profundidad de suelos y la textura se obtuvo de la reclasificación de las unidades de relieve, en función de la clase de profundidad más representativa. Se utilizaron los datos de 156 pozos de suelo y sus análisis de laboratorio, los cuales fueron elaborados por INEGI (1971; 1973; 1979; 1982; 1983). Con objeto de incluir en el modelamiento el carácter volcánico reciente en la cuenca y su capacidad de retención de agua, se extrajeron del mapa de relieve las clases "conos volcánicos" y "coladas de lava". Este tipo de unidades poseen una alta permeabilidad por sus características físicas. El mapa

de texturas fue el resultado de la integración del mapa de texturas preliminar con el mapa de conos y coladas., Finalmente, las bases de datos de textura y pedregosidad se combinaron por medio de una reclasificaron con un cuadro de doble entrada.

Cálculo del almacenamiento real de humedad

El almacenamiento real varía con el tiempo debido a la P_{ef} que aporta el agua y a la evapotranspiración que la sustrae. De acuerdo al modelo de Thoithwaite y Matter (1957), es necesario reflejar las variaciones mensuales tomando en cuenta q_i^* el mes anterior puede almacenar agua, siempre que la precipitación sea mayor a la evapotranspiración, con lo cual se tendría incremento en el almacenamiento en el suelo., El agua se almacenará hasta la capacidad de almacenamiento potencial, la cual es determinada por la porosidad y profundidad del suelo ($S_{(a)} = S_{(p)}$), En la estructura del balance se considera que cualquier exceso que rebasa la capacidad de campo se transfórmala en excedente de agua, el cual se percolará, como se mencionó anteriormente. La siguiente expresión muestra esta relación:

$$S(a) = P_{(ef)} + S(a)_{mes_i} - E_{tp} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde: $0 \leq S_{(a)} \leq S_{(p)}$

$S(a)$ = almacenamiento real en mm

$P_{(ef)}$ = Precipitación efectiva en mm

$S(a)_{mes-1}$ = almacenamiento real del mes anterior

E_{tp} = Evapotranspiración potencial

Evapotranspiración real

La E_{tp} es la cantidad que teóricamente puede evaporarse si existiera suficiente agua, considerando tanto el agua precipitada en el mes como agua almacenada en el suelo. La Evapotranspiración real (E_{tr}), por su parte, es la cantidad de agua que realmente transpiran las plantas más la que se evapora del suelo desnudo. En el caso de que exista suficiente agua y energía (o en situaciones de exceso) la E_{tr} es igual a la E_{tp} . Si no hay suficiente agua la $E_{tr} < E_{tp}$.

Con base en el modelo utilizado, la E_{tr} depende de la P_{ef} de la E_{tp} y del almacenamiento del agua en el suelo en el mes anterior. Cuando la P_{ef} y el almacenamiento del mes anterior es igual o mayor que la evapotranspiración potencial, la E_{tr} es igual a la E_{tp} . Si la P_{ef} más el almacenamiento del mes anterior es menor que la E_{tp} , la E_{tr} es igual a la P_{ef} y al almacenamiento del mes anterior, es decir,

$$P_{(ef)} + S(a)_{mes_i} \geq E_{tp} \text{ entonces } E_{tr} = E_{tp} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{Sino } E_{tr} = P_{(ef)} + S(a)_{mes_i}$$

Los cálculos se inician a partir de junio, mes que presenta la retención de humedad, ya que el mes de mayo es el primer mes de lluvia. Para el mes de junio se utilizó el mapa de capacidad de retención de humedad real como valor de almacenamiento del mes de mayo. En los meses siguientes el almacenamiento fue calculado con el valor del mes anterior para cada mes, considerando como inicio el mes de junio, Cuando los valores de almacenamiento real calculados fueron negativos, se reclasificaron como cero.

Déficit de agua medio mensual en el suelo

La cantidad de agua en el suelo descenderá cuando la P_{ef} sea menor que la E_{tp} , produciéndose un almacenamiento igual a cero, sin embargo, las plantas siguen requiriendo agua para transpirar, entonces ocurre un déficit (Def). El déficit en este caso no se refiere a la situación de estrés de las plantas conocido como punto de marchitez permanente. En este caso los cálculos comenzaron en el mes de junio obteniéndose un mapa de déficit para cada mes. El déficit se estima mediante la siguiente ecuación:

$$Def = E_{tp} - P_{ef} + S(a)_{mes} - i \quad \text{Ecuación 6}$$

Excedente de agua medio mensual en el suelo

Cuando la P_{ef} es mayor que la evapotranspiración potencial, la cantidad de agua almacenada en el suelo aumenta hasta el nivel máximo que permite la capacidad de almacenamiento potencial ($S(a) = S(p)$). Si más agua entra al suelo, el modelo la considera como excedente de agua (Exc), que se percolará. Se calculó un mapa de excedente de agua en el suelo para cada mes, La siguiente ecuación expresa esta relación:

$$Exc = P_{ef} - E_{tr} - S(a) + S(a)_{mes} - i \quad \text{Ecuación 7}$$

Balance hídrico anual

Los mapas de los componentes del balance hídrico medio mensuales de cada año fueron agregados a fin de generar mapas de componentes medios anuales de 1975 y 2000. Estos mapas fueron reclasificados considerando criterios estadísticos para cada componente y para cada par de años (1975 y 2000), toda vez que estos mapas se comparan entre sí. Los intervalos de reclasificación se denominaron Muy Alto, Alto, Moderado, Bajo y Muy Bajo. Donde generalmente, el valor medio se ubica en el intervalo Moderado.

Por último, se analizó el cambio de los componentes del balance hídrico para toda la cuenca. Para ello se cuantificó en primer lugar el cambio general de la categoría por componente y la dinámica del cambio a través de matrices de transición. En cada matriz la diagonal, representa la probabilidad de cada categoría de permanecer o mantenerse de un tiempo a otro (Luenberger, 1979), En este trabajo se construyeron matrices de transición con las superficies obtenidas de cada uno de los mapas que representan los componentes del balance hídrico en 1975 y 2000. A partir de ellas se elaboraron matrices de probabilidad de transición para cada una de las clases de cada componente, Se supuso que la probabilidad de transición (P_{ij}) de cada clase de la matriz es proporcional a la superficie remanente de la misma clase entre 1975 y 2000, Su expresión matemática es:

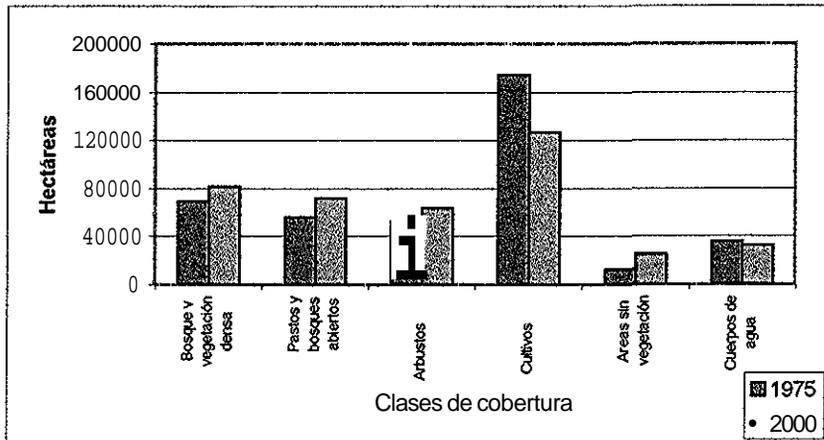
$$P_{ij} = S_{ij}(1975)/S_j(2000) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde S_{ij} es la superficie del elemento "ij" de la matriz de transición de cada componente del balance hídrico en 1975 y " S_j " la superficie de la clase de cada componente del balance hídrico "j" en 2000. De esta manera, para cada categoría de cada componente "j", $\sum P_{ij} = 1$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambio de cobertura y uso del suelo

Las clases de CVUS predominantes en la cuenca en 1975 y en 2000 correspondieron a cultivos (44% y 32%, respectivamente), seguida por la categoría de bosques y vegetación densa (17 y 20%, respectivamente). En el periodo de estudio los bosques y vegetación densa, pastos y bosques abiertos, y arbustos se incrementaron en 18, 28 y 20%, respectivamente (Figuras 3, 4 y 5). Un análisis más detallado de la dinámica del cambio de cobertura y uso del suelo se presenta en López-Granados (en preparación).



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3. Cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo,.

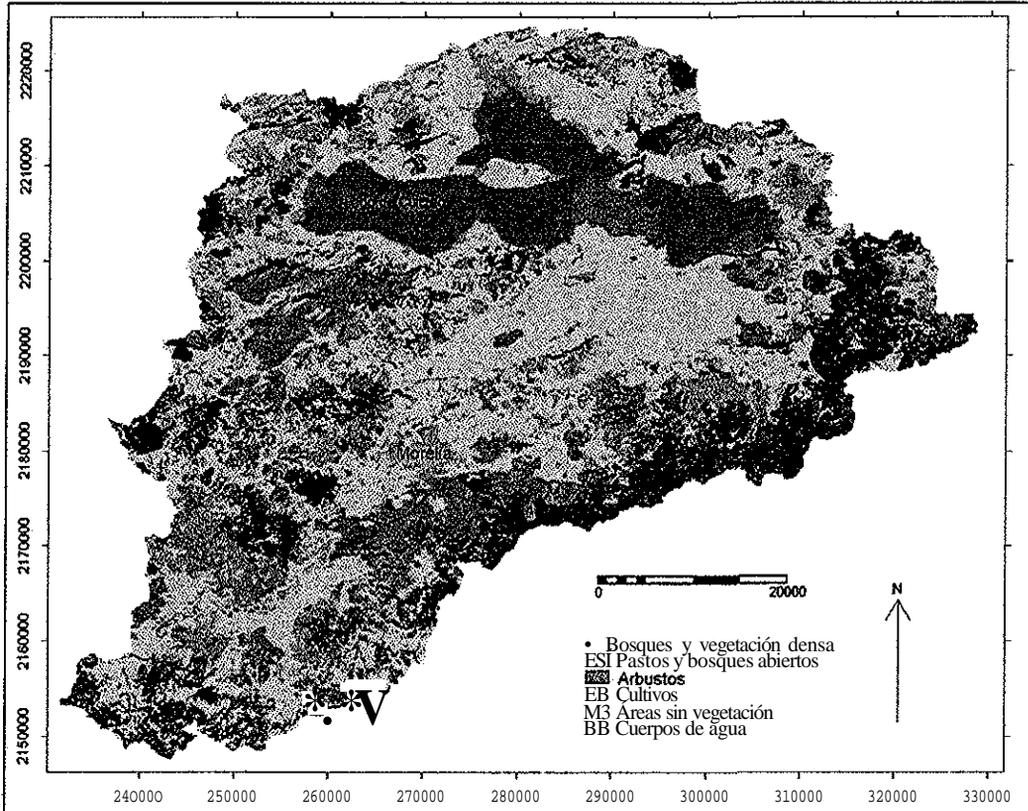


Figura 4. Cobertura v^etal utilizada para el cálculo del balance hídrico de 1975 de la cuenca de Cuitzeo.

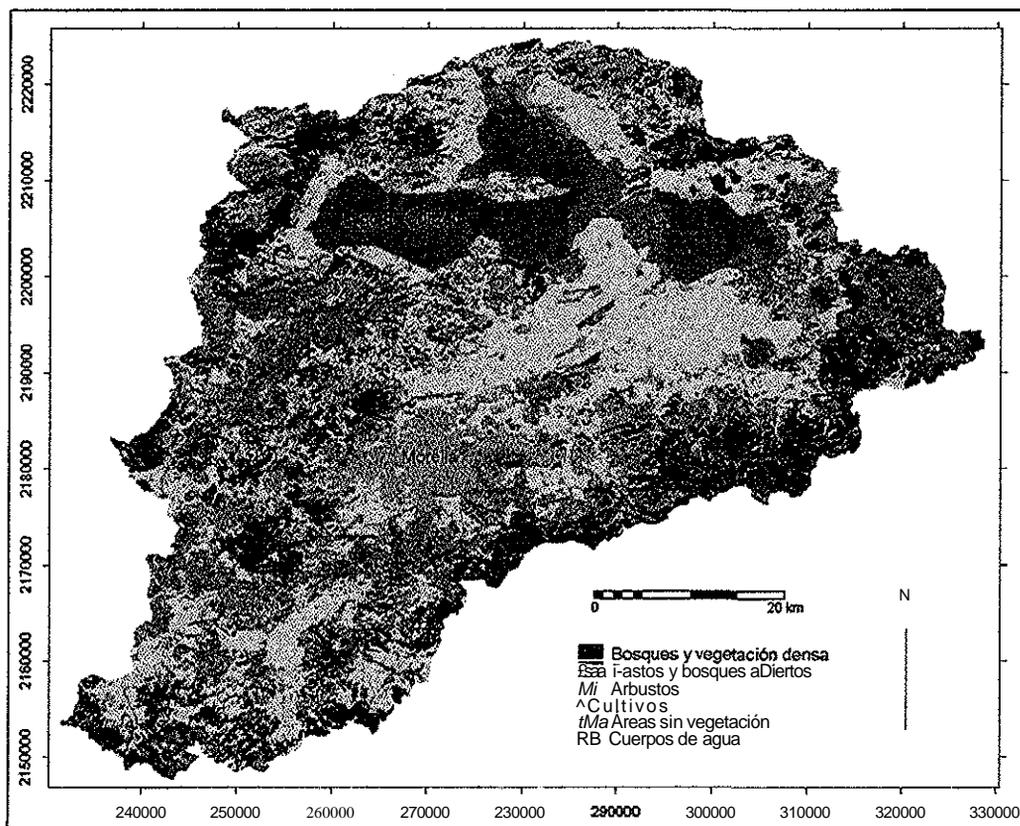


figura 5.. Cobertura vegetal utilizada para el cálculo del balance hídrico de 2000 de la cuenca de Cuitzeo.

Análisis del cambio de los componentes del balance hídrico anual

Escorrentamiento medio anual

Se realizó un análisis de la magnitud del error de los valores estimados de la esconentía mensual con relación a los datos mensuales registrados para tres subcuencas de la cuenca de Cuitzeo (Mendoza *et dl.*, en preparación b). Los resultados indican que la sobrestimación anual fue 2.9, 2.2 y 1.6 veces respectivamente. La sobreestimación promedio fue de 2,3 veces; sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran entre los rangos de sobrestimación y subestimación previamente obtenidos en la estimación de escurrimientos con modelos espacialmente distribuidos en grandes cuencas (Amell, 1999; WoodyBlackburn, 1984).

En consecuencia, análisis de las implicaciones del CCVUS se realizó en mapas de valores reclasificados. De los mapas clasificados se calcularon las superficies ocupadas por cada clase en cada año, así como la superficie de cambio (Figura 6). Se aprecia que la categoría predominante en ambos años fue la Moderada (49 y 35 %, respectivamente), seguida por la clase alta (56 y 31%), Los mayores cambios ocurrieron en las categorías Muy Baja, Baja, Moderada y Alta; sin embargo, en esta última clase el cambio fue negativo (Figuras 7 y 8), Estos resultados nos sugieren que con respecto a 1975, en el año 2000 la capacidad de la cuenca para producir escurrimientos superficiales se redujo en el año 2000 porque el escurrimiento anual fue menor en aproximadamente de 300 mm.

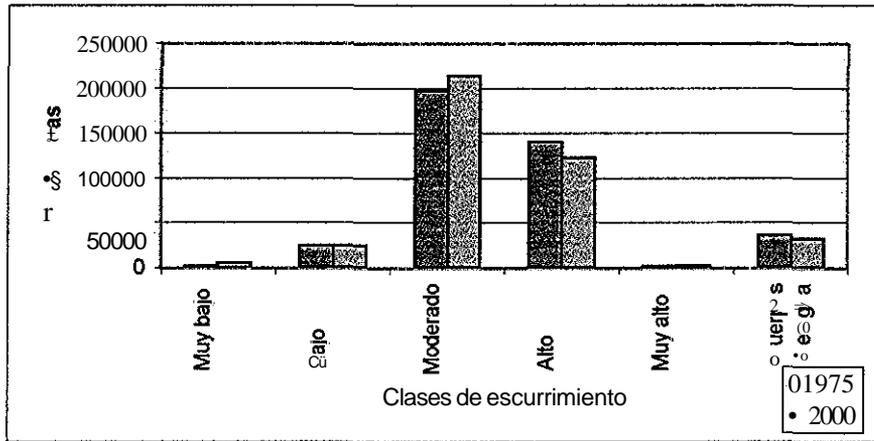


Figura 6., Distribución de las superficies por clase de escurrimiento para los años 1975 y 2000 de la cuenca del Lago de Cuitzeo.,

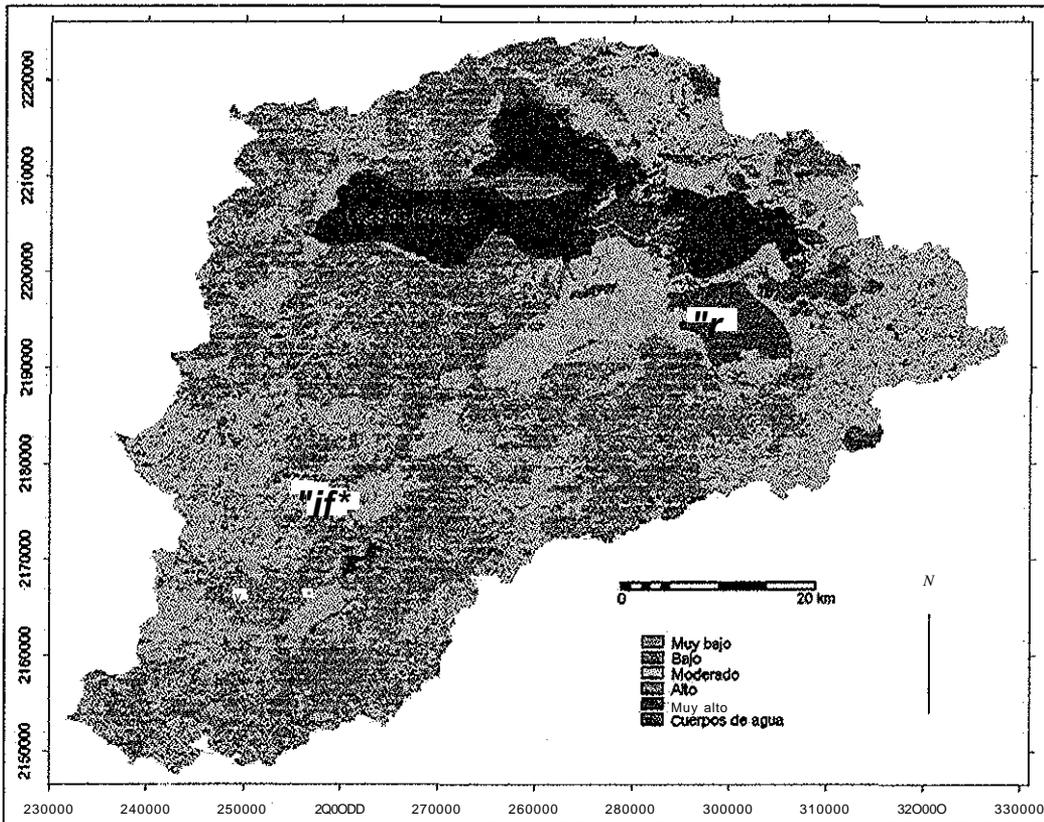


Figura 7., Mapa de escurrimiento medio anual de 1975 en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

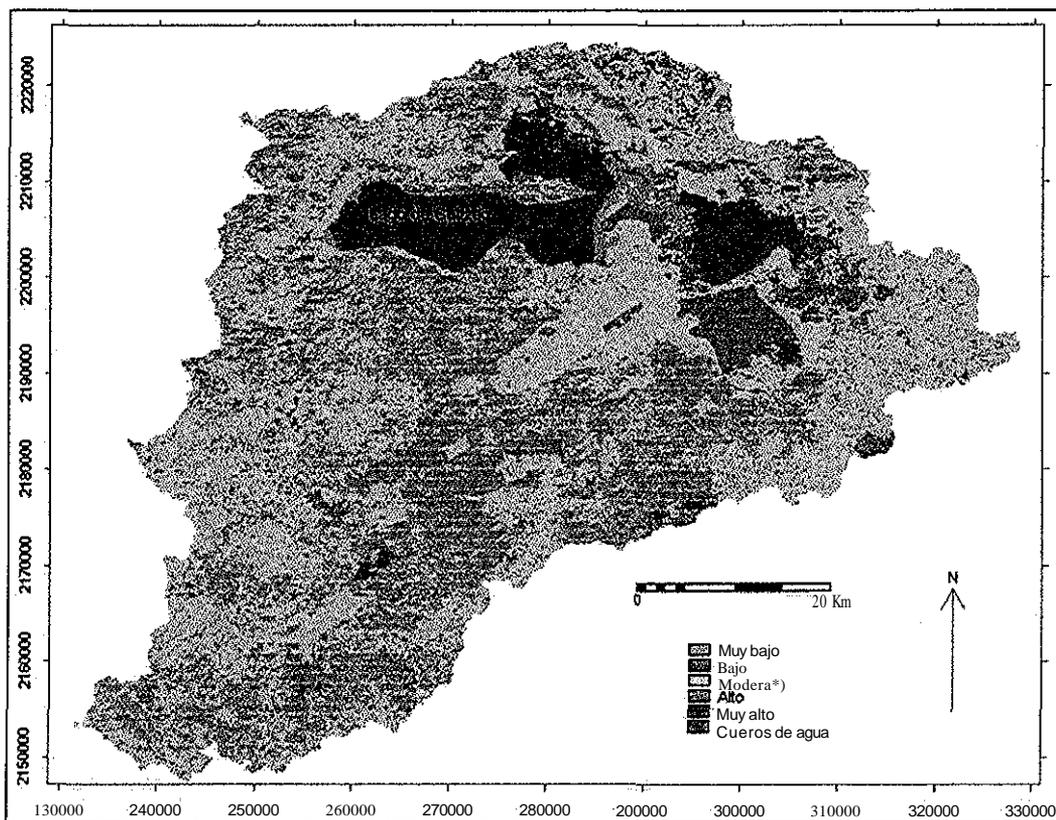


Figura 8. Mapa de escurrimiento medio anual de 2000 en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Las categorías más representativas de escurrimiento por unidades de relieve corresponden a las clase Moderado y Alto en ambos años, seguidas por la clase Bajo. La dinámica entre años y categorías de relieve indica cierta mejoría en las condiciones hidrológicas; trece formas de relieve disminuyeron su superficie en clase Alto, las mismas formas de relieve aumentaron su superficie en la clase Moderado; Diez formas de relieve aumentaron su superficie en la clase Bajo. Las formas de relieve más afectadas por un incremento en la superficie de escurrimiento en la categoría Alto son planicie, valle amplio y piedemonte bajo. Las formas de relieve que aumentaron superficie en la clase Moderado son planicie fluvial, planicie con vegetación, planicies inundables, piedemontes bajo y no diferenciado.

Precipitación efectiva inedia anual por año

De los mapas de Pef, la mayor superficie para 1975 y 2000 corresponde a la categoría Baja (45 %) y Moderada (41 y 48%, respectivamente),. El análisis del cambio de las categorías de Pef para cada año por clase indica que hubo un incremento de alrededor de 14,000 ha en la clase Moderada, como resultado de una disminución de la misma magnitud en la clase Baja (Figura 9). Los resultados sugieren que con respecto a 1975, en el año 2000 hubo una mayor acumulación de agua en el suelo, particularmente en más de 2600 ha las cuales retuvieron cuando menos 600 mm anuales de agua en el suelo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

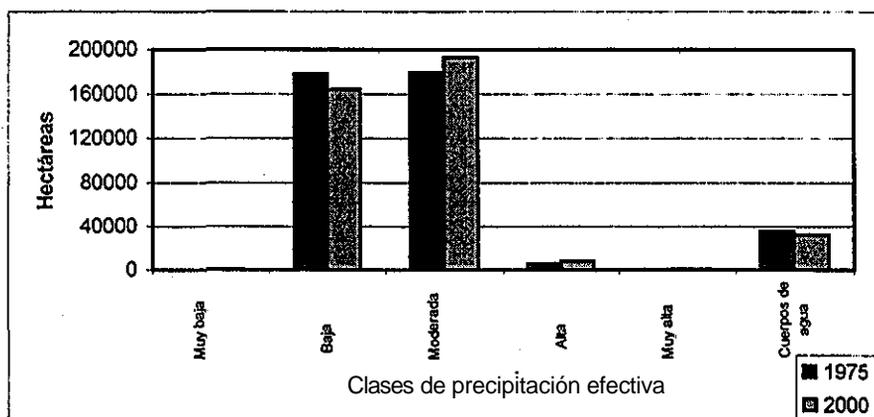


Figura 9. Distribución de las superficies por clase de precipitación efectiva media anual para los años 1975 y 2000 de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Las categorías de Pe' más representativas por unidades de relieve corresponden a las Baja y Moderada, ellas cubren aproximadamente el 90 % de las clases de relieve en ambos años. También se presentan condiciones de relativa mejoría en la cuenca. Trece formas de relieve aumentaron su superficie de Pef de clase Baja a clase Moderada; cinco formas de relieve pasaron de clase Baja a clase Moderada. Las formas de relieve que más aumentaron su superficie en la clase Moderada son planicie con vegetación, planicie inundable, piedemonte medio y elevaciones aisladas,

Evapotranspiración real media anual

Las categorías predominantes de Etr para 1975 y 2000 son la Muy Baja (70 y 68%, respectivamente) y Baja (20 y 22%). El cambio de la Etr por categorías indica una reducción de casi 5,400 ha en la clase muy Baja; mientras que las clases Baja y Moderada tuvieron un incremento de 8,000 ha, reflejo del aumento de la cobertura vegetal (bosques y arbustos) (Figura 10),

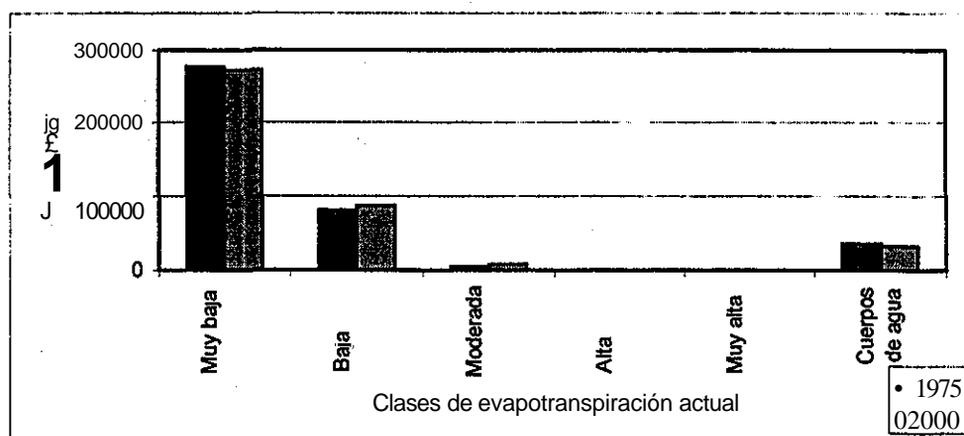


Figura 10. Distribución de las superficies por clase de Evapotranspiración real media anual para los años 1975 y 2000 de la cuenca del Lago de Cuitzeo.,

En relación con la Etr por formas de relieve, en ambos años las clases más representativas corresponden a Muy Baja y Baja. Los incrementos en porcentajes de superficie por clase de

Etr en formas relieve se dan principalmente hacia las clases Muy Baja (14) y Modelada (10); la superficie de 13 formas de relieve en la clase muy Baja se redujeron, estos resultados eian de esperarse, toda vez que existe un aumento en la cobertura vegetal con mayor capacidad para transpirar; Las formas de relieve que aumentaron más su superficie de Etr en la clase Moderada son las planicies inundables, Las formas de relieve que aumentaron su superficie en la clase Baja son la planicie fluvial y piedemonte superior,

Déficit medio anual de agua

Las categorías predominantes de Def' para 1975 y 2000 son Alta (37 y 35%, respectivamente), y Muy Alta (40 y 32 %) (Figuras 11 y 12), Sin embargo, la clase Muy Alto redujo su superficie en más de 10,000 ha, y la clase Alto aumento su superficie en más de 9,000 ha (Figura 13).

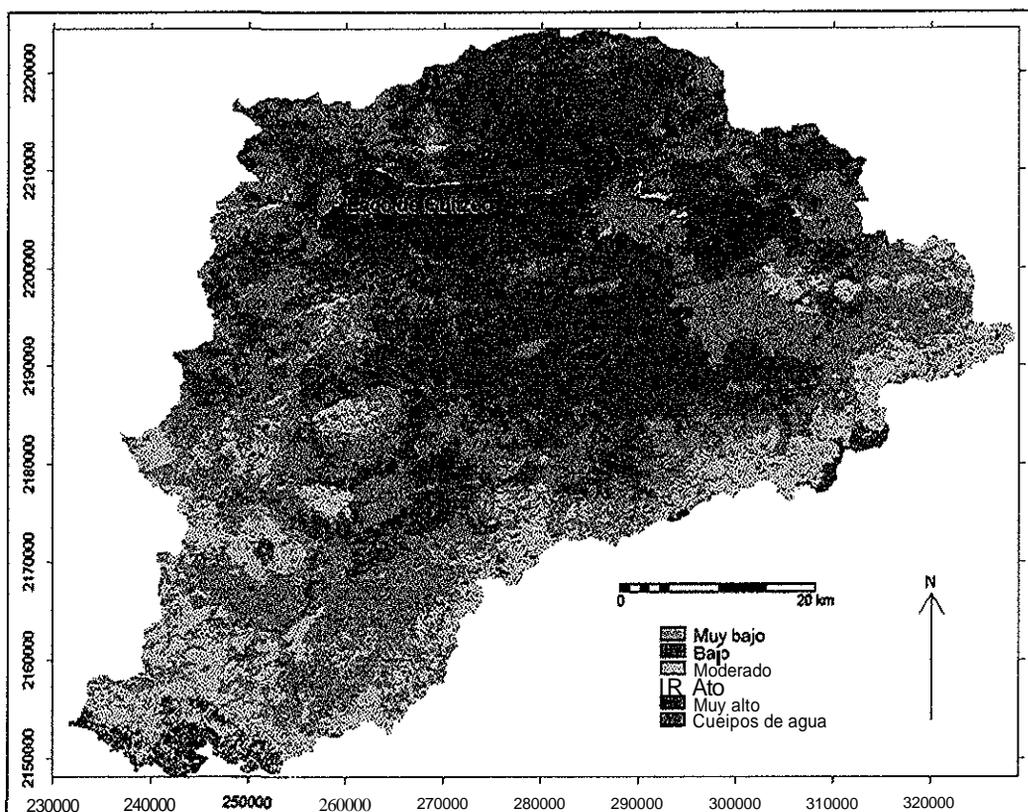


Figura 11., Mapa de déficit medio anual de agua de 1975 en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

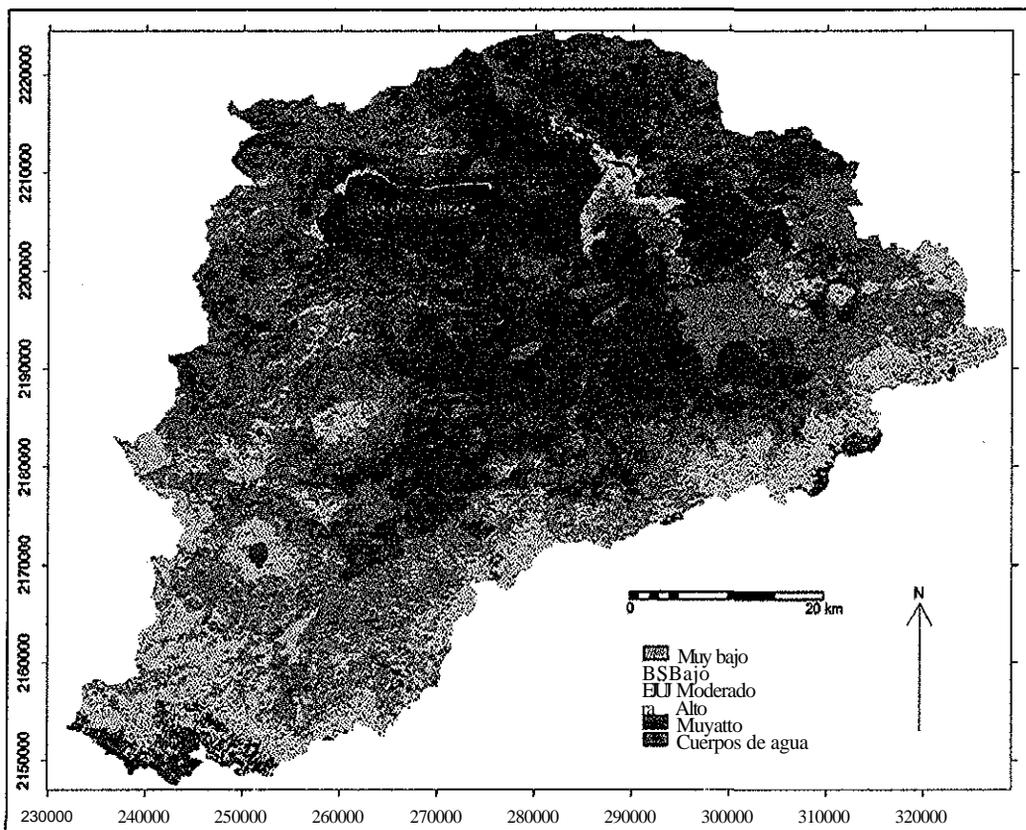


Figura 12, Mapa de déficit medio anual de agua de 2000 en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

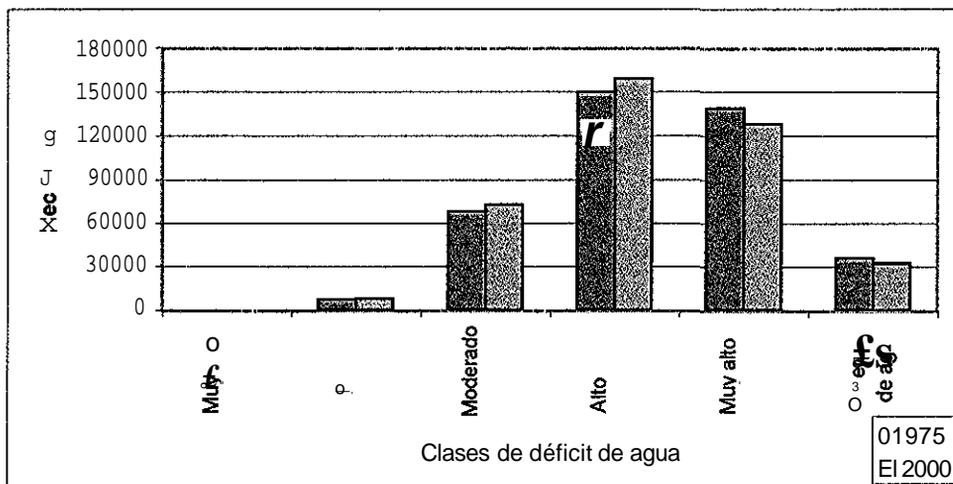


Figura 13. Distribución de las superficies por clase de déficit medio anual para los años 1975 y 2000 de la cuenca del Lago de Cuitzeo.,

Las formas de relieve se caracterizan por presentar déficit de agua medio anual Alto, Muy Alto y Moderado, respectivamente. Sin embargo las condiciones hidrológicas regionales por unidad de relieve también presentan cierta mejoría; doce formas de relieve pasaron de déficit Muy Alto a déficit Alto, cinco formas de relieve pasaron de Alto a Moderado, cinco pasaron de Moderado a Bajo; sin embargo, trece formas de relieve pasaron de déficit Moderado a Alto Las formas de relieve que sufrieron los cambios más importantes son

planicie con vegetación y elevaciones aisladas que cambiaron de Alto a Muy Alto; y planicie de inundación salina y zonas de inundación que pasaron de Muy Alto a Alto.

Excedente medio anual de agua

El excedente medio anual de agua fue bajo en 1975 y 2000, por lo que la mayor parte de la cuenca quedó clasificada en la clase Cero o nula (65 y 63 %, respectivamente) (Figuras 14 y 15); en 1975 el 11% quedó clasificada como Muy Bajo, y el 14% como Bajo; mientras que para el 2000 las clases Muy Bajo y Bajo sólo se incrementaron en un punto porcentual (Figura 16). Las categorías más representativas fueron Cero, Muy Bajo y Bajo; además es notorio que la mayor parte de las formas de relieve tienen excedente de Cero en una superficie considerable en ambos años. Sin embargo, existe una tendencia a que las formas de relieve incrementen su excedente a lo largo del tiempo, es decir, que cambien de clase Cero a Muy Baja (6), Muy Baja a Baja (7) y de Baja a Moderada (7); esta dinámica permite inferir que las condiciones hidrológicas en la cuenca del Lago de Cuitzeo mejoraron ligeramente. Las formas de relieve con incremento importante en superficie en la clase Moderada corresponden a las planicies fluviales, mientras que las formas de relieve que más incrementaron su superficie en la clase de excedente Bajo son las planicies con depósitos de sal e inundables.

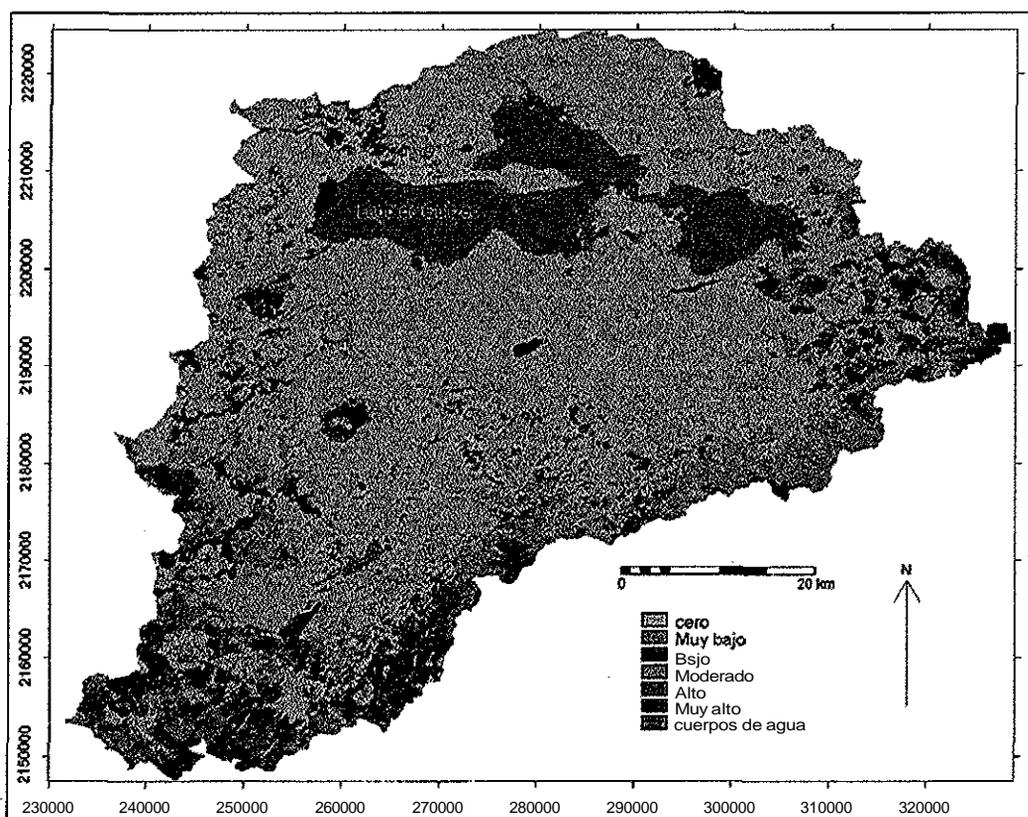


Figura 14. Mapa de excedente medio anual de agua de 1975 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

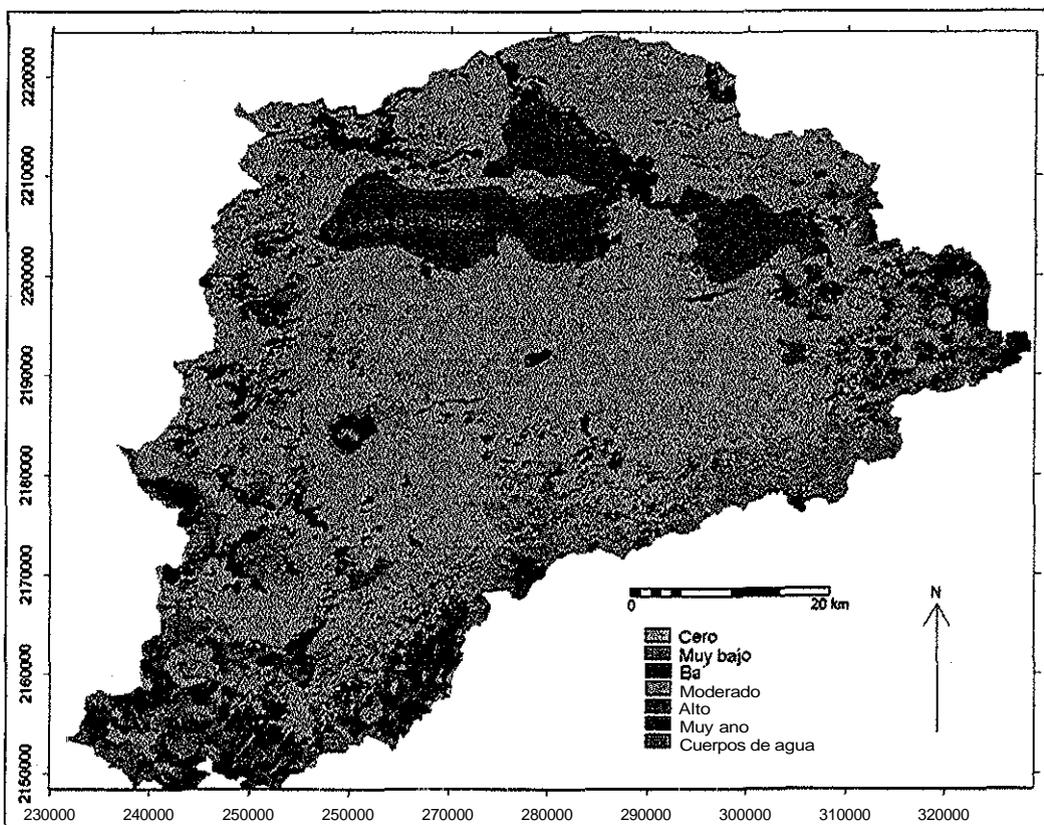


Figura 15. Mapa de accedente medio anual de agua de 2000 en la cuenca del Lago de Cuitzeo,

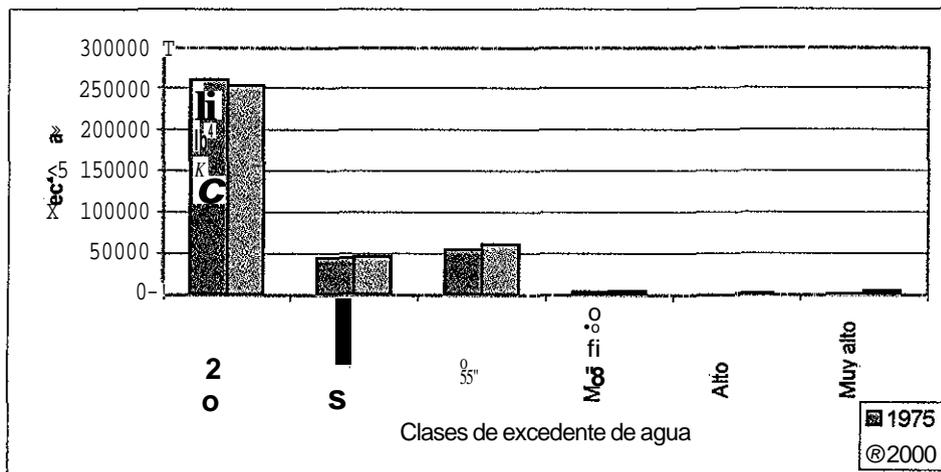


Figura 16. Distribución de las superficies por clase de excedente medio anual para los años 1975 y 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

Análisis del cambio de los componentes del balance hídrico con matrices de transición Escurrecimiento medio anual de agua

Los valores de las superficies de coincidencia entre las categorías de escurrecimiento de cada año se normalizaron en función del año base, con lo cual se construyó la matriz de probabilidades de transición de las distintas categorías de escurrecimiento (Cuadro 1). Este procedimiento se aplicó para la evaluación de todos los componentes del balance hídrico.

De la matriz de transición podemos destacar que las clases Alta y Muy Alta tienen probabilidades relativamente bajas de permanencia (menores a 70%), además probabilidades de cambio de las clases Muy Alto y Alto hacia la clase Moderada (11 y 31%), aunada a la probabilidad de cambio de Muy Alta a Alta de 26%; estos porcentajes indican una relativa mejoría en las condiciones de escurrimiento en la cuenca. Sin embargo, la clase Bajo tiende a pasar a Moderada en 21% y la clase Moderada tiende a transformarse en Alta en 14%.

Cuadro 1 Probabilidades de transición de las clases de escurrimiento entre 1975 y 2000.

1975	2000				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Muy bajo	0,97	0,03	0,00	0,00	0,00
Bajo	0,03	0,76	0,21	0,00	0,00
Moderado	0,00	0,03	0,83	0,14	0,00
Alto	0,00	0,00	0,31	0,68	0,01
Muy alto	0,00	0,00	0,11	0,26	0,63

Precipitación efectiva media anual

Las probabilidades de transición (Cuadro 2) muestran que la Pef tiene bajas probabilidades de permanecer en la clase Muy Baja (52%); en consecuencia esta clase tiende a cambiar a Baja (43%) y Moderada (5%). Además es notoria la alta probabilidad de permanencia de la clase Muy Alta (95%). La matriz indica, en términos generales, mejores condiciones hidrológicas a nivel regional.

Cuadro 2, Probabilidades de transición de las clases de precipitación efectiva entre 1975 y 2000

1975	2000				
	Muy bajo	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Muy baja	0,52	0,43	0,05	0,00	0,00
Baja	0,00	0,77	0,23	0,00	0,00
Moderada	0,00	0,15	0,84	0,01	0,00
Alta	0,00	0,00	0,25	0,75	0,00
Muy alta	0,00	0,00	0,00	0,04	0,95

Evapotranspiración real media anual de agua

La matriz de transición (Cuadro 3) indicó que la mayor probabilidad de permanencia está en la clase Muy Baja (92%); el 8% restante tiende a pasar a la clase Baja. Las categorías con menor probabilidad de permanencia son Alta (69%) y Muy Alta (44%); la clase Alta tiene probabilidades de cambiar a Baja (11%) y Moderada (15%); mientras que la clase Muy Alta puede cambiar a Moderada en 44%. Estos resultados indican menores pérdidas de agua por este proceso,

Déficit medio anual de agua

La matriz de probabilidades de transición (Cuadro 4), permitió observar cambios ligeramente negativos en este componente del balance hídrico regional. Las clases Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto tienen las mayores probabilidades de permanecer como tales (81 y 82%), Mientras que la clase Muy Bajo tiene solo 44% de probabilidad de permanecer

como tal, y puede cambiar a Bajo (52%) y Alto (3%). La clase Bajo puede cambiar a Moderado (18 %) y Alto (1 %)., La clase Muy Alto tiene 19 % de probabilidad de cambiar a Alto y la clase Alto puede cambiar a Moderado (9%).

Cuadro 3., Probabilidades de transición entre la Evapotranspiración real de 1975 y 2000.

1975	2000					
	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta	
Muy baja	0,92	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Baja	0,00	0,80	0,01	0,00	0,00	0,00
Moderada	0,04	0,17	0,79	0,00	0,00	0,00
Alta	0,00	0,11	0,15	0,74	0,00	0,00
Muy alta	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,67

Cuadro 4, Probabilidades de transición entre el déficit medio anual de agua entre 1975 y 2000.

1975	2000					
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	
Muy bajo	0,45	0,52	0,03	0,00	0,00	0,00
Bajo	0,00	0,81	0,18	0,01	0,00	0,00
Moderado	0,00	0,03	0,82	0,15	0,00	0,00
Alto	0,00	0,00	0,09	0,81	0,00	0,10
Muy alto	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,81

Excedente medio anual de agua

Con relación al excedente medio anual se puede indicar que existe un cambio ligeramente negativo en este componente del balance hídrico regional, Las clase incluyen Bajo, Bajo y Moderado pueden pasar a la clase sin excedente (11%, 14 % y 3%, respectivamente); de igual forma, la clase Muy Alto puede cambiar a las categorías de Muy Bajo y Bajo (2%); la clase Moderado tiene un 22% de probabilidad de cambiar a la clase Bajo. Sin embargo, la clase de excedente Cero, tiene el 3% y 5% de probabilidad de cambiar a las clases muy bajo y bajo, respectivamente; la clase Moderado tiene el 2% de permanecer como tal. Sin embargo, las clases Alta y Muy Alto tienen las probabilidades de permanencia más altas (97 y 96 %) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Probabilidades de transición entre el excedente de agua medio anual entre 1975 y 2000.

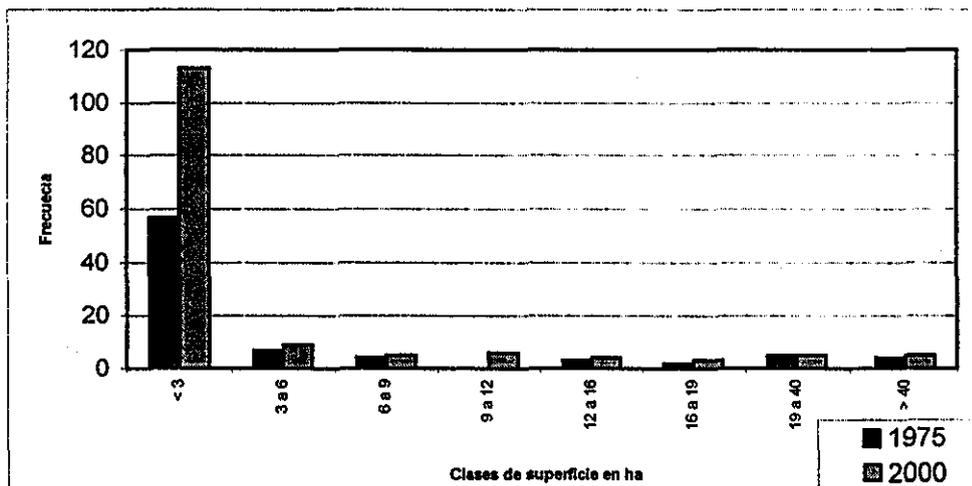
1975	2000					
	Cero	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Cero	0,92	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00
Muy bajo	0,11	0,86	0,03	0,00	0,00	0,00
Bajo	0,14	0,02	0,82	0,02	0,00	0,00
Moderado	0,03	0,01	0,22	0,73	0,00	0,00
Alto	0,00	0,01	0,00	0,02	0,97	0,00
Muy alto	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,96

Análisis del cambio de bordos y presas

El número de bordos al igual que su superficie se incrementaron en forma notoria en los últimos 25 años. En 1975 se catalogaron 75 cuerpos de agua en esta clase, los cuales cubrían una superficie de 1,205 ha. Para el año 2000 se identificaron 163-6 bordos con una

superficie de 1,630 ha (Figura 17); es decir, en 25 años se incrementó la superficie de evaporación directa de cuerpos de agua en 26 % y se duplicó el número de estructuras de retención de agua, aunque en su mayoría la extensión de éstas fue menor a 3 ha.

Los bordos se presentaron principalmente sobre planicies, mesas, laderas suaves y muy suaves convexas, laderas suaves rectilíneas y piedemontes no diferenciados. Las coberturas vecinas más frecuentes a la ubicación de bordos en 1975 correspondieron en orden decreciente a cultivos temporales y de riego, en el 2000 corresponden a cultivos de temporal, pastizales, arbustos, cultivos de riego, plantaciones de árboles y bosque. Se observó una diversificación de categorías vecinas para el 2000 y un cambio en el orden de prioridad de las unidades vecinas; este orden es coherente con la disminución de áreas de cultivo y permite interpretar que el incremento en el número de bordos no responde a una intensificación de las actividades agrícolas sino más bien de las actividades pecuarias en la cuenca,



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 17. Frecuencia de bordos en la cuenca de Cuitzeo por clases de superficie en ha,

Cabe mencionar que la superficie del lago calculada para 1975 fue de 377 km², y en 2000 se calculó una superficie de 306 km², lo cual indica una que el cuerpo de agua del lago sufrió una reducción de alrededor del 19 %; el antiguo cuerpo de agua se ha transformado en vegetación acuática (15 %) y matorrales (1%) y ha sido utilizado para agricultura de riego y temporal (3 %). La vegetación acuática se ha incrementado como consecuencia del aporte de materia orgánica y fertilizantes transportados por los drenes que alcanzan el lago en su porción central,

CONCLUSIONES

Cambio del balance hídrico

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 (piedemontes), presentaron un incremento en los valores de escorrentía, lo cual se explica por el

incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos (incluidas en la clase áreas sin vegetación) y agricultura, que se asocian principalmente a esas formas de relieve.

Para ambos años existe una fuerte presión sobre el recurso hídrico en las zonas bajas de la cuenca. Aunque las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca se encuentran al menos igual que hace 25 años, es indiscutible que el Lago de Cuitzeo presenta altos grados de deterioro por contaminación y falta de agua, la cual no drena directamente al vaso del lago por el uso inadecuado del agua en las zonas de riego y como consecuencia de un mayor uso en las ciudades, debido al incremento poblacional (Soto-Galera *et al.*, 1999; Acosta-Villegas, 2002): Especialmente, el área urbana de la Ciudad de Moctezuma, capital del estado sextuplicó su superficie en 37 años (López, *et al.*, 2001). La superficie ocupada por asentamientos humanos en la cuenca creció en un 284% en los últimos 25 años (López *et al.*, en prensa) y la población se incrementó de 380,870 habitantes en 1975 a 837,775 en 1995 (INEGI, 1970; 1995).

El análisis de la variación y distribución superficial de bordos indica que el número de bordos al igual que su superficie se incrementaron en 26 % y se duplicó el número de estructuras de retención de agua, aunque en su mayoría estas fueron menores a 3 ha. El incremento de bordos, en este caso, no responde a una intensificación de las actividades agrícolas sino más bien de las actividades pecuarias en la cuenca.

En consecuencia la disminución de la superficie del vaso del Lago de Cuitzeo no está ligada a la degradación de laderas producto de deforestación, más bien es resultado de una disminución del agua en los cauces por el incremento poblacional, que conlleva un incremento en el consumo de agua, así como un uso inadecuado del agua para riego agrícola; así como a un incremento de la cobertura acuática y subacuática que cubría 59 km² en 1975 y aumentó a 96 km² en el 200, lo cual ha casi cenado la comunicación entre el vaso este y central del Lago de Cuitzeo.

Fortalezas y limitaciones del modelo

En general la estimación de los componentes del balance hídrico a partir de información hidrometeorológica, conocimiento geomorfológico y el uso de técnicas de PR y SIG, tiene limitaciones, las cuales han sido discutidas recientemente por Mendoza *et al.* (2002b). Sin embargo, la integración de las técnicas antes mencionadas con un modelo de balance hídrico espacialmente distribuido, sobreposición cartográfica automatizada y de técnicas de análisis de dinámica de cambio, como es el caso de las matrices de transición, representa una alternativa viable para entender el efecto hidrológico del CCVUS en grandes superficies sin suficientes afluentes y estaciones meteorológicas. El modelamiento en dos años permitió reconocer de manera general, el cambio temporal de la distribución y cantidad de agua en laderas; cabe reconocer que el modelo espacialmente distribuido utilizando no evalúa directamente el balance hídrico en el cuerpo de agua del Lago de Cuitzeo.

La comparación de los valores estimados en el balance hídrico para ambos tiempos es posible porque las estimaciones realizadas en los dos tiempos presentan un error con el mismo orden de magnitud; especialmente porque no existen evidencias de cambios significativos en la precipitación y temperatura en los últimos 25 años (Mendoza *et al.*,

enviado).. Sin embargo, es importante mencionar que las estimaciones realizadas con el modelo hidrológico onecen valores que se acercan a la realidad y de acuerdo a valores sobrestimados y subestimados por modelos presentes en la literatura (Véase Arnell, 1999; Wood y Blackburn, 1984).

En este estudio, al igual que en el Himalaya (Sharma *et al*, 2000) los resultados están basados en escenarios con alto grado de incertidumbres e información inadecuada para la validación de modelos. La falta de datos de campo para la modelación hidrológica es un problema común en la mayoría de los países subdesarrollados,. El tipo de enfoque utilizado en este trabajo, es útil cuando no se cuenta con datos de aforos que permitan validar los resultados obtenidos con el modelamiento espacialmente distribuido.

Lo anterior sugiere, que cuando se evalúa el efecto del CCVUS en grande áreas poco aforadas, con la aplicación de modelos espacialmente distribuidos, solo es posible obtener en el mejor de los casos una estimación de las tendencias entre la condición hidrológica de antes y después del CCVUS,. La magnitud *per se* de los valores de magnitud pierde relevancia,.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*. Se agradece la colaboración en la construcción y edición de bases de datos a Vicente Salinas, Alejandra Acosta y Ergüin Cuevas, Agradecemos las sugerencias proporcionadas por dos referís anónimos, El primer autor¹ agradece el apoyo económico proporcionado por el CONACyT y la UNAM a través de las becas de Doctorado recibidas.

REFERENCIAS

Acosta-Villegas, A., (2002). *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del Lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*. Tesis licenciatura en Biología, Facultad de Biología, UMSNH.

Anderson, I.R., E.E. Hardy, J T, Roach y RE., Witmer, 1976, *A land use andlandcover classification system for use with remote sensing data*. Geological Survey Professional Paper 964: 28 p,

Arnell, N.W., (1999), A simple water balance model for simulation of streamflow over large geographic domain. *Journal ofHydrology*, **217**: 314 - 335

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, http://www.itc.nl/wres/basti_text.html

Bastiaanssen, W.G.M, (2000b), "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the inigated Gediz Basin, Turkey", *Journal ofHydrology*, **229**: 87-100,

Beek, M. (1996), *Drainage pattern analysis and extraction of hydrologic properties from digital elevation models*, MSc., Thesis in Land Resources and Management, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe: 45 p.

- Bergström, S., y L.P. Graham (1998), "On the scale problem in hydrological modeling", *Journal of Hydrology*, 211: 235-265.
- Bhadu B., M. Grove, G. Lowiy y I. Harbor (1997), "Assessment of long-term hydrologic effects of land use change. The curve number technique for calculating runoff is modified to estimate lost groundwater recharge". *Journal of American water works association* 89 (11):94-106
- Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Dunne, T. y L.B. Leopold (1978), *Water y Environmental Planning*, W.H. Freeman and Co., San Francisco: 817 p.
- Elkaduwa, W.K.B. y R. Sakthivadivel (1998), *Use of historical data as a decision support tool in watershed management: A case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka*, Report 26, Colombo, Sri Lanka, International Water Management Institute.
- EPA (1995), *Watershed protection: a project focus*. Assessment and watershed division, Office of wetlands, oceans and watersheds, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Ersten, A.C.D. (1999), "Ecohydrological impact-assessment modelling: an example for terrestrial ecosystems in Nord-Holland, the Netherlands", *Environmental Modelling and Assessment*, 4: 13-22,
- FAO (1976), *Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje*, No. 24. ONU-FAO, Roma, Italia: 193 pp.
- Fieze, R.A. y J.A. Cherry, 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Gleick P. H., (1987), "The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento basin", *Water Resources Research*, 23 (6): 1049-1061.
- Haibor, I., (1994), "A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology", *Journal of the American Planning Association*, 60 (1): 95-108.
- Henderson-Sellers, A., R. E. Dickinson, T.B. Duibidge, P.J. Kennedy, K. McGuffie, y A.J. Pitman, (1993), "Tropical Deforestation: Modeling Local- to Regional-Scale Climate Change", *Journal of Geophysical Research*, 98 (D4): 7289-735L
- Hillel, D., (1998), *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego CA, 771 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 1993, IX Censo General de Población, 1970. Dirección General de Estadística. Vol, II, México: 383 - 521.

INEGI, 1997. Censo de Población y Vivienda 1995. Resultados Definitivos. Michoacán, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. Disco Compacto.

Jain, A., S.C. Rai y E. Shaima (2000), "Hydro-ecological analysis of a sacred lake watershed system in relation to land-use cover change from Sikkim Himalaya", *Catena*, 4: 263-278.

Jury, W.A., W.R. Gardner, and W.H. Gardner (1991), *Soil Physics*, John Wiley & Sons, Inc., NY, 328pp.

Kite, G. W. (1993), "Application of a land class hydrological model to climate change", *Water Resources Research*, 29: 2377 - 2384.

Landon, J. R. (Editor) (1984), *Booker Tropical Soil Manual A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics*, Booker Agriculture International Limited, Great Britain,

López, E., G. Boceo, M.E. Mendoza y E. Duahu (2001), "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: A case in Morelia city, México", *Landscape and urban planning*, 55 (4): 271 - 285.

López-Granados E., M.E. Mendoza y A. Acosta, (2002, en prensa). "Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo, Michoacán". *Gaceta Ecológica*, 63.

López-Granados, E., (En preparación), *Cambio de cobertura vegetal y uso del uso del suelo en la cuenca de Cuitzeo*, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM.

López-Granados, E. y G. Boceo (2001), "Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo". In: Mendoza-Cantú, M.E., López-Granados, E. y G. Boceo (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: 266 pp.

Luenberger, D.G., 1979. *Introduction to Dynamic Systems. Theory, Models, & Applications*. John Wiley & Sons: 446 pp.

McGuffie, K., A. Henderson-Sellers y H. Zhang (1998), "Modelling climate impacts of future rainforest destruction", En: Maloney, B.K. (editor) *Human Activities and the Tropical Rainforest*, Netherlands: Kluwer Academic Publisher,

Meijerink, A.M.J., H.A.M. de Brouwer, C.M. Mannaerts y CR. Valenzuela (1994), *Introduction to the use of Geographical Information Systems for Practical Hydrology*, UNESCO, International Hydrology Programme and ITC publication No. 23, Enschede, The Netherlands: 243 pp,

Mendoza M.E., G. Boceo y E. López-Granados (en prensa). "Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Bases para su ordenamiento

territorial". En: Barón, L., F. Peña y C. Ramírez *La cuenca del Lago de Cuitzeo: problemas y perspectivas de desarrollo*. Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), UACH.

Mendoza ME., G. Boceo, M. Bravo y E. López (en preparación a). "Estimación del escunimiento superficial en cuencas pobremente aforadas. Un caso en el centro de México".

Mendoza, ME., G. Boceo y M. Bravo, (2002a). "Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research". *Progress in Physical Geography*, 26(3): 319-338.

Mendoza, M.E., G. Boceo, M. Bravo, C. Siebe y M.A. Ortiz, (2002b). "Modelación hidrológica espacialmente distribuida: 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*, núm. 47, UNAM, México: 36-58,

Mendoza, M.E., G. Boceo, M. Bravo (enviado), "Evaluación de la calidad espacial y temporal de estaciones meteorológicas en estudios de balance hídrico espacialmente distribuido en cuencas no aforadas. Un estudio de caso de una cuenca poco aforada". Serie Varia, Instituto de Geografía, UNAM

Nikolaidis, N.P., H.L. Hu, C. Ecsedy y ID. Lin, (1993), "Hydrologic response of fieshwater to climatic variability: model development", *Water Resources Research*, 29: 3317-3328.

Olivera, F. (1996), *Spatial dhtributed modeling of storm runoff and non-point source pollution using geographic information systems*, PhD. Thesis University of Texas at Austin. <http://www.ceutexas.edu/prof/olivera/disstn/>,

Olsson, L, y P. Pilesjo (1999), *Development and applications of spatially dhtributed hydrological models in a GIS environment*, ITC Short Course of Environmental Modelling. <http://www.natgeo.lu.se/lennartweb>.

Osman, B.E.T. (1996), *GIS-Hydrological Modelling in Arid Lanas. A geographical Synthesis of surface waters for the African Read Sea región in the Sudan*, Ph D. Thesis, Lund Univeisity, Sweden: 202 pp,

Rind, D., C. Rosenzweig, y R. Goldberg, (1992) "Modelling the hydrological eyele in assessment of climate change", *Nature*, 358: 119-121.

Sahagian, D. (2000), "Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution", *Global and Planetary Change*, 2,5: 39-48.

SARH-CP (1991), *Manual de Conservación del Suelo y el Agua*, SARH-CP-SPP, México.

Schaumm, S.A. (1964), "Aerophotos and water resources", *Trans. UNESCO Symposia Aerial Survey and integrated studies*, Toulouse, UNESCO: 70-80.

Senuto, C.R. (1993), *Una nueva fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial Programa interinstitucional de Waru Waru*, Facultad de Ciencias, Puno, Puno, Perú: 13 pp.

Sharma, K.V.P., C. I. Voroshmarty y B. Moore III (2000), Sensitivity of the Himalayan hydrology to land use and climatic changes. *Climatic Change*, 47:117-139

Soto-Galera, E, J. Paulo-Maya. E. López-López, JA. Seina-Heinández y J. Lyons (1999), "Environmental Auditing: Change in Fish Fauna as Indication of Aquatic Ecosystem Condition in Río Grande de Moctel-Lago de Cuitzeo Basin, México". *Environmental Management*, (24) 1: 133 -140.

Thornthwaite, C.W. y J.R. Mather (1957), "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the Water Balance", *Publications in Climatology* 10, (3), Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Trenton, New Jersey.

Verstappen, H.Th. y R. Van Zuidam (1991), *The ITC System of Geomorphologic Survey. A basis for the evaluation on natural resources and hazards*, ITC publication No. 10. Enschede; The Netherlands: 89 p.

Voroshmarty C.J., B Moore III (1991), "Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi river", *Surveys in Geophysics*, 12: 271-311 pp

Voroshmarty CX, B Moore III, A. L. Grace, M, P Gildea, J.M Melillo, B. Peterson, E. B. Rastetter y P.A. Steudler (1989), "Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America", *Global Biogeochemical cycles*, (3) (3): 242-265.

Wood, M.K. y W.H. Blackburn, 1984. An evaluation of hydrologic soil groups as used in the SCS runoff method on rangelands., *Water Resources Bulletin* 20: 379-389.

Xu, C.Y, y Vandewiele, G L, (1994). "Sensitivity of rainfall-runoff models to input errors and data length" *Hydrological Science Journal*, 39(2): 1-16,

Xu, C.Y., (2000), "Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments", *Water Resources Management*, 13: 369-382.

Referencias cartográficas

INEGI, 1971.. Carta de edafología. Puruandiro F14 C82, escala 1:50,000.

INEGI, 1973. Carta de edafología. Acámbaro F14 C84, escala 1:50,000.

INEGI, 1973.. Carta de edafología. Moroleón F14 C83, escala 1:50,000.

INEGI, 1979. Carta de edafología. Cuitzeo E14 A13, escala 1:50,000.

INEGI, 1979. Carta de edafología. Morelia E14 A23, escala 1:50,000.

INEGI, 1979. Carta de edafología. Pátzcuaro E14 A22, escala 1:50,000.

INEGI, 1979. Carta de edafología. Tzitzio E14 A24, escala 1:50,000.

INEGI, 1979. Carta de edafología. Villa Escalante E14 A32, escala 1:50,000.

INEGI, 1979. Carta de edafología. Zinapecuaro E14 A14, escala 1:50,000,

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

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

INEGI, 1983. Carta de edafología. Maiavatio E14 A15, escala 1:50,000.

Pasquaré, G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Bibaldi y L. Vezzoli, 1991., *Geologic map of central sector of Mexican Volcane Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México*. Map and Chait Series MCH072. Geological Society of America.

Capítulo 8

Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico¹

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo describir y analizar la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo en el periodo de 1974 y 2001. Los datos utilizados para el análisis entre 1974 y 2000 fueron imágenes de satélite de alta resolución, y para el periodo comprendido entre 1997 y 2001 se utilizaron imágenes de satélite de baja resolución. El análisis se apoyó en el uso intensivo de técnicas de percepción remota (PR), sistemas de información geográfica (SIG) y análisis estadísticos. El análisis de largo plazo (1974-2000) sugiere que las superficies del vaso del lago de Cuitzeo varían con el tiempo y que estos cambios muestran relación con el comportamiento de la precipitación y la temperatura media mensual del año antecedente. Los cambios monitoreados en el corto plazo (1997-2001) indican que la superficie del lago de Cuitzeo presenta una tendencia a la reducción de su cuerpo de agua. Las observaciones de campo desde 1999, indican una desecación anual recurrente, especialmente en la sección oeste del lago. Se asume que este comportamiento es resultado de la sequía que afecta a toda la cuenca desde mediados de los 1990's. Los modelos de regresión construidos a partir de la series de largo plazo sugieren que la superficie del lago del Cuitzeo puede ser estimada a partir de los datos de precipitación y temperatura media mensual del año precedente.

Abstract

This research tries to describe and analyze changes in the surfaces occupied by Cuitzeo's lake during the period 1974-2001. High resolution satellite image data were used to analyse the 1974—200 period, and very low resolution satellite image data were used for the 1997-2001 period. The research is based on remote sensing and geographic information techniques, as well as statistical analysis. The long term analysis (1974-2000) indicates that lake surfaces of Cuitzeo changes along the time and that these changes are associated to monthly mean precipitaton and temperature data occurred in the previous year. Short term monitoring (1997-2001) indicates that Cuitzeo lake surfaces have a reduction trend in the water body. Field observations also pointed out that yearly desiccation is recurrent, particularly, in the west section of the lake. These results suggest that this behaviour is consequence of a drought period in the basin. This drought began in the middle of 1990's, The regression models build up from long term series, suggest that the surfaces of the lake can be estimated by monthly mean precipitatron and temperature data series from the year before.

INTRODUCCIÓN

Un elemento importante de la investigación actual en cambio climático y variabilidad es el análisis de tendencias de variables hidrodinámicas realizado a partir de registros de datos (Molnár y Ramírez, 2001), La variabilidad de las superficies ocupadas por cuerpos de agua puede ser evaluada y monitoreada a partir del uso de imágenes aeroespaciales (fotografías

¹ Manuscrito preliminar preparado para someterse a Water Resources Management,, Autores: Manuel E, Mendoza, G. Boceo y M. Bravo

aéreas convencionales y digitales, imágenes de satélite y mapas existentes) (véase Schneider *et al.*, 1985; Mendoza *et al.*, 2002a),. Este tipo de análisis se apoya en el uso intensivo de técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG).

Los lagos de Chápala y Cuitzeo son los dos cuerpos de agua continentales más grandes en México. Ambos reservorios han sido fuertemente impactados por las actividades humanas que se desarrollan en las cuencas que los alimentan, especialmente importante es el efecto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), representado por la urbanización y la ganaderización de las cuencas (INE, 2001; López y Boceo, 2001) y probablemente por los cambios climáticos regionales y globales.

Específicamente, el lago de Cuitzeo atraviesa por periodos de contracción y desecación reclínente, que originalmente se asociaban a deforestación en la parte alta de la cuenca, la cual propiciaba la erosión de suelos, su posterior transporte y sedimentación en el vaso del lago. Aunado a este problema, la falta de vegetación puede colaborar en la reducción de la precipitación en la cuenca. Trabajos recientes indican que la deforestación no es el principal proceso de cambio de cobertura vegetal en la cuenca (López y Boceo, 2001); en consecuencia la erosión no es un problema generalizado en la cuenca; se puede concluir que el modelo teórico de deforestación-erosión-transporte-sedimentación está sobreutilizado en la cuenca, para explicar los problemas de degradación (Mendoza *et al.*, en prensa).

Este trabajo tiene por objetivo describir y analizar la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo en el periodo comprendido entre 1974 y 2001 a partir de la interpretación de imágenes de alta resolución, y de imágenes de baja resolución durante el periodo 1997 al 2000. Los cambios en las superficies del lago pueden analizarse como una serie de tiempo. El análisis de series de tiempo es aplicable en muchos campos de la ciencia y se ha convertido en una herramienta esencial en hidrología (Salas, 1992); en general los procesos hidrológicos, tales como precipitación y escunimiento, suponen una serie temporal continua,

En este trabajo se construyeron modelos que relacionan estadísticamente la precipitación y temperatura antecedentes con el tamaño del cuerpo de agua del lago de Cuitzeo. El objetivo fue proyectar la situación por la que puede atravesar el lago si los patrones de precipitación y temperatura se comportan de la misma manera que los registros históricos, los cuales inician a principios del siglo pasado..

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del lago de Cuitzeo se ubica en de la región hidrológica de Lerma-Chapala, dentro del Sistema Volcánico Transversal, entre los 19°30' y 20°05' latitud norte y 100°35' y 101°30' longitud Oeste, La cuenca tiene una superficie aproximada de 4000 km². El lago de Cuitzeo cubre aproximadamente 300 km² del fondo de la cuenca (Figura 1).

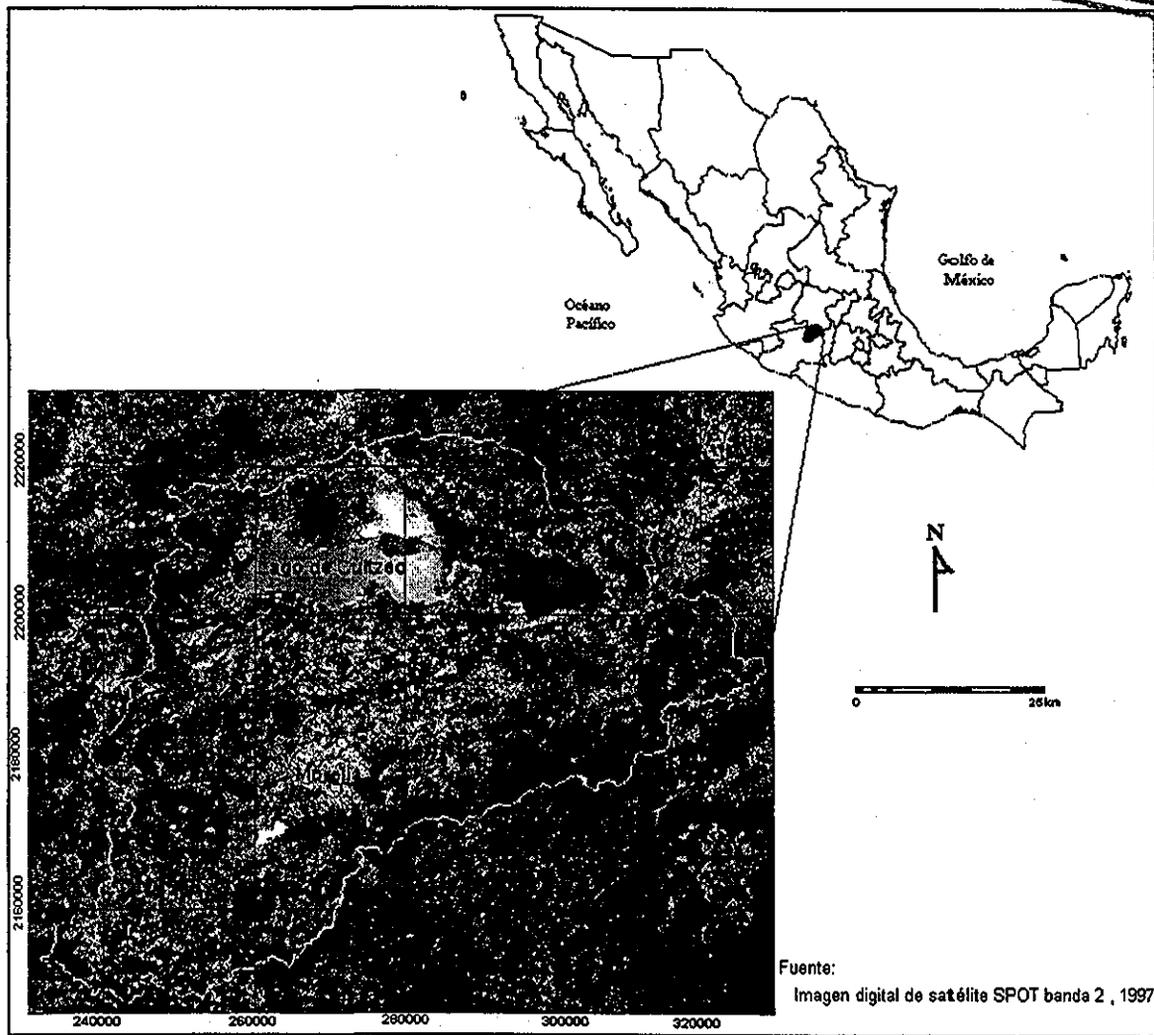


Figura 1. Área de estudio.

La precipitación en la cuenca es de 841.98 mm y muy variable para la zona de estudio (Dest est. = 190.41, CV = 22.6), mientras que la temperatura presenta menos variaciones alrededor de la media (17.3) (Dest. Est. 1.4, CV = 8). La precipitación se incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura, asciende desde el sur hacia el norte. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado secos a climas templado húmedo (Mendoza *et al*, 2002b). Una descripción más detallada del área en estudio se encuentra en (Mendoza *et al*, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se integraron los datos diarios de precipitación y temperatura de las 23 estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca de Cuitzeo (Figura 2). Los datos diarios se agregaron a medias mensuales anuales. Del total de estaciones, se escogieron aquellas localizadas en las cercanías del lago y con el mayor número de registros. Las estaciones seleccionadas fueron Cuitzeo (16027), Morelia (16081), Zinzimeo (16091), Huingo

(16052), Copándaro de Jiménez (16155), Carrillo Puerto (16016) y Chucándiro (16034) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en los análisis estadísticos de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Nombre	Clave	Años de registro de Temperatura	Años de registro de Precipitación
Carrillo Puerto	16016	31	32
Cuitzeo	16027	72	74
Chucándiro	16034	20	22
Huingo	16052	57	57
Morelia centro	16081	52	49
Planta de Bombeo Zinzimeo	16091	30	33
Copándaro de Jiménez	16155	29	26

El trabajo requirió la interpretación visual de las siguientes imágenes en formato digital:

- a) Compuestos mensuales del NDVI de NOAA AVHRR de los años 1997 al 2001,
- b) Landsat MSS (1976, 1986 y 1992),
- c) SPOT (1996),

También fueron interpretadas visualmente:

- a) el espaciograma en falso color a escala 1:250,000 elaborado por el INEGI (1995) (representación del compuesto en falso color de una imagen Landsat TM de 1993),
- b) las fotografías aéreas pancromáticas de 2000 (1:37,000).

También se digitalizó la línea costa de la cartografía topográfica de INEGI (1990), la cual fue elaborada con fotografías a escala 1:50,000 de 1974.

Con las imágenes NOAA AVHRR, se estimaron las superficies mensuales de los cuerpos de agua de Chapala y Cuitzeo para el periodo de 1997 al 2001, a través de interpretación visual en pantalla. Con las imágenes de mayor resolución, se estimaron las superficies del lago de Cuitzeo para la época de secas de cada año (1974, 1976, 1986, 1992, 1992, 1993, 2000).

Variación mensual de la superficie de los lagos de Chapala y Cuitzeo

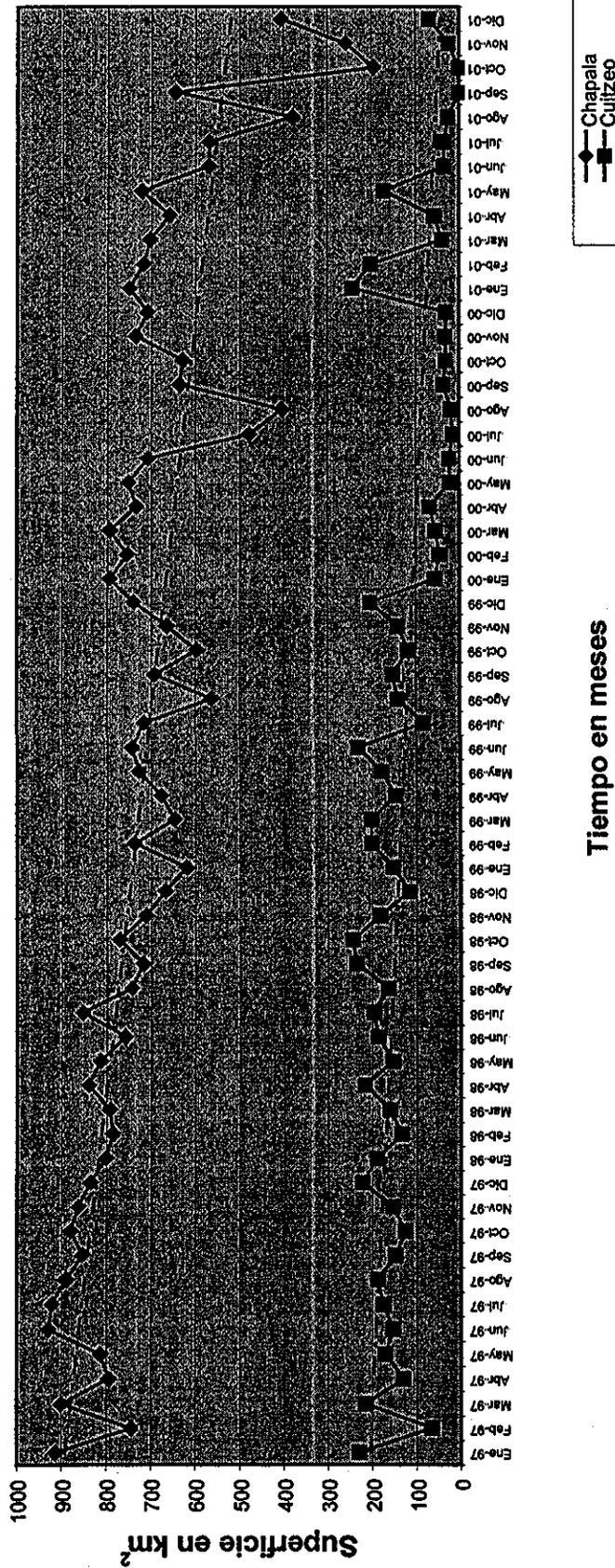


Figura 12. Superficies de los lagos de Cuitzeo y Chapala.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

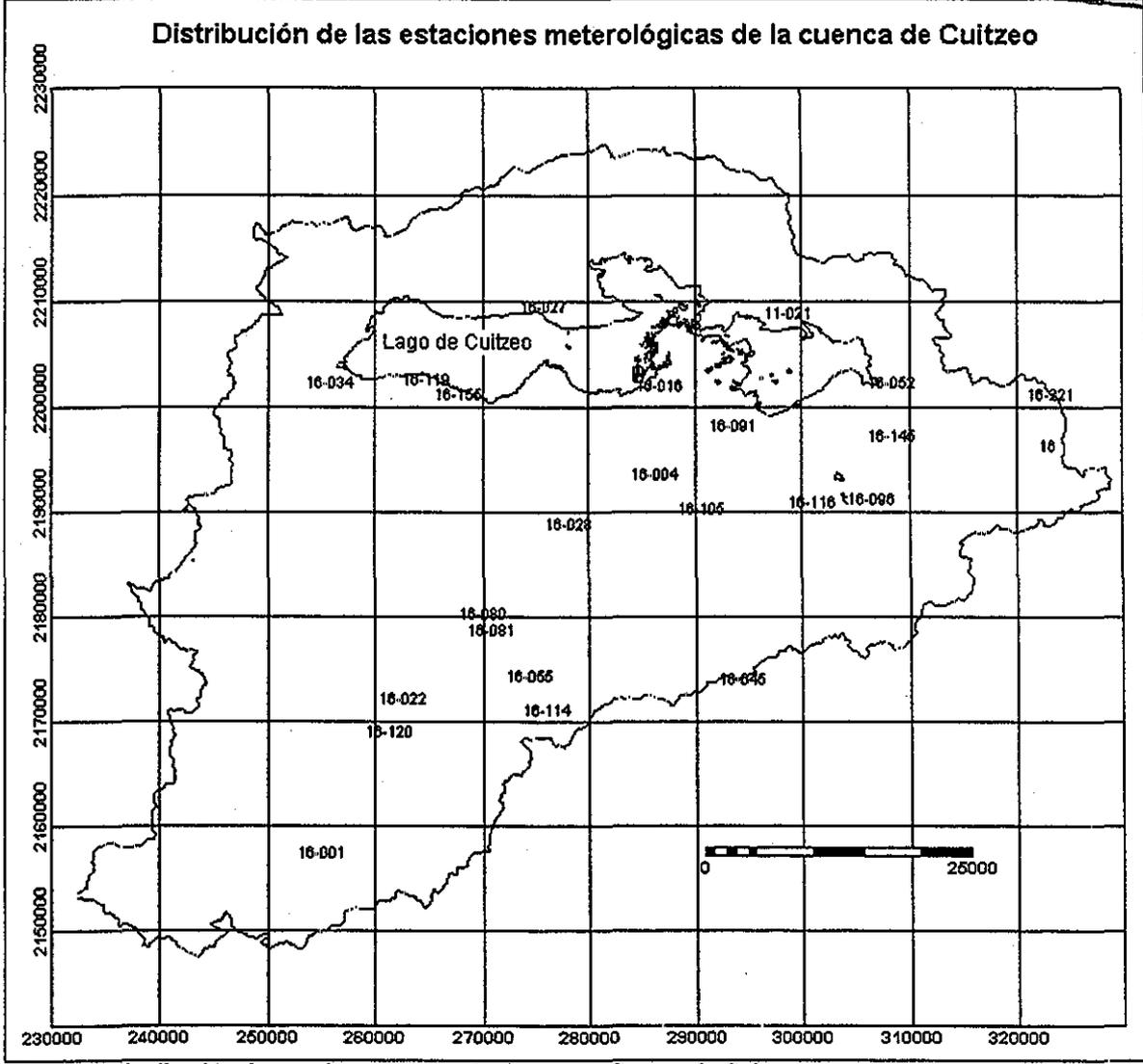


Figura 2. Distribución de estaciones meteorológicas en la Cuenca de Cuitzeo.

Análisis estadísticos

Índice de Severidad de la Sequía

La idea central del Índice de Severidad de la Sequía (PDSI, por sus siglas en Inglés) o simplemente Índice de Palmer es que la cantidad de precipitación requerida para la operación normal de un ecosistema, ciudad o zona agrícola durante un período depende del clima promedio de área y de las condiciones prevalecientes antes y durante el periodo en cuestión (Alcántara, 2002). La diferencia entre la precipitación real y la precipitación climáticamente apropiada para las condiciones existentes representa una medida directa de la influencia que tiene la humedad a lo largo del tiempo con respecto a la normal. La ponderación de las diferencias genera un índice que es razonablemente comparable tanto en el tiempo como en el espacio (Palmer 1965).

EL PDSI esta basado en un balance hídrico que considera la variación del agua disponible para la vegetación. En el modelo la humedad en el suelo se representa para dos profundidades de capacidad de campo, la capa superficial y la subsuperficial. Los datos climáticos utilizados en el índice son: precipitación mensual y temperatura media mensual. El PDSI realiza una normalización de las condiciones climáticas par cada zona; estos cálculos hacen comparable dos o más sitios entre si (Palmer, 1965). Por lo tanto,

$$L_s = S_s \text{ or } (PE - P)$$

cualquiera es menor y

$$L_u = (PE - P - L_s) \frac{S_u}{AWC}, \quad L_u \leq S_u$$

alguno es menor y

$$L_u = (PE - P - L_s) \frac{S_u}{AWC}, \quad L_u \leq S_u$$

donde

L_s = pérdida de humedad desde la capa superficial

S_u = humedad disponible almacenada

PE = evapotranspiración potencial para el mes

P = precipitación para el mes

L_u = pérdida de capas subyacentes

AWC = capacidad disponible de agua combinada para ambas capas.

Con el PDSI se estimó la serie de tiempo de sequía para las estaciones con el registros histórico más largo de precipitación y temperatura. La serie resultante, así como las series originales de precipitación y temperatura se analizaron como se describe en el apartado siguiente.

Análisis de series de tiempo

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones o variables hidrológicas, colectadas de manera secuencial cuyos valores ocurrieron durante un intervalo de tiempo (Δt). El análisis de series de tiempo puede ser seleccionando valores de la variable X a intervalos de tiempo igualmente espaciados (cada mes, cada año) o a intervalos irregulares (puntos de inflexión).

Una característica de las series de tiempo de variables hidrológicas es su variabilidad determinística, estocástica o ambas. En ocasiones se observan tendencias, ciclos o saltos en dichas series producto de la influencia humana o de la naturaleza. Estas componentes determinísticas son más aparentes cuando se construyen gráficos de dispersión de valores, que muestren su distribución y el promedio de la serie completa de observaciones. La media móvil se obtiene:

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

La suma de cada grupo se llama suma móvil de orden N. El orden, N, puede ser cualquier valor, pero si es pequeño, entonces, puede ser poco efectivo para minimizar la variabilidad aleatoria. Por el contrario, si N es grande, algunos componentes como los cíclicos pueden enmascarse. Las series de tiempo anuales a menudo son analizadas con promedios móviles de 5 años.

Si la determinación de N es correcta, se pueden visualizar los efectos de largo plazo de ciclos húmedos y ciclos de sequía. Los periodos húmedos se reconocen comparando la línea de los promedios móviles de 5 años con la línea de la media de la serie completa o media única. Durante un periodo húmedo, la línea de los promedios móviles siempre se ubicará arriba de la línea de la media única. Durante periodos de sequía, la línea de las medias móviles siempre estará debajo de la línea de la media única.

Probabilidad de eventos y periodos de retorno

La probabilidad de eventos y periodos de retorno se calculó para las series de precipitación y temperatura. Existe una fuerte tendencia hacia la aceptación de la fórmula de Cunane para estimar la probabilidad de eventos en aplicaciones prácticas en hidrología (Bobée y Ashkar, 1991):

$$P_k = \frac{k - 0.4}{N + 0.2}$$

El periodo de retorno es solo el inverso del valor de la frecuencia empírica calculada con la formula anterior. En consecuencia el periodo de retorno se estimó de la siguiente manera:

$$P = (N+0.2)/(k-0.4)$$

donde

P_k = la frecuencia empírica

N = el número total de eventos

k = el numero de orden del evento kth ordenado de menor a mayor

El análisis de tendencia

La evaluación de las tendencias de las series de precipitación, temperatura y PDSI se realizó con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Kendall, 1938). La prueba utiliza un procedimiento basado en rangos y es adecuada para datos sin distribución normal, datos censados, con datos con valores extremos y tendencia no lineal. 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 alternativa H_1 es que la distribución de x_k y x_j no son idénticas para todos los $k, j \leq n$ con $k \approx j$. 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:

$$E[S] = 0 \text{ y}$$

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

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 $\alpha = 0.5$. 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). En este trabajo se aplicó la prueba de Mann-Kendall para evaluar únicamente datos no estacionales e independientes (precipitación, temperatura e índice de sequía de Palmer anuales).

Análisis de regresión y correlación

Con los datos de precipitación y temperatura mensual del año antecedente a la superficie calculada, se realizaron correlaciones con las temperaturas y precipitaciones mensuales con la superficie del lago, con objeto de encontrar aquellas variables independientes que mejor se asociaban a la distribución de la superficie del lago. Posteriormente se corrió un análisis de regresión lineal múltiple, con el cual se construyeron modelos de regresión para cada una de las estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías del lago.

RESULTADOS

Series de tiempo

Considerando las pocas estaciones existentes con amplios históricos superiores a 30 años, se realizó el análisis de series de tiempo con los datos de precipitación, temperatura e Índice de Sequía de Palmer. El análisis indicó que las estaciones Cuitzeo, Huingo y Cointzio, presentan un comportamiento cíclico. La precipitación y valores de índice de sequía de Palmer entre 1940 y 1960 presentan un descenso en sus valores (Figuras 3-10); sin embargo, en 1958 todas las estaciones registraron un incremento considerable de la precipitación; que fue cercana al doble de la media anual de cada estación; comportamiento similar al de resto de las estaciones del centro del país (véase García y Vidal, 1981). Este incremento ocasiona que en varias estaciones el periodo de precipitación por debajo de la media termine y empiece un nuevo ciclo más húmedo.

La reducción en la precipitación empieza nuevamente a finales de los años 1970's y termina al principio de la década de 1990; este periodo es seguido por un periodo húmedo, relativamente corto (aproximadamente 5 años). A mediados de la década de los 90's se aprecia nuevamente una reducción de las precipitaciones medias anuales y un aumento en la presencia de índices de sequía en las estaciones de la cuenca.

En síntesis, la serie de precipitación muestran tres periodos relativamente secos: a) 1940 a 1960, b) 1980 a 1990 y c) 1995 a 2000. Estos periodos corresponden con la reducción registrada de la superficie del lago (1942, 1946 y 1962) (Alvarado-Díaz *et al.*, 1994; Corona, 1979), y los años 1942 y 1962 corresponden a la época de total desecación del cuerpo de agua (Alvarado-Díaz *et al.*, 1994). Estas fechas se localizan dentro del periodo de sequía más importante. La amplitud del lago se redujo para el año de 1986 a 250.8 km², esta reducción corresponde al segundo periodo de sequía importante, el cual fue evaluado con la imagen de satélite Landsat MSS. Por último, de 1995 a la fecha, el lago también presenta niveles bajos y corresponden al tercer periodo de sequía en la zona para las últimas décadas.

El análisis de la gráfica de series de tiempo de datos de precipitación de la estación Cuitzeo muestra evidencias de ciclos recurrentes con una duración aproximada de 20 años. El primer ciclo es seco, este empieza en 1934 y termina en 1957, con una duración de 23 años. El segundo corresponde a un ciclo húmedo con una duración de 21 años, los cuales inician en 1957 y culminan en 1978, el último ciclo es seco y tiene una duración de 20, que inició en 1978 y termina en el año 2000 (año en que termina la serie de datos) (Figura 3).

Serie de precipitación media anual de la estación Cuitzeo

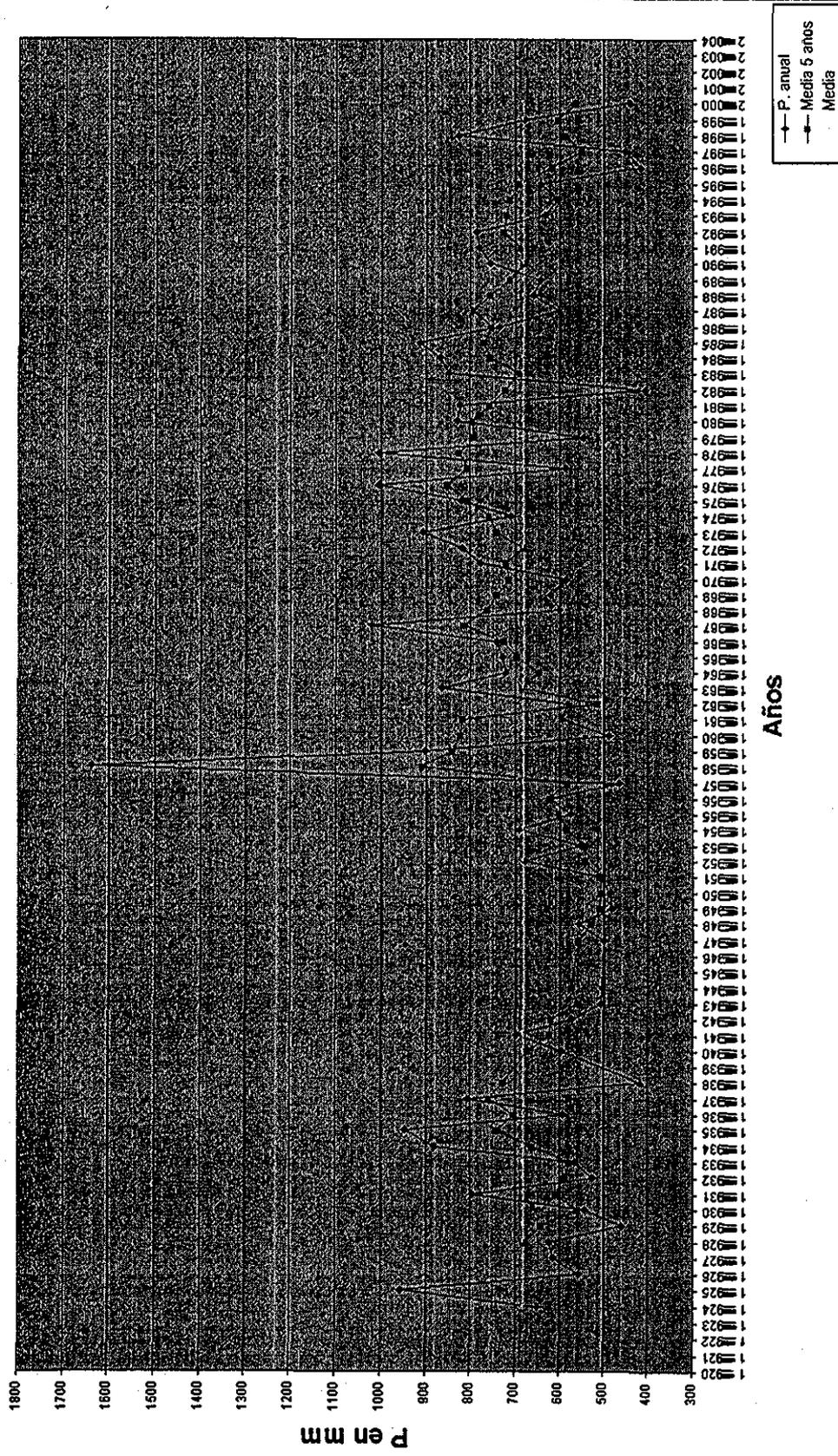
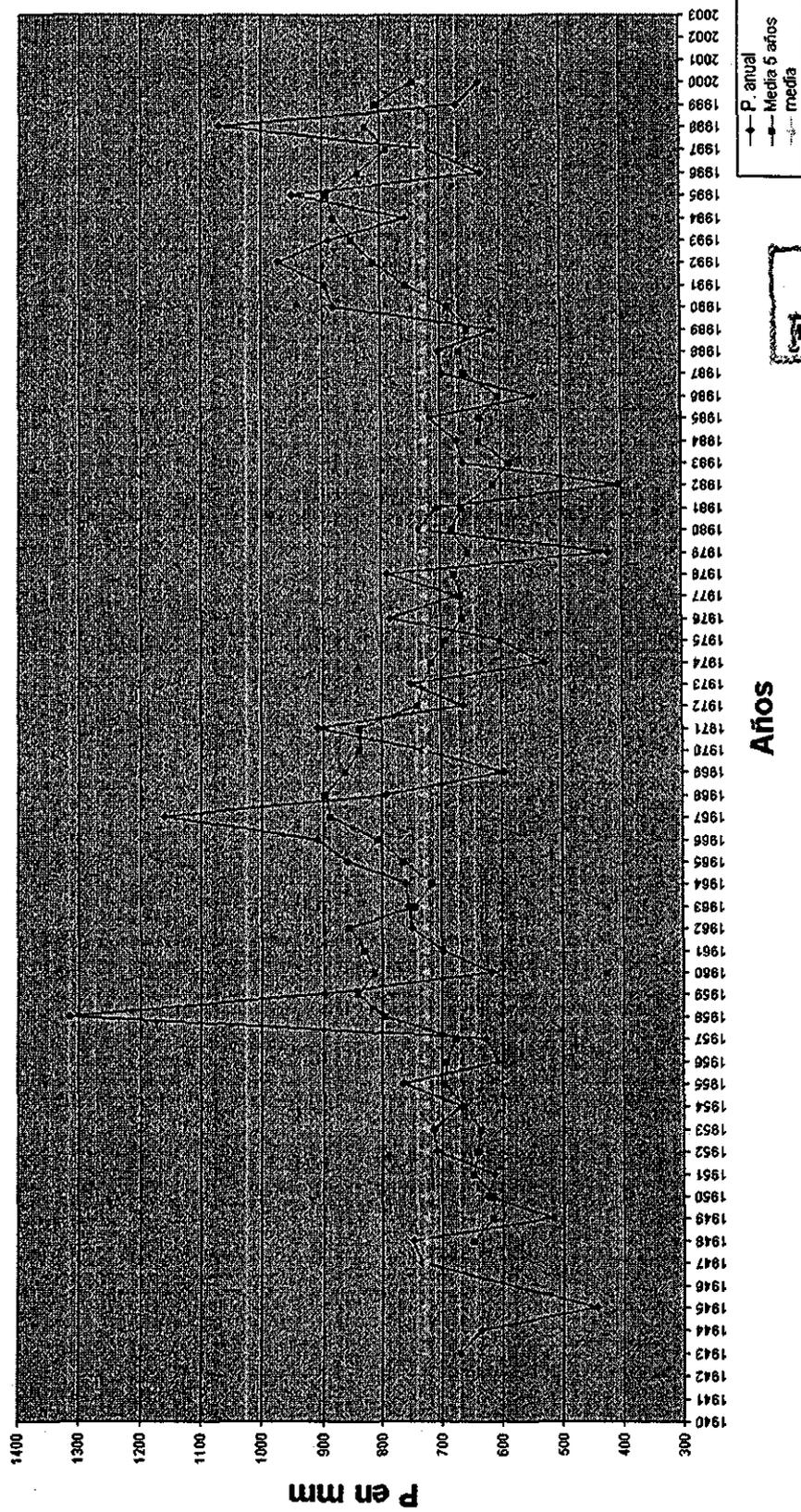


Figura 3. Serie de tiempo de precipitación de la estación Cuitzeo.

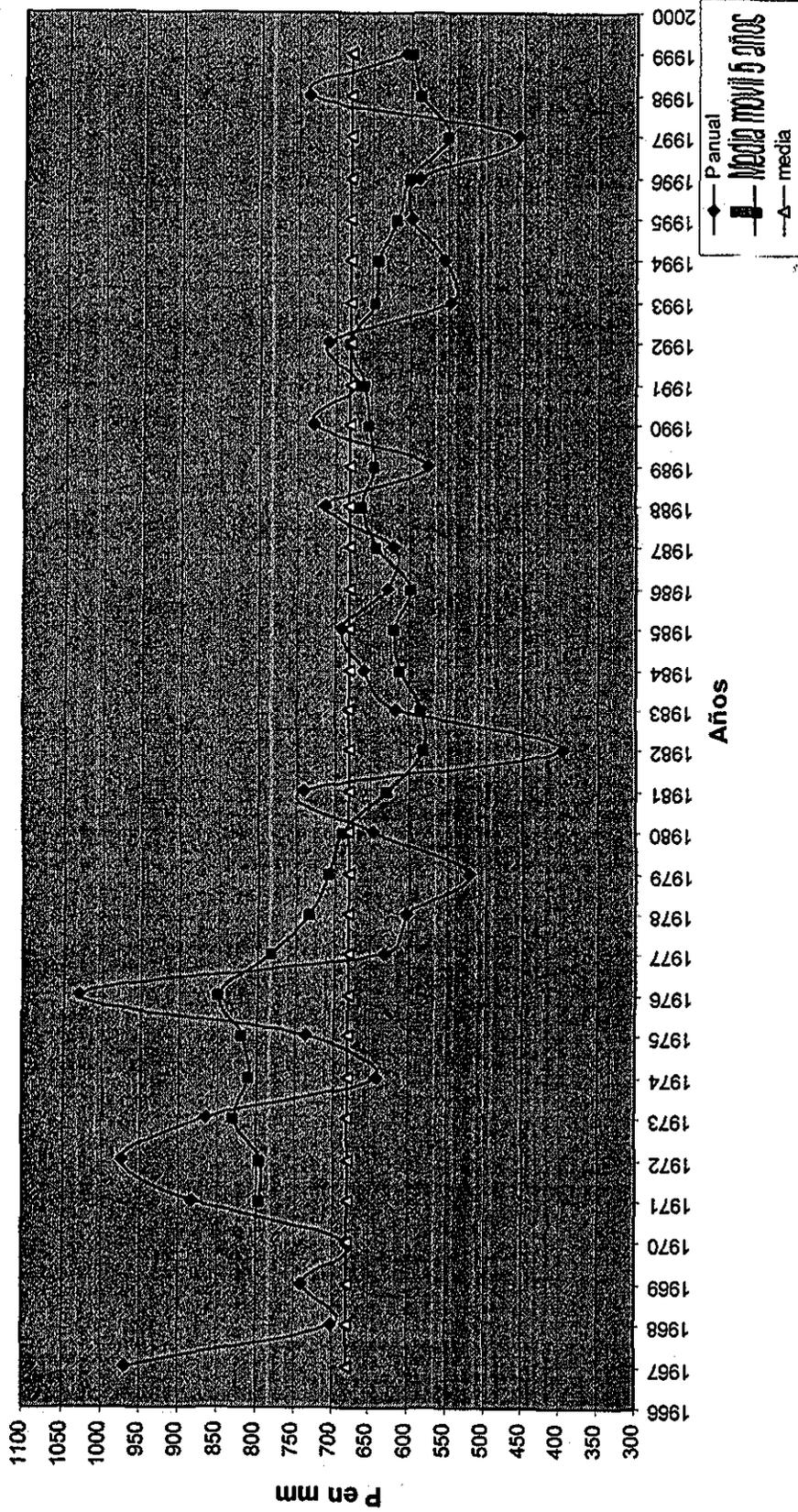
Serie de tiempo de precipitación de la estación Huingo



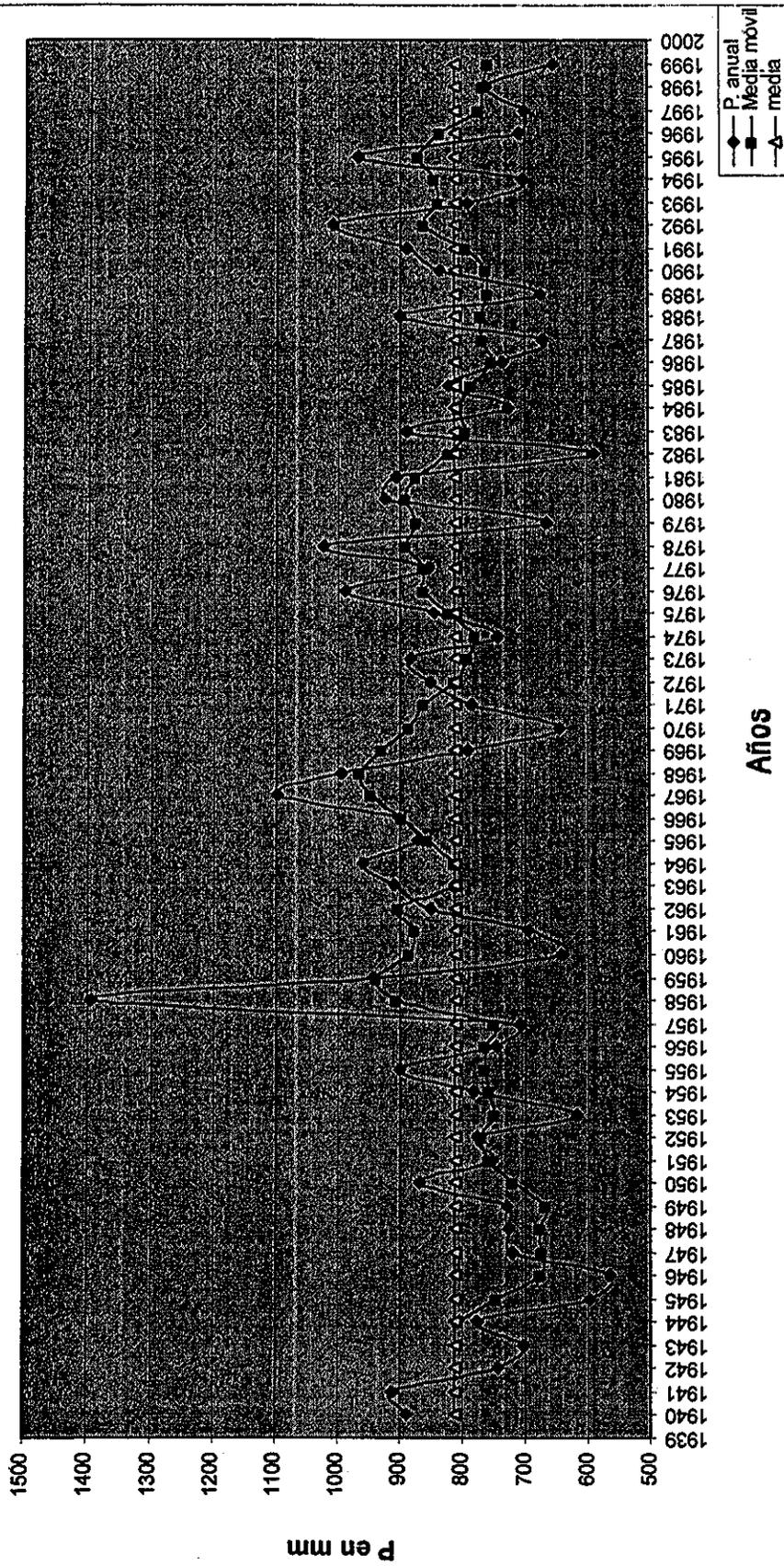
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4. Serie de tiempo de precipitación de la estación Huingo.

Serie de tiempo de precipitación de la estación Zinzimeo

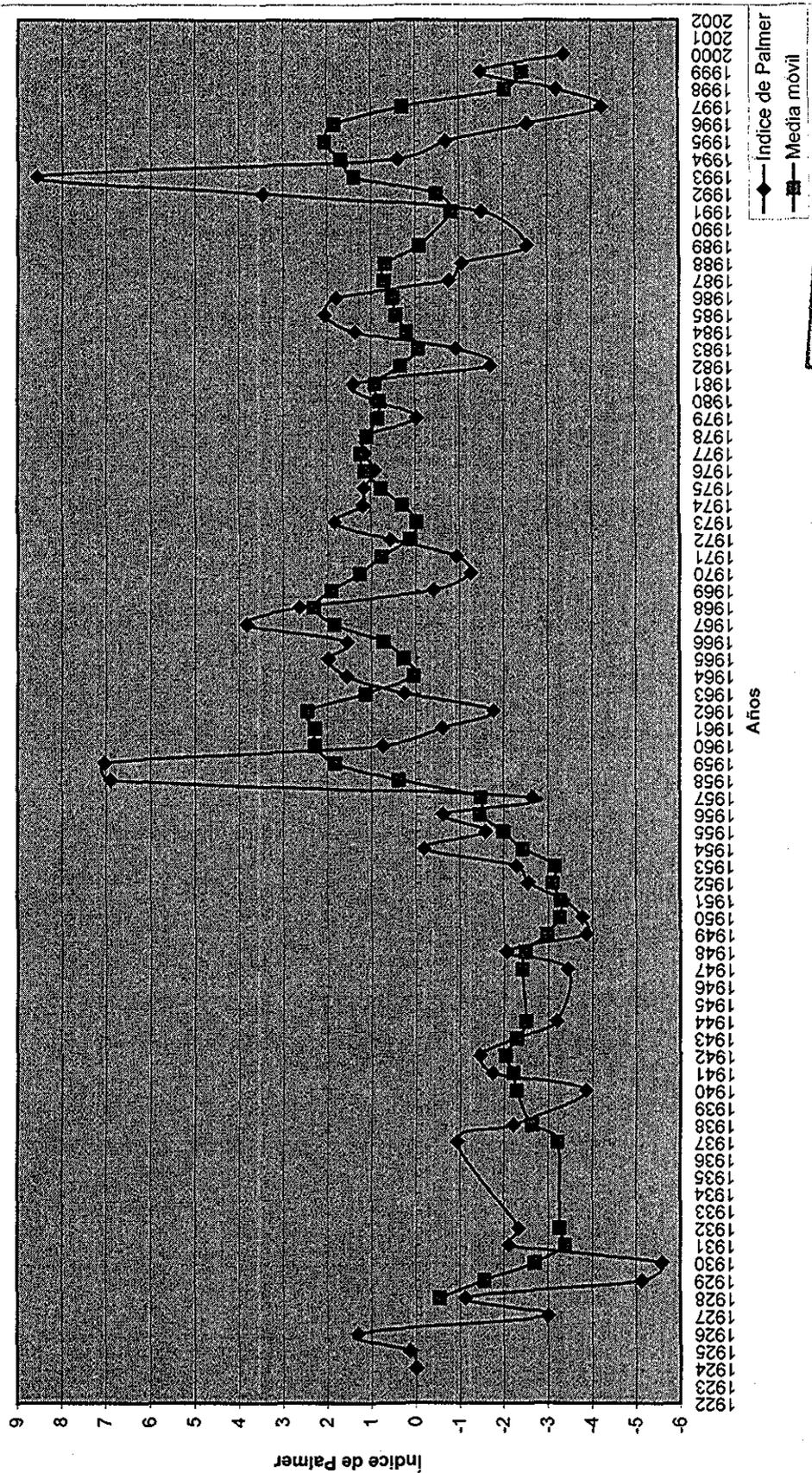


Serie de tiempo de precipitación de la estación Cointzio



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Cuitzeo



TESIS CON
FALLA DE ORIGE

Figura 7. Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Cuitzeo.

Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Morelia

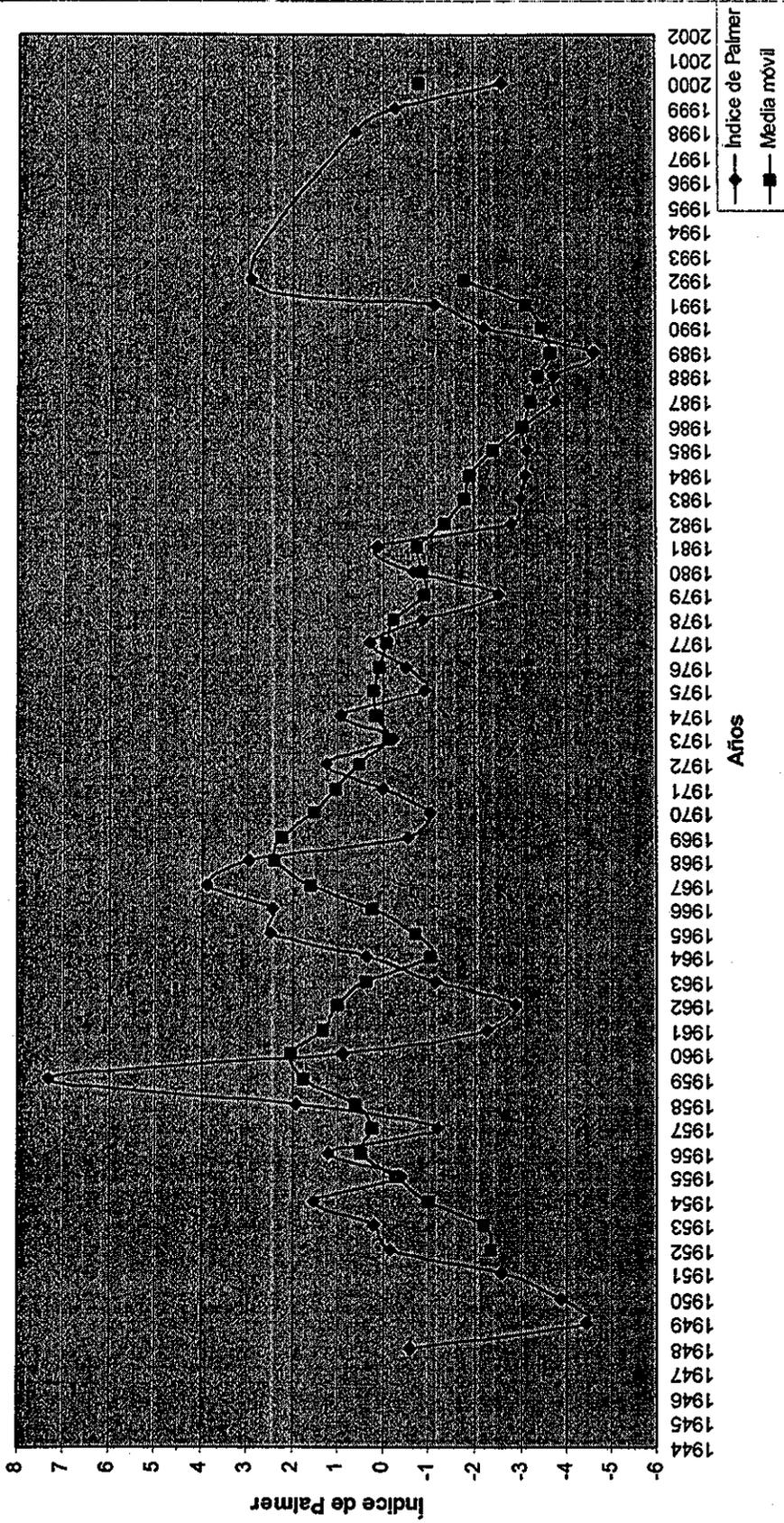


Figura 8. Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Morelia.

Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Zinzimeo

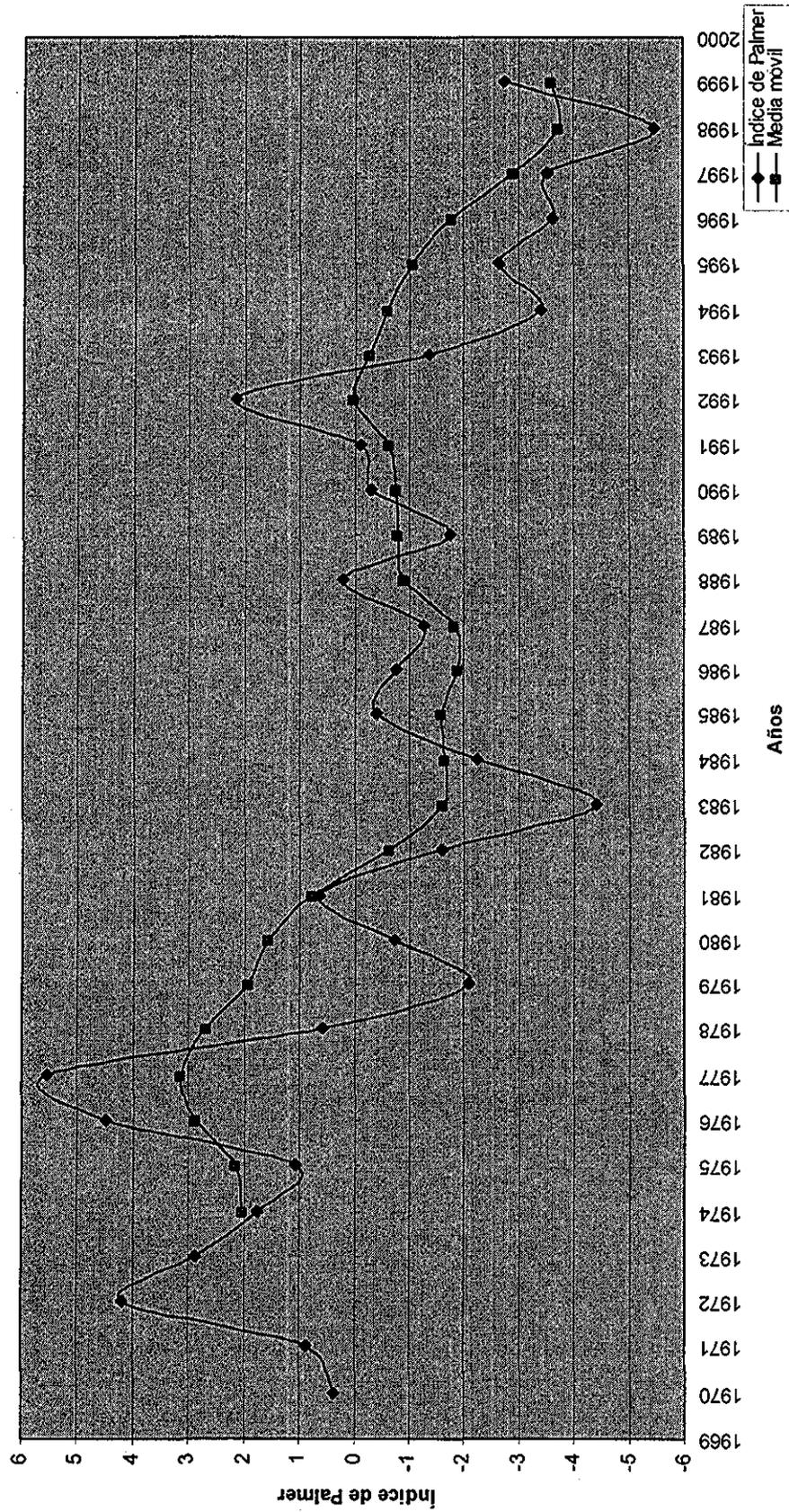
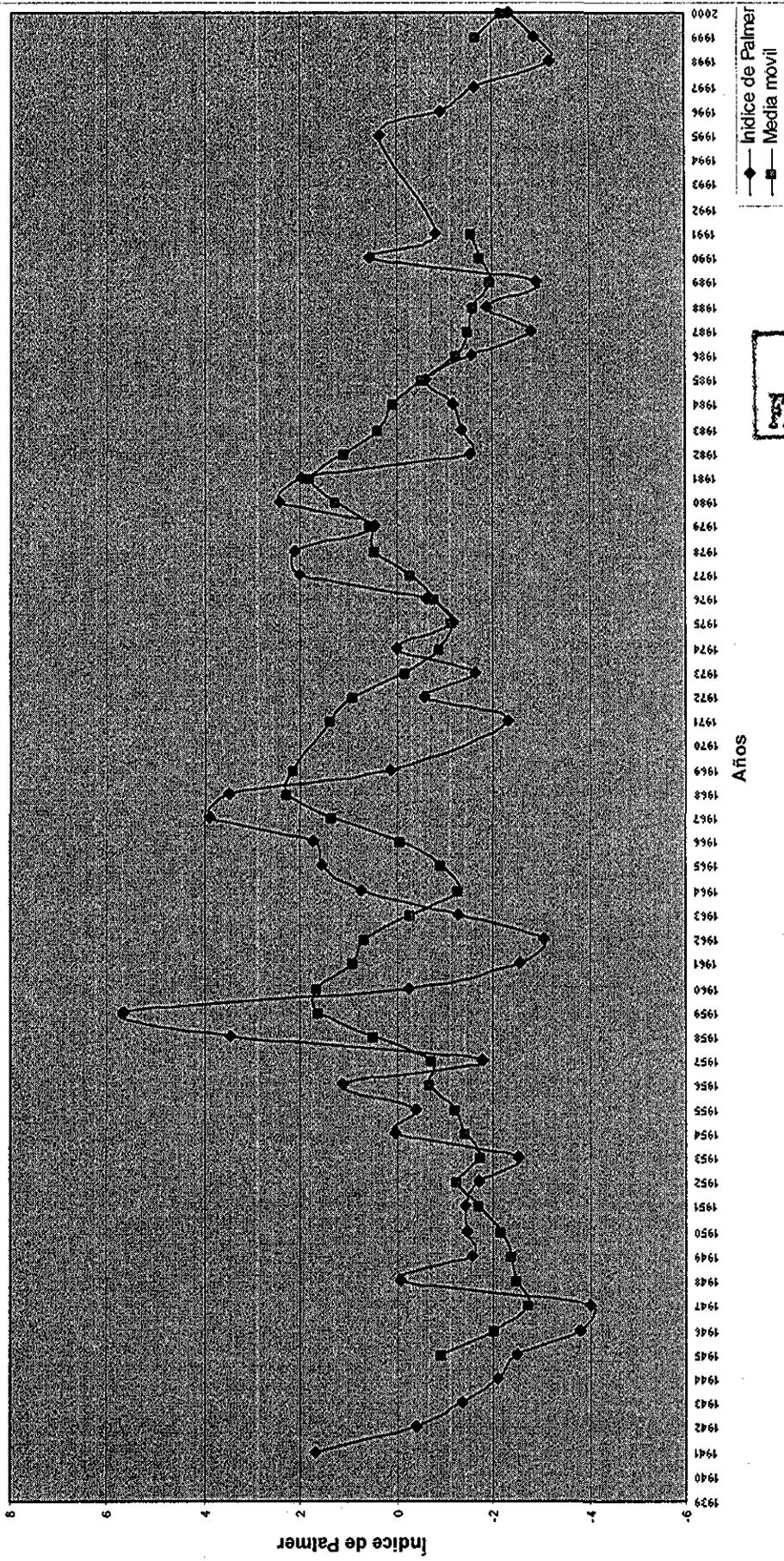


Figura 9. Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Zinzimeo.

Serie de tiempo del Índice de Palmer de la estación Cointzio



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 10. Serie de tiempo del índice de Palmer de la estación Cointzio.

En la Figura 11 se muestran las superficies del lago, durante la época de secas en los distintos documentos aeroespaciales (Landsat MSS y TM, SPOT, fotografías aéreas y mapas topográficos). Aunque es una serie corta, en ella se observa oscilaciones a lo largo del tiempo. La mayor superficie se calculó para el año de 1994 (350 km²; fuera de los periodos relativamente secos), la menor superficie se presentó en 1986 (250 km²; localizada en el segundo periodo relativamente seco). Es decir, la superficie del lago varía de acuerdo a los cambios de precipitación y periodos de sequía en la cuenca.

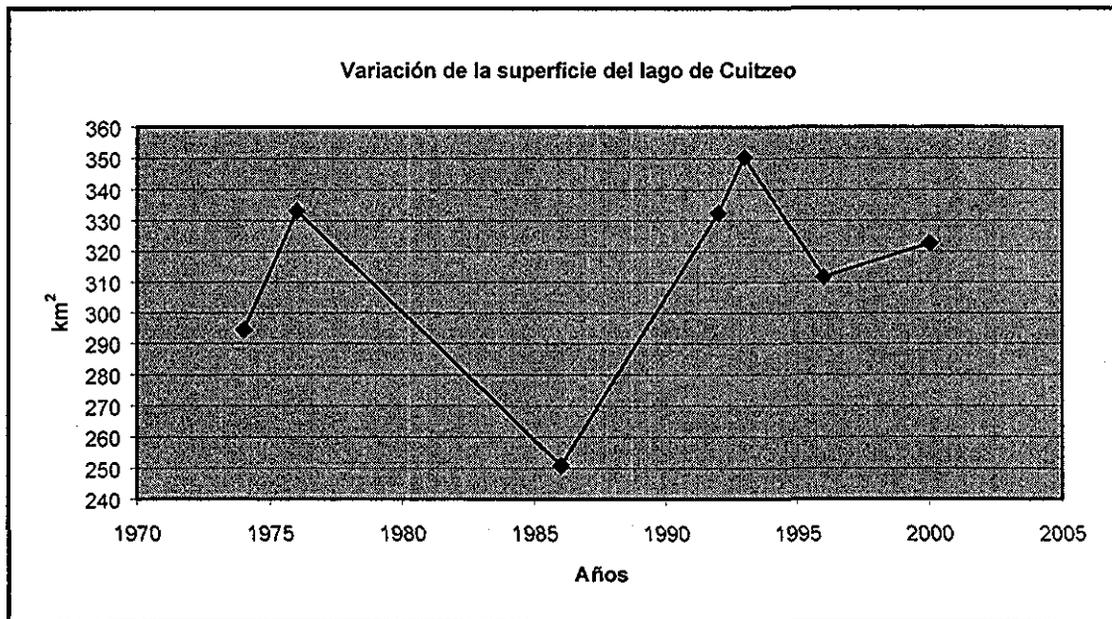


Figura 11. Superficies del lago de Cuitzeo.

La dinámica de las superficies cubiertas el lago de Cuitzeo es fuertemente estacional a lo largo de año (entre meses) y a lo largo de los años (cíclica). En la Figura 12 se observa la variación de las superficies de los lagos de Chapala y Cuitzeo. Las superficies fueron calculadas a partir de la interpretación de las imágenes de NOAA AVHRR. En la figura anterior se aprecia un comportamiento estacional, fuertemente perturbado por la sequía en la cuenca. Tanto el Lago de Chapala, como el de Cuitzeo presentan tendencias a la reducción de la superficie ocupada por agua. El lago de Cuitzeo no presentó agua durante varios meses en los años 2000 y 2001; es decir, se desecó temporalmente.

Probabilidad de eventos y periodos de retorno

Si se considera la precipitación y temperatura registrada durante los años con la menor superficie cubierta por agua en el lago, en general estos parámetros meteorológicos indican que corresponden a años con probabilidad de ocurrencia de al menos 37 %, con periodos de retorno mayores a 3 años. Al analizar la frecuencia de eventos con precipitaciones menores a la media, así como de temperaturas mayores a la media, se observa que la frecuencia de ocurrencia de años secos y cálidos es mayor en las últimas dos décadas del siglo pasado (Cuadros 2 y 3).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 2. Años con precipitación media anual menor a la media total por estación meteorológica.

Década	Cuitzeo	Morelia	Zinzimeo
1990-2000	7	8	5
1980-1989	4	7	7
1970-1979	3	9	5
1960-1969	5	1	
1950-1959	7	5	
1940-1949	7	4	
1930-1939	5	4	
1920-1929	5	6	

Cuadro 3 Años con temperatura media anual mayor a la media total por estación meteorológica

Década	Cuitzeo	Morelia	Zinzimeo
1990-2000	8	8	10
1980-1989	7	7	9
1970-1979	9	9	2
1960-1969	1	1	
1950-1959	5	1	
1940-1949	4		
1930-1939	4		
1920-1929	6		

El año de 1998 el lago prácticamente se colmató de agua; la probabilidad de ocurrencia de la precipitación similar (827.2 mm) a la del año de 1998 en la estación de Cuitzeo es de 20%, con un periodo de retorno de 5 años.

Análisis de tendencia

El análisis de tendencia indica que sólo la estación Zinzimeo, presenta un incremento en la temperatura y una reducción en la precipitación e índice de sequía estadísticamente significativa (Cuadro 4). El resto de las estaciones analizadas no presentan tendencias significativas. Esto coincide con el comportamiento cíclico de los registros de precipitación y temperatura. Probablemente, la estación Zinzimeo presenta las tendencias descritas porque sólo tiene registrado un periodo de tiempo relativamente corto (alrededor de 30 años).

Cuadro 4 Resultados del análisis de tendencia.

Estación	Tma	Pma	Indice de Palmer
Morelia	4.17482	0.107606	-1.80427
Cuitzeo	0.704936	1.61002	2.31006
Huingo	-2.82926	1.24598	0.743456
Carrillo Puerto	-0.679857	0.178381	0.135971
Planta de Bombeo Zinzimeo	3.8715	-2.95943	-3.92503
Copándaro de Jiménez	1.70698	-0.116775	-0.677294
Chucándiro	-0.0324443	-2.19944	-0.811107
Contzio	0.561277	0.433699	-0.323541

Análisis de correlación y de regresión

Considerando que las series de precipitación, temperatura e Índice de Sequía de Palmer son cíclicas y la superficie del cuerpo de agua, presenta el mismo comportamiento; se realizó un análisis de correlación entre la superficie del lago (y) y las variables antes mencionadas (x_1, x_2, x_3). El análisis indica que en general el tamaño del cuerpo de agua se relaciona con la precipitación antecedente, principalmente con los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio. En todos los casos la precipitación de enero tiene una correlación positiva, pero nunca fue mayor de ± 0.7 , por lo que nunca se utilizó este mes para la generación de modelos de regresión múltiple. El umbral mínimo seleccionado en la construcción de modelos fue ± 0.7 . El valor crítico para una correlación con $n = 7$ es 0.58 con una $p = 0.1$ (Zar, 1996).

Empíricamente no se esperaba que las precipitaciones antecedentes fueran correlacionables negativamente con la superficie del lago; sin embargo, sólo en cuatro de las correlaciones el coeficiente de correlación fue positivo. En seis casos el coeficiente fue negativo (Cuadro 5).

De la misma forma, se consideraba a priori que el coeficiente de correlación de la superficie del lago con la temperatura de los meses anteriores sería negativa. Sin embargo, en tres casos esta fue positiva y en un caso negativa (Cuadro 5).

Los modelos de regresión de las estaciones seleccionadas se presentan en los Cuadros 7-12. Todos los modelos presentaron un nivel de una $p < 0.1$ y una $F > 4$; a excepción del construido con los datos de la estación Huingo. El mejor de los modelos de regresión corresponde al elaborado con la estación Cuitzeo (Cuadros 7-12).

Estos modelos permiten predecir cual será la magnitud del espejo de agua del lago de Cuitzeo para la época de secas, basado sólo en datos de precipitación y temperatura mensual antecedente.

El comportamiento del lago en el largo plazo (1974-2000) se aprecia en la Figura 12. La superficie del lago varía de acuerdo a los cambios en los niveles de precipitación y sequía de la cuenca en el tiempo.

Cuadro 7. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago vs estación Carrillo Puerto.

Variabes predictoras	coeficiente	Error estándar	T de Student	P	VIF
Constante	288.642	136.315	2.12	0.1684	
PABR	-1.65356	0.30151	-5.48	0.0317	1
PENE	0.14923	0.24979	0.6	0.6109	6.3
FEB	1.93546	1.71577	1.13	0.3764	5.3
JUN	1.86888	7.15419	0.26	0.8184	4.3
r^2		0.9639	error medio cuadrático		116.772
r^2 ajustada		0.8918	desviación estándar		10.8061
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	4	6243.19	1560.8	13.37	0.0708
Residual	2	233.544	116.772		
Total	6	6476.74			
Casos incluidos		7	casos faltantes		0

Cuadro 8. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago vs estación Huingo.

Variables predictoras	coeficiente	error estándar	T de Student	P	VIF
Constante	-221.366	746.736	-0.3	0.7816	
PENE	0.27139	0.45719	0.59	0.5847	2.7
TJUL	27.7472	39.8157	0.7	0.5242	2.7
r^2		0.5061	error medio cuadrático		799.637
r^2 ajustada		0.2592	desviación estándar		28.2779
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	2	3278.19	1639.09	2.05	0.2439
Residual	4	3198.55	799.637		
Total	6	6476.74			
Casos incluidos		7	casos faltantes		0

Cuadro 9. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago vs estación Cuitzeo.

Variables predictoras	coeficiente	error estándar	T de Student	P	VIF
Constante	418.879	443.252	0.95	0.518	
PAGO	-0.02308	0.39458	-0.06	0.9628	74.5
PFEB	2.11411	0.86381	2.45	0.2469	2.7
PJUN	-0.38477	0.17602	-2.19	0.2731	5.8
PABR	-1.88377	0.47861	-3.94	0.1584	2.5
TDIC	-2.9696	24.9957	-0.12	0.9247	68.3
r^2		0.9934	error medio cuadrático		42.5256
r^2 ajustada		0.9606	desviación estándar		6.52116
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	5	6434.21	1286.84	30.26	0.1371
Residual	1	42.5256	42.5256		
Total	6	6476.74			
Casos incluidos		7	casos faltantes		0

Cuadro 10. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago vs estación Chucándiro.

Variables predictoras	coeficiente	error estándar	T de Student	P	VIF
Constante	299.227	20.2284	14.79	0.0007	
PMAR	-4.98926	2.30455	-2.16	0.119	1.4
PMAY	0.34024	0.24688	1.38	0.262	1.4
r^2		0.8202	error medio cuadrático		382.546
r^2 ajustada		0.7003	desviación estándar		19.5588
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	2	5235.05	2617.52	6.84	0.0762
Residual	3	1147.64	382.546		
Total	5	6382.69			
Casos incluidos		6	casos faltantes		0

Cuadro 11. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago vs estación Morelia.

VARIABLES PREDICTORAS	COEFICIENTE	ERROR ESTÁNDAR	T DE STUDENT	P	VIF
Constante	155.882	28.8794	5.4	0.1166	
PMAR	-3.94974	0.60855	-6.49	0.0973	2.7
PAGO	0.79608	0.09472	8.4	0.0754	1.5
SEP	0.1728	0.08728	1.98	0.2978	6.2
PDIC	4.25793	1.50437	2.83	0.2162	5.8
r^2		0.996	error medio cuadrático		20.0203
r^2 ajustada		0.9799	desviación estándar		5.10101
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	4	6446.14	1611.53	61.93	0.095
Residual	1	26.0203	26.0203		
Total	5	6472.16			
Casos incluidos		6	casos faltantes		1

Cuadro 12. Modelo de regresión lineal simple de la superficie del lago vs estación Zinzimeo.

VARIABLES PREDICTORAS	COEFICIENTE	ERROR ESTÁNDAR	T DE STUDENT	P	VIF
Constante	153.149	138.215	1.11	0.33	
JUN	-0.35162	0.20348	-1.73	0.1591	1.4
TABR	9.97288	6.79288	1.47	0.216	1.4
r^2		0.7295	error medio cuadrático		437.951
r^2 ajustada		0.5943	desviación estándar		20.9273
Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	2	4724.93	2362.47	5.39	0.0732
Residual	4	1751.81	437.951		
Total	6	6476.74			
Casos incluidos		7	Casos faltantes		0

LIMITACIONES

A pesar de las limitaciones en la resolución espacial de las imágenes NOAA AVHRR (1 km x 1 km), su resolución temporal permitió monitorear el comportamiento del lago mensualmente. Las limitaciones se asocian a las diferencias de las estimaciones de superficie que se obtienen con las imágenes de alta resolución (MSS, TM, SPOT). Las superficies estimadas por las imágenes NOAA AVHRR siempre son menores a las superficies estimadas por los otros sensores remotos.

Cuadro 5. Matriz de correlación entre las precipitaciones antecedentes con la superficie del lago.

	PENE	PFEB	PMAR	PABR	PMAY	PIJUN	PIJUL	PAGO	PSEP	PDIC	PMA	TENE	TABR	TJUN	TIJUL	TAGO	TSEP	TOCT	TNOV	TDIC	TMA
Zinzimeo	0.584	0.468	-0.306	-0.221	0.225	-0.764	-0.547	-0.144	0.266	-0.420	-0.277	0.614	0.726	0.011	-0.340	-0.389	-0.311	-0.360	-0.442	-0.235	0.011
Cuitzeo	0.560	0.743	0.083	-0.847	-0.206	-0.837	-0.206	-0.807	0.357	0.029	-0.507	0.228	0.355	0.214	0.689	0.534	-0.112	0.444	0.434	0.790	0.603
Morelia	0.581	0.462	-0.839	-0.071	0.322	-0.415	-0.057	0.775	0.657	-0.651	0.553	0.151	0.027	-0.728	-0.329	-0.273	-0.517	-0.471	-0.206	0.007	-0.434
Huingo	0.668	0.532	0.020	-0.605	0.361	0.145	0.022	-0.357	0.197	-0.095	0.305	0.059	-0.503	0.663	0.680	0.238	0.260	-0.579	-0.196	0.030	-0.066
Copandaro	0.570	0.944	0.663	0.156	0.282	-0.910	0.260	0.475	0.541	0.397	0.663	-0.025	0.302	0.663	0.040	0.171	0.139	-0.442	0.412	0.338	0.142
Carrillo P.	0.623	0.617	0.411	-0.780	0.334	-0.054	0.342	-0.396	0.056	-0.044	0.169	-0.137	0.191	0.616	0.354	-0.012	0.049	-0.520	0.355	0.028	0.206
Chucándiro	0.532	0.401	-0.841	-0.486	0.734	-0.550	0.378	0.093	0.631	-0.238	0.477	0.340	-0.160	0.095	0.562	0.458	-0.556	-0.633	-0.695	-0.679	-0.333

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de largo plazo (1974-2000) indica que las superficies del vaso del lago de Cuitzeo varían con el tiempo. El cambio se asocia al comportamiento de la precipitación y la temperatura media mensual del año anterior. Los resultados de este trabajo sugieren que el tamaño del lago es sensible a las condiciones climáticas precedentes; y en consecuencia, los modelos de correlación construidos a partir de la series de largo plazo presentan posibilidades para pronosticar la superficie del lago de Cuitzeo, la cual fue estimada a partir de los datos de precipitación y temperatura media mensual del año anterior.

Los cambios monitoreados en el corto plazo (1997-2001) indican que la superficie del lago de Cuitzeo presenta una tendencia a la reducción de su cuerpo de agua. Las observaciones de campo desde 1998, muestran que la desecación anual es recurrente; especialmente en la sección oeste del lago. Este comportamiento es coherente con la reducción de las precipitaciones y ascenso de las temperaturas, así como los valores de índice de sequía de Palmer, calculados para los últimos años del siglo pasado.

Sin embargo, el análisis de tendencia indica que no existen cambios significativos en la precipitación, en el Índice de Sequía de Palmer, ni tampoco un aumento significativo de la temperatura en los últimos 75 años. La reducción del lago en los últimos diez años, también puede ser mayor debido a un incremento en el uso de agua urbano y rural de la cuenca (ver Lopez *et al.*, 2001; Acosta, 2002). Los procesos de urbanización y ganaderización, así como la actividad agrícola desencadenan o incrementan las tasas de procesos de contaminación y extracción de agua superficial y subterránea (Tóth 2000; Carrillo *et al.*, 1997). Los cambios en estos procesos están modificando los volúmenes de almacenamiento de agua en los distintos componentes del ciclo hidrológico. Por ejemplo, la desecación recurrente del lago de Cuitzeo es uno de los efectos de 1) la mayor extracción de agua subterránea, 2) la reducción en las precipitaciones medias anuales e incremento en temperaturas medias anuales en la cuenca.

Los resultados obtenidos también deben ser analizados en función de la información geológica de la cuenca, la cual indica que los registros sedimentarios del sistema lacustre son del Mioceno Tardío al Cuaternario, los registros caracterizan al ambiente de depósito como somero, y que ocasionalmente ha presentado eventos de desecación total (Israde-Alcántara, 1995; Velázquez Durán, 1998; Velázquez Duran *et al.*, 2001; Israde-Alcántara y Garduño 2002). Las secuencias sedimentarias fueron depositadas en la sub-cuenca Charo-Morelia, al sur del reciente centro de depósitos lacustres de Cuitzeo (centro-oeste de México), donde la depositación fue en su mayor parte controlada por un generalizado fallamiento y basculamiento de bloques. Además se han encontrado depósitos piroclásticos y epiclásticos a lo largo de la secuencia de terrígenos y biogénicos, los cuales indican intensiva actividad volcánica simultánea, directamente ligada al fallamiento (Israde-Alcántara y Garduño, 1999). Las secuencias resultantes de la depositación son superiores a 40 metros de espesor y registran cuatro estadios evolutivos principales, relacionados a eventos tectónicos y volcánicos específicos (Israde-Alcántara *et al.*, 1999).

El estudio polínico realizado en la cuenca de Cuitzeo por Velázquez Durán (1998), registra la vegetación existente en el lago para los últimos 35,000 a.p., lo que pone en evidencia

diferentes fluctuaciones climáticas en la cuenca y el lago de Cuitzeo. El lago de Cuitzeo durante los últimos 35,000 años a.p. ha presentado periodos de bajo nivel de agua, y un período de aguas más diluidas (es importante recordar que el lago es salobre), e incremento en el espejo de agua, en síntesis el sistema lacustre ha sido muy fluctuante a lo largo del tiempo geológico (Velázquez Durán 1998; Israde-Alcántara y Garduño, 1999, Israde-Alcántara *et al.*, 2002) (Figura 13). Las fluctuaciones en el lago representan cambios en el clima, principalmente en la precipitación y la temperatura a lo largo del tiempo geológico. Este comportamiento paleoambiental descrito para el lago y la cuenca se ha encontrado en varios cuerpos lacustres de la región (Metcalf, 1997; Metcalf *et al.*, 1994; Bradbury, 1997).

La falta de significancia estadística en relación a las tendencias de incremento del Índice de Sequía de Palmer, de la temperatura, así como de reducción en la precipitación puede apoyar la interpretación de que el comportamiento encontrado en relación a estas variables climáticas y al lago es similar al de muy largo plazo (historia geológica reciente), y que actualmente estamos en un periodo que presenta un muy bajo nivel del lago. El análisis de series de tiempo indica que la precipitación, la temperatura y el Índice de Sequía de Palmer tienen un comportamiento estacional. La serie de precipitación muestra tres periodos relativamente secos: a) 1940 a 1960, b) 1980 a 1990 y c) 1995 a 2000; además de tres ciclos de duración aproximada de 20 años: 1) 1934-1957, 2) 1957-1978 y 3) 1978-2000. Estos periodos y ciclos se asocian con la reducción de la superficie del lago a lo largo del tiempo.

Asimismo, estos resultados sugieren que los cambios en el lago no son producto de tendencias regionales ocasionados por patrones del cambio climático global causado por las actividades humanas; es decir, el lago desde el Mioceno Tardío ha sido somero o muy somero, y sólo se registran un par de periodos con importante transgresión lacustre. Sin embargo, las actividades humanas en la cuenca han estado afectando los niveles lacustres, por el incremento en la extracción y uso de aguas superficiales y subterráneas para en áreas urbanas y agrícolas (Mendoza *et al.*, 2001; Israde-Alcántara *et al.*, 2002).

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*. Se agradece la colaboración en la construcción y edición de bases de datos a Vicente Salinas y Alejandra Acosta, así como la elaboración de programas de cómputo a Camilo Alcántara y Peter Molnar. Los autores manifiestan su agradecimiento a la Dra. Isabel Israde por la documentación y comentarios proporcionados al escrito. Se agradece la cesión de imágenes de satélite al Instituto de Geografía de la UNAM. El primer autor agradece el apoyo económico proporcionado por el CONACyT y la UNAM a través de las becas de doctorado recibidas.

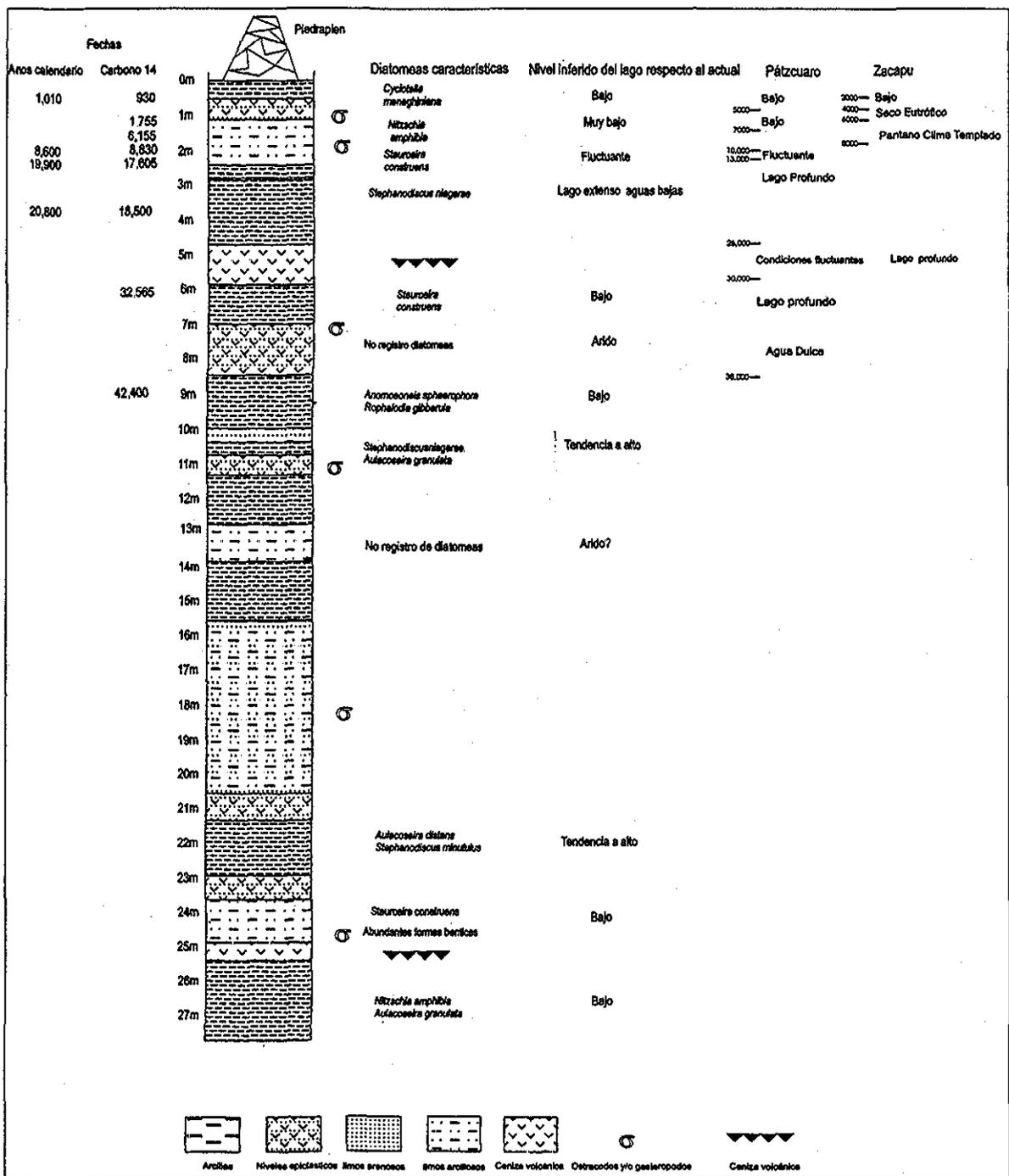


Figura 13. Estratigrafía del núcleo extraído y los niveles inferidos con base de diatomeas, comparación con el registro obtenido e los lagos de Pátzcuaro (Bradbury, 2000) y Zacapu (Metcalf, 1992; Fritz, *et al*, 2001). Tomada de Israde-Alcántara y Garduño, 2002.

REFERENCIAS

- Acosta, A. (2002), *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*. Tesis licenciatura en Biología. Facultad de Biología, UMSNH.
- Alcántara, C. (2002), *Ajustes para México del Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alvarado-Díaz, J. I. Zubieta-Rojas, R. Ortega-Murillo, A. Chacón-Torres y R. Espinoza-Gómez (1994) "Hipertrofización en un lago tropical somero (Lago de Cuitzeo, Michoacán, México)". En: Comisión de Ecología del H. Congreso de Michoacán LXVI Legislatura, *El deterioro ambiental, de la cuenca del lago de Cuitzeo*. H. Congreso del Estado de Michoacán.
- Bobée, B., y F. Ashkar (1991), *The gamma family and derived distributions applied in hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, CO, USA, 203 pp.
- Bradbury, J.P. (1997), "Sources of glacial moisture in Mesoamerica", *Quaternary International (43-44)*: 97-110.
- Bradbury, J.P. (2000), "Limnologic history of lake of Patzcuaro, Michoacán, México, for the past 48,000 years: impacts of climate and man," *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 148*: 117-131.
- Carrillo-Rivera, J.J., A. Cardona, y R. Margain (1997), "Groundwater flow and environmental impact in Mexico", *Geografía y Desarrollo, (15)*: 17-26.
- Corona, N.T. (1979), *Cuitzeo (estudio atropogeográfico)*, Basal. Morelia, Michoacán, México: 69 pp.
- Fritz, C.S., S. Metcalfe y W. Dean (2001), "Holocene climate patterns in the Americas inferred from pelolimnological records", En: Vera Markgraf (ed.), *Interhemispheric climate linkages*. Academic Press: 241-263.
- García E. y R. Vidal (1981), "La tendencia de las precipitaciones en la parte central de México en los últimos 50 años", *Biótica 6 (1)*: 103-115.
- 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.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2001), *Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del lago de Chapala*. Reporte Interno.

Israde-Alcántara, I. (1995), *Bacini lacustrini del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evolucionesedimentaria basata sulle diatomee*, PhD Thesis, Università Degli Studi di Milano: 254 pp.

Israde-Alcántara, I. y V.H. Garduño (1999), "Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacán)", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, **151**: 209-227.

Israde-Alcántara, I., V.H. Garduño y R. Ortega-Murillo (2002), "Paleoambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuitzeo", *Hidrobiológica*, **12 (1)**: 61-78.

Kendall, M.G. (1938), "A new measure of rank correlation", *Biométrica*, **30**: 81-93.

López-Granados, E. y G. Bocco (2001), "Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo", En: Mendoza-Cantú, 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: 266 pp.

Mendoza, M.E., G. Bocco y M. Bravo (2002a), "Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research", *Progress in Physical Geography*, **26 (3)**: 319-338.

Mendoza, M.E., G. Bocco y M. Bravo 2002b (sometido), "Evaluación de la calidad espacial y temporal de estaciones meteorológicas. El caso de la Cuenca de Cuitzeo", *Serie Varia, Instituto de Geografía-UNAM*

Mendoza-Cantú, 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: 266 pp.

Mendoza-Cantú, E., G. Bocco y M.E., López-Granados (en prensa), "Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Bases para su ordenamiento territorial", En: Barón, L., F. Peña y C. Ramírez. *La cuenca del lago de Cuitzeo: problemas y perspectivas de desarrollo*. Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), UACH.

Metcalf, S.E. (1997), "Paleolimnological records of climate change in Mexico - Frustrating past, promising future?", *Quaternary International (43-44)*: 111-116

Metcalf, S.E., F.A. Street-Perrot, S.L. O'Hara, P.E. Hales, R.A. Perrot (1994), "The paleolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier of Mesoamerica", En: Mallington A.C. y K. Pye (editores). *Environmental Change in Drylands: Biogeographical and Geomorphological Perspectives*. John Wiley and Sons. Chichester.

Metcalfé, S.E., S.L. O'Hara, M. Caballero y S. Davies (2000), "Records of Late Plesitocene-Holocene climatic change in Mexico – a review", *Quaternary Science Reviews* (19): 699-721.

Molnár, P. y J. Ramírez (2001), "Recent trends in Precipitation and streamflow in the Rio Puerco Basin", *Journal of Climate*, 14 (10): 2317-2328.

Palmer, W.C. (1965), *Meteorological Drought, Research Paper No. 45*. Washington, D.C., USA, Department of Commerce. Weather Bureau: 59 pp.

Salas J.D. (1992), "Analysis and modeling of hydrological time series", En: Maidment (editor), *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, New York.

Schneider, S.R., D.F. McGinnis y G. Stephens (1985), "Monitoring Africa's Lake Chad Basin with Landsat and NOAA satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, 6: 59-73.

Ióth, J. (2000), "Las aguas subterráneas como agente geológico, causas procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero* 111 (4): 9-26.

Velázquez Durán, R. (1998), *Palinología en relación a paleoambientes de los últimos 35,000 años en la cuenca del lago de Cuitzeo, Mich., México*, Tesis Profesional. Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México: 107 pp.

Velázquez Durán, R., I. Israde Alcántara y L. García (2001), "Significado ecológico de los palinomorfos depositados en el lago de Cuitzeo, Michoacán, durante los últimos 35,000 años", *Ciencia Nicolaita* 29: 45-61

Zar, J.H. (1996), *Biostatistical Analysis*. Prentice May, New Jersey: 662 pp.

Capítulo 9

Conclusiones Generales

El levantamiento geomorfológico regional permitió diferenciar a la cuenca en 6 grandes unidades, las cuales definen que la unidad hidrológica esta conformada principalmente por colinas, lomeríos altos y planicie. Geológicamente el relieve esta conformado por materiales volcánicos de composición intermedia a básica del Mioceno al Plioceno. El nivel semidetallado del levantamiento permite concluir que la cuenca puede ser descrita en función de laderas suaves y muy suaves, laderas inclinadas y escarpadas, y la planicie. Estas unidades cubren el 65 % de la cuenca. El análisis geomorfométrico indica que el 90 % de la cuenca tiene pendientes menores a 20°, y se encuentra por debajo de los 2,500 msnm, y como consecuencia la densidad de drenaje es a lo sumo moderada.

En relación con la erosión en la cuenca y su modelamiento, los resultados permiten concluir que este proceso no esta generalizado; es decir; no representa una superficie considerable; y está muy bien localizado; contrariamente a lo especulado en años recientes (véase entre otros, Noriega, 1993). Las subcuencas más erosionadas están en los alrededores de la Cd. de Morelia (Arroyo Colorado, Atécuaro y San Lucas Pío); y en dos Municipios (Huiramba y Morelia). Sin embargo, las características físicas de la cuenca, aunadas a las prácticas de manejo podrían incrementar de manera considerable la superficie erosionada (650 veces más); especialmente si se considera que el numero de cabezas de ganado bovino se incrementó 53,627 cabezas y el caprino duplico su numero pasando de 14,955 a 32,065 cabezas en el periodo 1970-2000 (Acosta, 2002).

La regionalización geomorfológica sirvió de base para definir las unidades de la regionalización ecológica de la cuenca, las cuales son potencialmente unidades de manejo de recursos naturales (Bocco y Ortiz 1994; Bocco *et al* , 2001). Esta delimitación es fundamental en el proceso de evaluación de tierras y del posterior marco de ordenamiento territorial elaborado recientemente (Pulido *et al* ., 2001; Ortega, 2001). Este tipo de información permite concentrar los esfuerzos en restauración de suelos, en aquellas áreas donde este problema es realmente importante. Además, la caracterización geomorfológica de la cuenca es una parte imprescindible en la estimación del balance hídrico espacialmente distribuido e este tipo de áreas que no cuentan con suficientes aforos.

En relación con las estaciones meteorológicas, el análisis permite concluir que la cuenca se encuentra bien monitoreada con respecto a los parámetros de precipitación y temperatura, para usos agrícolas y mal para usos forestales y de vida silvestre. La distribución actual de las estaciones responde a criterios agroclimáticos y no de manejo de recursos naturales.

El procedimiento estadístico efectuado permite concluir que la precipitación media anual es de 841.98 mm, con una variación dentro de la zona de estudio (Dest. est. = 190.41, CV = 22.6), mientras que la temperatura presenta menos variaciones alrededor de la media anual (17.3) (Dest. Est. 1.4, CV = 8). El análisis de varianza permitió definir 15 grupos de precipitación y veintidós grupos de temperatura.

La distribución espacial de los grupos agregados muestra claramente un gradiente térmico y de humedad. La precipitación se incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura, asciende desde el sur hacia el norte. La distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado secos a climas templado húmedo.

El análisis series de tiempo de datos de precipitación de la estación Cuitzeo muestra evidencias de ciclos recurrentes con una duración aproximada de 20 años. El primer ciclo es seco, este empieza en 1934 y termina en 1957, con una duración de 23 años. El segundo corresponde a un ciclo húmedo con una duración de 21 años, los cuales inician en 1957 y culminan en 1978, el último ciclo es seco y tiene una duración de 20, que inició en 1978 y termina en el año 2000 (año en que termina la serie de datos).

Los resultados obtenidos sobre la comparación de la estimación del escurrimiento a partir de dos métodos útiles en la planeación de recursos en cuencas hidrológicas, indican que ambos métodos sobreestiman el escurrimiento a nivel de pequeñas subcuencas. La sobrestimación es resultado de la composición geológica de la zona y de la variabilidad de coberturas vegetales y del uso del suelo.

Sin embargo, la sobrestimación de la escorrentía se encuentra dentro de los rangos de error encontrados modelamientos hidrológicos espacialmente distribuidos para grandes áreas geográficas. Este tipo de enfoques basados en las características físicas de la cuenca (roca, suelos, relieve, cobertura vegetal) son útiles en la elaboración de planes de manejo, especialmente en países subdesarrollados, donde la red de aforos hidrométricos es escasa o nula. Sin embargo, una tarea de investigación que se desprende de este trabajo es buscar coeficientes de corrección para ajustar las estimaciones de escorrentía en ambientes volcánicos recientes y con una variada cobertura vegetal, lo cual permitirá construir modelos más eficientes bajo estas condiciones.

En este trabajo 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 (piedemontes), presentaron un incremento en los valores de escorrentía, lo cual se explica por el incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos y agricultura, que se asocian principalmente a esas formas de relieve.

Para ambos años existe una fuerte presión sobre el recurso hídrico en las zonas bajas de la cuenca. Aunque las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca se encuentran al menos igual que hace 25 años, es indiscutible que el lago de Cuitzeo presenta altos grados de deterioro por contaminación y falta de agua, la cual no drena directamente al vaso del lago, por el uso inadecuado del agua en las zonas de riego y como consecuencia de un mayor uso en las ciudades, debido al incremento poblacional (Soto-Galera *et al.*, 1999; Acosta, 2002), especialmente, el área urbana de la Ciudad de Morelia, capital del estado, la cual se sextuplicó en 37 años (López, *et al.*, 2001).

El análisis de la variación y distribución superficial de bordos indica que su número y su superficie se incrementaron en 26 % y se duplicó el número de estructuras de retención de agua, aunque en su mayoría estas fueron menores a 3 ha. El incremento de bordos, en este caso, no responde a una intensificación de las actividades agrícolas sino más bien de las actividades pecuarias en la cuenca, lo cual explica el aumento en las cabezas de ganado.

En consecuencia la disminución de la superficie del vaso del lago de Cuitzeo no está ligada a la degradación de laderas producto de deforestación, sino es resultado de una disminución del agua en los cauces por el crecimiento poblacional, que conlleva un incremento en el consumo de agua, un uso inadecuado en las actividades agrícolas; y a un incremento de la cobertura acuática y subacuática que prácticamente ha cerrado la comunicación entre el vaso este y central del lago de Cuitzeo.

El modelamiento en dos años permitió reconocer que el cambio temporal de la distribución y cantidad de agua en laderas; cabe reconocer que el modelo espacialmente distribuido utilizado no evalúa directamente el balance hídrico en el cuerpo de agua del lago de Cuitzeo.

En este estudio, al igual que en el Himalaya (Sharma *et al.*, 2000), los resultados están basados en pocos datos hidrometeorológicos lo que dificulta la calibración y validación de modelos. Esto sugiere que cuando se evalúa el efecto del CCVUS en grande áreas pobremente aforadas, con la aplicación de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, solo es posible obtener en el mejor de los casos una estimación de las tendencias entre la condición hidrológica de antes y después del CCVUS. La magnitud *per se* de los valores de magnitud pierde relevancia.

El análisis de largo plazo (1974-2000) indica que las superficies del vaso del lago de Cuitzeo varían con el tiempo. El cambio se asocia al comportamiento de la precipitación y a la temperatura media mensual del año anterior. Los resultados de este trabajo sugieren que el tamaño del lago es sensible a las condiciones climáticas del año anterior, y en consecuencia, los modelos de correlación construidos a partir de la series de largo plazo presentan posibilidades para pronosticar la superficie del lago de Cuitzeo a partir de los datos de precipitación y temperatura media mensual del año anterior, con lo cual es posible predecir el incremento y reducción en los niveles del lago, así como la frecuencia de aparición de tolvaneras.

Los cambios monitoreados en el corto plazo (1997-2001) indican que la superficie del lago de Cuitzeo, presenta una tendencia a la reducción de su cuerpo de agua. Las observaciones de campo desde 1999 muestran una desecación anual recurrente, especialmente en la sección oeste del lago. Este comportamiento es coherente con la reducción de las precipitaciones y ascenso de las temperaturas, así como los valores de índice de sequía de Palmer, calculados para los últimos años del siglo pasado.

Los resultados del análisis de la dinámica de corto (25 años) y largo plazo (último siglo) sugieren fuertemente que no es conveniente la construcción de obras de ingeniería en el vaso actualmente seco del lago, pues ellas estarían en zona de alta riesgo de inundación con un periodo de retorno menor a veinte años.

El análisis de tendencia de largo plazo indica que no existen cambios significativos en la precipitación y en el índice de sequía de Palmer, ni un aumento significativo de la temperatura. Sin embargo, la reducción del lago en los últimos diez años es resultado de un incremento en el uso de agua urbano y rural de la cuenca (ver Acosta, 2002). Los procesos de urbanización, ganaderización, así como la actividad agrícola, desencadenan o incrementan las tasas de procesos de contaminación y extracción de agua superficial y subterránea (Tóth 2000; Carrillo *et al.*, 1997). Los cambios en estos procesos están modificando los volúmenes de almacenamiento de agua en los distintos componentes del ciclo hidrológico. Por ejemplo, la desecación recurrente del lago de Cuitzeo es uno de los efectos de 1) la mayor extracción de agua de las aguas subterráneas, 2) la reducción en las precipitaciones medias anuales e incremento en temperaturas medias anuales en la cuenca.

El uso y contaminación del agua por la actividad agrícola y la emisión de desechos, especialmente desde el principal centro urbano de la cuenca, la ciudad de Morelia, apuntó a la necesidad de determinar los patrones temporales y espaciales de la ocurrencia de elementos contaminantes en los sedimentos del lago de Cuitzeo, investigación que actualmente se lleva a cabo en el Instituto de Geografía de la UNAM (Cram, 2002).

Es importante aclarar que el lago de Cuitzeo es un sistema Miocénico que contiene registros geológicos que lo caracterizan como somero, y que ocasionalmente ha presentado eventos de desecación total (Israde-Alcántara, 1995; Velázquez Durán, 1998; Velázquez Durán, *et al.*, 2001). El estudio polínico realizado en la cuenca de Cuitzeo por Velázquez Durán (1998), registra la vegetación existente en el lago para los últimos 35,000 a.p., lo que pone en evidencia diferentes fluctuaciones climáticas en la cuenca y el lago de Cuitzeo. El lago de Cuitzeo durante los últimos 35,000 años a.p. ha presentado periodos de bajo nivel de agua, y con un período de aguas más diluidas, e incremento en el espejo de agua, presentándose un lago muy fluctuante a lo largo del tiempo (Velázquez Durán 1998). Las fluctuaciones en el lago representan cambios en el clima, principalmente en la precipitación y la temperatura.

A la luz de lo anteriormente mencionado, la falta de significancia estadística en relación a las tendencias de incremento del índice de sequía y de la temperatura, así como de reducción en la precipitación puede apoyar la interpretación de que el comportamiento de las variables climáticas analizadas y de la superficie del lago es similar al de muy largo plazo (historia geológica reciente), y que actualmente estamos en un periodo que presenta un muy bajo nivel del lago. El análisis de series de tiempo indica que la precipitación, la temperatura y el índice de sequía de Palmer tienen un comportamiento estacional. La serie de precipitación muestra tres periodos relativamente secos: a) 1940 a 1960, b) 1980 a 1990 y c) 1995 a 2000; además de tres ciclos de duración aproximada de 20 años: 1) 1934-1957, 2) 1957-1978 y 3) 1978-2000. Estos periodos y ciclos se asocian con la reducción de la superficie del lago a lo largo del tiempo.

Asimismo, estos resultados sugieren que los cambios en el lago no son producto de tendencias regionales ocasionadas por patrones del cambio climático global causado por las actividades humanas; es decir, el lago desde el Mioceno Tardío ha sido somero o muy somero, y sólo se registran un par de periodos con importante transgresión lacustre. Sin embargo, las actividades humanas en la cuenca si han estado afectando los niveles lacustres, por el incremento en la

extracción y uso de aguas superficiales y subterráneas para en áreas urbanas y agrícolas (Mendoza *et al.*, 2001; Israde-Alcántara *et al.*, 2002).

REFERENCIAS

Acosta Villegas, A. (2001). *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Biología, UMSNH.

Arnell, N.W. (1999), "A simple water balance model for simulation of streamflow over a large geographic domain". *Journal of Hydrology*, **217**: 314-335.

Bocco; G. y M.A. Ortiz P. (1994), "Definición de unidades espaciales para el ordenamiento ecológico", *Jaina*, **5 (1)**:8-9.

Bocco; G., M.E. Mendoza y A. Velázquez (2001), "Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - A tool for land use planning in developing countries", *Geomorphology*, **39**: 211-219.

Bradbury, J.P. (2000), "Limnologic history of lake of Patzcuaro, Michoacán, México, for the past 48,000 years: impacts of climate and man", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, **148**: 117-131.

Carrillo-Rivera, J.J., A. Cardona, y R. Margain (1997), "Groundwater flow and environmental impact in Mexico", *Geografía y Desarrollo*, **(15)**: 17-26.

Cram, S. (2002), *Tendencias temporales y espaciales de la contaminación en el lago de Cuitzeo*, Anteproyecto presentado al CIDEM, Michoacán, México

Istrade-Alcántara, I. (1995), *Bacini lacustrini del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evolucionesedimentaria basata sulle diatomee*. PhD Thesis, Università Degli Studi di Milano: 254 pp.

Istrade-Alcántara, I., V.H. Garduño y R. Ortega-Murillo (2002), "Paleoambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuitzeo", *Hidrobiológica*, **12 (1)**: 61-78.

López, E., G. Bocco, M.E. Mendoza y E. Duahu (2001), "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city, Mexico", *Landscape and urban planning*, **55 (4)**: 271 - 285.

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: 266 pp.

extracción y uso de aguas superficiales y subterráneas para en áreas urbanas y agrícolas (Mendoza *et al.*, 2001; Israde-Alcántara *et al.*, 2002).

REFERENCIAS

- Acosta Villegas, A. (2001). *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Biología, UMSNH.
- Arnell, N.W. (1999), "A simple water balance model for simulation of streamflow over a large geographic domain". *Journal of Hydrology*, **217**: 314-335.
- Bocco; G. y M.A. Ortiz P. (1994), "Definición de unidades espaciales para el ordenamiento ecológico", *Jaina*, **5 (1)**:8-9.
- Bocco; G., M.E. Mendoza y A. Velázquez (2001), "Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - A tool for land use planning in developing countries", *Geomorphology*, **39**: 211-219.
- Bradbury, J.P. (2000), "Limnologic history of lake of Patzcuaro, Michoacán, México, for the past 48,000 years: impacts of climate and man", *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, **148**: 117-131.
- Carrillo-Rivera, J.J., A. Cardona, y R. Margain (1997), "Groundwater flow and environmental impact in Mexico", *Geografía y Desarrollo*, **(15)**: 17-26.
- Cram, S. (2002), *Tendencias temporales y espaciales de la contaminación en el lago de Cuitzeo*, Anteproyecto presentado al CIDEM, Michoacán, México
- Istrade-Alcántara, I. (1995), *Bacini lacustrini del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evolucionesedimentaria basata sulle diatomee*. PhD Thesis, Università Degli Studi di Milano: 254 pp.
- Istrade-Alcántara, I., V.H. Garduño y R. Ortega-Murillo (2002), "Paleoambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuitzeo", *Hidrobiológica*, **12 (1)**: 61-78.
- López, E., G. Bocco, M.E. Mendoza y E. Duahu (2001), "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city, Mexico", *Landscape and urban planning*, **55 (4)**: 271 - 285.
- 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: 266 pp.

Metcalf, S.E. (1997), "Paleolimnological records of climate change in Mexico – Frustrating past, promising future?", *Quaternary Internacional* (43-44): 111-116

Metcalf, S.E., F.A. Street-Perrot, S.L. O'Hara, P.E. Hales, R.A. Perrot (1994), "The paleolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier of Mesoamerica", In: Mallington A.C. y K. Pye (editores). *Environmental Change in Drylands: Biogeographical and Geomorphological Perspectives*. John Wiley and Sons. Chichester.

Noriega, A.G. (1993), *Degradación ecológica de los suelos del Estado de Michoacán*. UACH. Inédito.

Ortega, J.M. (2001), "Esquema de ordenamiento territorio", En: Mendoza, M., E. López-Granados 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: 266 pp.

Pulido, J., J. Pérez y S. Martínez (2001), "Evaluación de Tierras para fines agrícolas y forestales", En: Mendoza, M., E. López-Granados 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: 266 pp.

Sharma, K.V.P., C.J. Vorösmarty y B. Moore III (2000), "Sensitivity of the Himalayan hydrology to land use and climatic changes", *Climatic Change*, 47: 117-139

Soto-Galera, E. J. Paulo-Maya. E. López-López, J.A. Serna-Hernández y J. Lyons (1999), "Environmental Auditing: Change in Fish Fauna as Indication of Aquatic. Ecosystem Condition in Río Grande de Morelia–Lago de Cuitzeo Basin, Mexico". *Environmental Management*, (24) I: 133 – 140.

Ióth, J. (2000), "Las aguas subterráneas como agente geológico, causas procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero*, 111 (4): 9-26.

Velázquez Durán, R. (1998), *Palinología en relación a paleoambientes de los últimos 35,000 años en la cuenca del lago de Cuitzeo, Mich., México*. Tesis Profesional. Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México: 107 pp.

Velázquez Durán, R., I. Israde Alcántara y L. García (2001), "Significado ecológico de los palinomorfos depositados en el lago de Cuitzeo, Michoacán, durante los últimos 35,000 años", *Ciencia Nicolaita*, 29: 45-61

Wood, M.K. y W.H. Blackburn (1984), "An evaluation of hydrologic soil groups as used in the SCS runoff method on rangelands", *Water Resources Bulletin*, 20: 379-389.