

01059



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**INFLUENCIA ANTRÓPICA EN LA DISTRIBUCIÓN  
GEOGRÁFICA DE ESPECIES DE PECES NATIVOS  
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TEUCHITLÁN,  
JALISCO.**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA**

**PRESENTA**

**ITZIA CALIXTO ALBARRÁN**



**DIVISION DE  
ESTUDIOS DE POSGRADO**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. CONSTANTINO MACÍAS GARCIA**

**2005**

0350089



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.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo *recepional*.  
NOMBRE: Jairo Calixto Albarrán

FECHA: 09-11-2005

FIRMA: 

A la memoria de Alma P. Maciel Arriaga y Juan Manuel Albarrán García, por fomentar mis intereses y por toda la fuerza y amor que me transmitieron.

A la memoria de Alma Rosa Albarrán Maciel por todo lo que compartimos, especialmente su sentido del humor.

A la memoria de Ingrid Köster Urioste por su amistad y solidaridad, por enseñarme ha disfrutar la vida.

A la memoria de José Luis Osorno Cepeda por su amistad y por su apoyo en mi formación y desarrollo académico. Por Isla Isabel.

A Pedro Sunyer Martín por su cariño, por su paciencia, por estar ahí cuando uno lo necesita. Simplemente por ser como es.

A Jairo Calixto Lozano y Gloria Orquídea Albarrán Maciel por su gran amor, por su confianza, por la libertad que siempre me brindaron y por su apoyo durante toda mi vida, más no se puede pedir.

A Jairo Calixto Albarrán por su presencia, su tacto y gran ayuda a lo largo de estos años, que no son pocos.

A Selene Calixto Albarrán por todo lo que nos une y por todo lo que compartimos.

A Gervasi Andreú (?).

## **Agradecimientos**

En primer lugar quiero agradecerle al Dr. Constantino Macías García por dirigir este trabajo de tesis, por el apoyo que me brindó en todo momento, por su humor y su buena habilidad. Le agradezco su paciencia, la confianza y dedicación en las correcciones de este trabajo y, sobre todo la amistad y el cariño.

Expreso mi más amplio agradecimiento a los sinodales Dr. Constantino Macías García, Dr. Jean François Parrot, Dr. Raúl Aguirre Gómez, M. en C. Luis Miguel Morales Manila y M. en C. Víctor Manuel Luna, quienes aportaron valiosos comentarios y atinadas ideas durante las cuidadosas revisiones que realizaron. Gracias por el tiempo invertido.

Al Dr. Jean Francois Parrot además por sus ideas que fueron decisivas en la estructura y realización de la tesis. Muchas gracias por el apoyo que me brindó en todo momento y por involucrarse en este trabajo como si fuera suyo.

Al Dr. Raúl Aguirre por su cuidadosa revisión. Sus valiosos comentarios mejoraron la presentación de este trabajo.

Al M. en C. Luis Miguel Morales además de sus comentarios a este trabajo, le agradezco las enseñanzas sobre SIG's y la relación con el medio ambiente, gracias por colocarme en el interesante camino de la percepción remota y los sistemas de información geográfica.

Al M. en C. Víctor Manuel Luna por sus comentarios generales, así como su pronta revisión.

Quiero agradecerles especialmente a mis amigos por su cariño, por su valiosa ayuda, por nuestra amistad, porque de una manera u otra han estado ahí siempre: Le, Pablo, Silvia, Manolo, Quique, Anna, Rox, Jorge, Tino, Lupita, Patiño,

A mis amigos del Laboratorio de Conducta Animal por su ayuda, interés y entusiasmo: Larisa, Miguel, Claudia, Emma, Chelén, Alex, Checo, César, Omar, Edgar, Ileri, Irene, y a Pablo por las extensas pláticas mientras trabajamos con Biótica.

A mis compañeros de la maestría: Sandra, Juan Carlos, Daniel, Emilio, Víctor, Jesús, por su ayuda en general.

Finalmente, quiero agradecerle a mi familia por su infinita paciencia, confianza, apoyo y gran amor. A Jairo, Gloria, Jairo y Selene por todo lo que compartimos.

A Pedro por su presencia, por su energía, por su solidaridad, por su cariño, por estar ahí.

A Juan, Azucena, Elba y Rico por ser como son. A Estrellita por estos largos años de ser cómplices.

A Piolo, Mary y Zoe por estar ahí.

A Valentín, Norma, Martín, Niza, Yuriria, Canek, Alma, Giselle, Yuriév, Maritza, Chicali, Cuvi, por ser familia.

---

---

# ÍNDICE

<b>I. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Cambio en la distribución geográfica.....	2
1.2. Extinción.....	2
1.2.1. Extinción de especies.....	3
1.2.2. Extinción de ecosistemas dulceacuícolas.....	4
1.3. Biodiversidad.....	7
1.4. Peces dulceacuícolas.....	8
<b>II. Objetivos.....</b>	<b>14</b>
2.1. Objetivos.....	14
2.1.1. Objetivo General.....	14
2.1.2. Objetivos Particulares.....	14
<b>III. Métodos.....</b>	<b>15</b>
3.1. Métodos.....	17
3.1.1. Primera Etapa.....	17
3.1.2. Segunda Etapa.....	18
3.1.2.1. Modelo Digital del Terreno (MDT).....	19
3.1.2.2. Hipsometría.....	20
3.1.2.3. Pendientes (orientación y ángulo).....	21
3.1.2.4. Red fluvial.....	22
3.1.2.5. Mapas temáticos.....	24
3.1.2.6. Imagen de satélite.....	24
3.1.2.7. Análisis diacrónico de la cuenca.....	28
3.1.2.7.1. Reconstrucción del fondo de la Presa de La Vega.....	29
3.1.2.7.2. Material erosionado.....	30
3.1.2.7.3. Relleno de la presa.....	32
3.1.2.8. Índices de Biodiversidad.....	32

---

---

<b>IV. Subcuenca del Río Teuchitlán.....</b>	<b>36</b>
4.1. Relieve.....	36
4.2. Clima.....	41
4.3. Hidrografía.....	49
4.3.1. Patrón de drenaje.....	51
4.3.2. Clasificación de órdenes de corrientes.....	51
4.4. Geología.....	53
4.5. Edafología.....	55
4.6. Uso de suelo.....	57
<b>V. Resultados.....</b>	<b>61</b>
5.1. Factores involucrados en el análisis de la subcuenca.....	61
5.1.1. Análisis de la superficie.....	61
5.1.2. Disección del relieve.....	63
5.1.3. Repartición espacial de los suelos.....	63
5.1.4. Cambio de la densidad de vegetación.....	67
5.1.5. Relación de la densidad de vegetación, suelo y pendiente.....	71
5.2. Integración de los factores involucrados en el análisis de la subcuenca	72
5.3. Evaluación de estatus histórico de la subfamilia <i>Goodeinae</i> .....	73
<b>VI. Discusión.....</b>	<b>77</b>
<b>VII. Literatura Citada.....</b>	<b>80</b>
<b>VIII. Anexos.....</b>	<b>86</b>
Anexo I. Definición de "diversidad biológica y "biodiversidad".....	86
Anexo II. Conceptos generales sobre PR y SIG.....	87
Anexo III. Programas utilizados.....	96
Anexo IV. Clasificación compilado de configuraciones de drenaje.....	97

---

## LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

### I. Tablas

Tabla 1. Principales actividades humanas que afectan a los sistemas fluviales.....	5
Tabla 2. Principales factores antropogénicos que generan cambios en las aguas superficiales.....	6
Tabla 3. Peces dulceacuícolas extintos o desaparecidos en México 1600 - 1996.....	9
Tabla 4. Especies endémicas en las cuencas de la Mesa Central de México.....	10
Tabla 5. Goodeidos encontradas en las cuencas dentro de su área de distribución.....	11
Tabla 6. Clasificación de unidades de uso de suelo.....	25
Tabla 7. Tasas de erosión.....	28
Tabla 8. Superficie de los pisos altimétricos (Km <sup>2</sup> ) de la subcuenca del río Teuchitlán.....	39
Tabla 9. Estaciones meteorológicas de la subcuenca del río Teuchitlán.....	43
Tabla 10. Temperatura media mensual y meda anual en °C y precipitación mensual y media anual en mm.....	44
Tabla 11. Distribución de corrientes por número de orden.....	51
Tabla 12. Extensión de las formaciones vegetales.....	59
Tabla 13. Densidad de disección en 2D y 3D de la red fluvial de la subcuenca del río Teuchitlán.....	63
Tabla 14. Tipos de suelo con diferentes pendientes en la subcuenca del río Teuchitlán.....	66
Tabla 15. Superficies de NDVI en 1973 y 2000 en la subcuenca del río Teuchitlán.....	69
Tabla 19. Medidas taxonómicas distintivas de la subfamilia Goodeinae.....	75
Tabla 20. Ensamblaje de especies introducidas de la subcuenca del río Teuchitlán, 1955 -2001.....	76
Tabla 21. Bandas espectrales más frecuentemente utilizadas en la Percepción Remota.....	88
Tabla 22. Características de algunos de los satélites más conocidos y sus sensores.....	92

### II. Gráficas

Gráfica 1. Porcentaje de píxeles que corresponden a densidad de vegetación.....	27
Gráfica 2. Histograma de frecuencias altimétricas.....	41
Gráfica 3. Orientación de las laderas en la subcuenca del río Teuchitlán.....	41
Gráfica 4. Temperatura media mensual en °C y precipitación media mensual.....	47
Gráfica 5. Distribución de corrientes en función del orden en la subcuenca del río Teuchitlán.....	53
Gráfica 6. Distribución de pendientes en la subcuenca.....	61
Gráfica 7. Tipos de suelo en la subcuenca del río Teuchitlán.....	66
Gráfica 8. Tipos de suelo en diferentes pendientes de la subcuenca del río Teuchitlán.....	67
Gráfica 9. Porcentaje de feozem y regosol sin cobertura vegetal en diferentes pendientes.....	71
Gráfica 10. Volumen erosionado de acuerdo a las diferentes tasas de erosión y condiciones de pérdida.....	72
Gráfica 11. Cambio de la profundidad máxima del agua de acuerdo al volumen erosionado producido.....	73

### III. Figuras

Figura 1. Principales causas del cambio de ecosistemas en arroyos y ríos.....	6
Figura 2. Diagrama de flujo para la elaboración del MDT de la subcuenca del río Teuchitlán, Jalisco.....	19
Figura 3. MDT resultante sombreado.....	20
Figura 4. Imagen hipsométrica.....	20
Figura 5. Imagen de pendientes de la subcuenca de estudio.....	21
Figura 6. Imagen de orientación de las pendientes.....	22
Figura 7. Imagen de la red fluvial y la presa de La Vega.....	22
Figura 8. Imagen del NDVI.....	26
Figura 9. Imágenes binarizadas del NDVI.....	26

Figura 10. Imagen de la densidad de vegetación.....	27
Figura 11. Reconstrucción del fondo de la presa.....	29
Figura 12. Erosión anual de la subcuenca del río Teuchitlán.....	30
Figura 13. Cálculo tridimensional de la superficie del píxel.....	31
Figura 14. Árbol taxonómico que ilustra la posible clasificación de siete especies en tres taxa superiores.....	33
Figura 15. Profundidad de la presa.....	73
Figura 16. Índices de biodiversidad de los Goodeidos antes y después de 1970.....	76
Figura 17. Espectro electromagnético.....	87
Figura 18. Ventanas atmosféricas.....	89
Figura 19. Firmas espectrales.....	89
Figura 20. Imagen de satélite.....	93

#### IV. Mapas

Mapa 1. Distribución de la subfamilia Goodeinae en las cuencas hidrográficas.....	12
Mapa 2. Localización de la subcuenca del río Teuchitlán.....	37
Mapa 3. Relieve de la subcuenca del río Teuchitlán.....	38
Mapa 4. Altimetría de la subcuenca del río Teuchitlán.....	40
Mapa 5. Orientación de las pendientes de la subcuenca del río Teuchitlán.....	42
Mapa 6. Clima de la subcuenca del río Teuchitlán.....	45
Mapa 7. Hidrografía de la subcuenca del río Teuchitlán.....	50
Mapa 8. Clasificación de órdenes de corriente de la subcuenca del río Teuchitlán.....	52
Mapa 9. Geología de la subcuenca del río Teuchitlán.....	54
Mapa 10. Edafología de la subcuenca del río Teuchitlán.....	56
Mapa 11. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca del río Teuchitlán.....	60
Mapa 12. Pendientes en grados de la subcuenca del río Teuchitlán.....	62
Mapa 13. Densidad de disección en 2D de la red fluvial de la subcuenca del río Teuchitlán.....	64
Mapa 14. Densidad de disección en 3D de la red fluvial de la subcuenca del río Teuchitlán.....	65
Mapa 15. Densidad de vegetación aplicando el NDVI de 1973 en la subcuenca del río Teuchitlán.....	68
Mapa 16. Densidad de vegetación aplicando el NDVI de 2000 en la subcuenca del río Teuchitlán.....	70
Mapa 17. Distribución de la subfamilia Goodeinae en la subcuenca del río Teuchitlán.....	74



# I. INTRODUCCIÓN

En México confluyen dos grandes regiones biogeográficas, la Neotropical y la Neártica. A esta condición se suman una compleja historia geológica, una accidentada topografía y un acusado gradiente altitudinal, situación que propicia una variedad de ecosistemas y una gran diversidad biológica (Flores y Gerez, 1994). Con base en el conocimiento de algunos grupos de organismos como plantas, aves, mamíferos y reptiles, se estima que en su territorio se concentra entre el 10 y el 15 por ciento de todas las especies terrestres; por esto se considera a México como uno de los cinco países que poseen mayor biodiversidad del mundo (megadiversos), lo que significa que es un territorio privilegiado en cuanto a los tipos de ecosistemas, el número y la variación genética de las especies que tiene. Además de esta riqueza, el país cuenta con importantes endemismos, es decir, se caracteriza por la existencia de muchas especies distribuidas exclusivamente dentro de sus límites administrativos (Mittermeier y Goettsch, 1992; Conabio, 1998).

El avance de la agricultura y ganadería, las formas irracionales de explotación agropecuaria y forestal, la introducción de especies exóticas, el tráfico ilegal, la expansión de la mancha urbana, la contaminación del suelo, aire y agua y las prácticas cinegéticas, son los principales factores que ponen en peligro la sobrevivencia de muchas especies silvestres y, por lo tanto, afectan a la biodiversidad.

Los procesos de degradación ambiental como consecuencia de la actividad humana se reflejan en el estado y las tendencias de las comunidades biológicas. Para el caso de los cuerpos de agua epicontinentales, las comunidades de peces dulceacuicolas son efectivos indicadores biológicos de esos procesos de degradación debido a que desempeñan una amplia variedad de funciones ecológicas dentro de los ecosistemas.

La fauna de peces dulceacuicolas es excepcionalmente rica en México, ya que tiene 506 especies de las cuales 163 son endémicas (Espinosa, 1993; Flores y Gerez, 1994) y 185 se encuentran en peligro de extinción (Miller *et al.*, 1989; UICN, 1996). En el Altiplano Mexicano destaca la presencia de un grupo autóctono, la subfamilia Goodeinae, con cerca de 37 especies (Webb *et al.* 2004), todas endémicas (Miller y Fitzsimons, 1971; Miller *et al.*, 1989; Webb y Miller, 1998). De las cuales una parte está extinta, otras están amenazadas y en peligro de extinción (De la Vega Salazar *et al.*, 2003).

La mayoría de las especies de goodeidos enfrentan algún riesgo de extinción y reducción de sus poblaciones. Es por esto, que en este trabajo se pretende revisar si el cambio en la cobertura forestal, la deforestación y la erosión son algunas de las causas antrópicas que promueven el declive y extinción local en Goodeidos y determinar si se pueden revertir esos factores para reintroducir las especies a su hábitat natural.

## 1.1. Cambio en la distribución geográfica

Se sabe relativamente poco acerca de los factores que intervienen en la disminución del tamaño poblacional y en la extinción de especies, así como del cambio en su distribución geográfica (reducción de los rangos de distribución, Simberloff, 1986). Sin embargo, para desarrollar estrategias efectivas de conservación, es necesario comprender cómo y porqué de esta contracción de los rangos geográficos.

Hay dos conceptos cruciales y que fundamentan dos paradigmas para entender la biología de la extinción, el de "pequeñas poblaciones" y el de "declinación de especies". El primero considera los factores genéticos y demográficos (aleatoriedad demográfica y ambiental, deriva génica y endogamia) los cuales aceleran la disminución de los tamaños poblacionales efectivos e influyen en el riesgo de extinción de este tipo de poblaciones. El segundo considera los mismos factores pero antes de que sus poblaciones se conviertan en raras debido a la degradación del hábitat, sobreexplotación e introducción de especies (Channell y Lomolino, 2000).

Hendrick *et al.* (1996) sugirieron que ambos procesos contribuyen a la extinción, pues los factores que intervienen en la reducción del rango de las especies son diferentes cuando actúan sobre las últimas poblaciones. Es decir, es improbable que las especies pudieran llegar a la extinción sin antes presentar una reducción prolongada de su distribución y de su número (esto es, sin antes experimentar un número de extinciones locales), con excepción, claro está, de las extinciones debidas a eventos catastróficos.

Es evidente que quedan muchas preguntas por contestar; sin embargo si se identifican los factores de extinción y la manera cómo están interactuando en las poblaciones, será posible entender cómo cambian los rangos de distribución geográfica y el por qué de la declinación de éstas, así como para comenzar a realizar esfuerzos de conservación de la biodiversidad antes de que desaparezcan las especies que se encuentren críticamente en peligro o en vías de extinción.

## 1.2. Extinción

La mayoría de las extinciones han ocurrido en períodos de tiempo geológicamente cortos. Sin embargo, Ehrlich y Ehrlich (1984) estimaron que los niveles actuales de extinción son 40 veces más altos que el de las extinciones naturales. Los análisis de estas tasas de extinción sugieren que en diversas partes del mundo se están perdiendo organismos por causa de la contaminación, modificación del hábitat natural y degradación ambiental debida en gran medida a la sobrepoblación humana (Sisk *et al.*, 1994).

Las especies se encuentran posiblemente en una crisis, por ello aunque la extinción se haya manifestado como un proceso natural a lo largo de la historia de la vida en la Tierra, no se debe subestimar la actual tasa de desaparición o el cambio en la distribución geográfica que enfrentan estas especies a causa de las actividades productivas del hombre.

### ➤ 1.2.1. Extinción de especies

La extinción de especies es un proceso natural presente cuando las poblaciones no pueden persistir ante el cambio ambiental y exceden la capacidad de adaptación de los individuos de una población y cuando éstos no están en un lugar seguro o esté restringido. El cambio puede ser físico (clima inusual, contaminación, erosión del suelo, destrucción del hábitat) o biológico (adición o eliminación de competidores, depredadores, parásitos, presas o simbioses). Cualquier factor que pueda causar la mortalidad de los individuos potencialmente llevará a la extinción local o global de una población (Vermeij, 1986, 1988). Las especies se consideran extintas cuando todos los individuos mueren sin producir progenie. La extinción natural, a menos que sea catastrófica, no reduce la diversidad biológica. Las extinciones naturales son eventos poco frecuentes a la escala de tiempo actual (Flessa y Jablonsi, 1983; Soulé, 1985; WCMC, 1992; Meffe y Carroll, 1997).

Al parecer son dos los procesos que afectan la dinámica de las poblaciones y son los mecanismos fundamentales de la extinción de especies: los procesos determinísticos y los estocásticos. Cuando interactúan estos procesos aumenta la probabilidad de extinción de las poblaciones.

Los procesos determinísticos son aquellos que tienen una relación causa efecto. La mayor causa de las extinciones de este tipo ha sido atribuida a las actividades humanas (Soulé, 1985; Moyle y Williams, 1990; Angermeier, 1995). Factores como la sobreexplotación, la destrucción de hábitat por diversas actividades productivas, los efectos negativos de las interacciones con especies introducidas, la influencia de compuestos químicos utilizados en la fertilización de suelos, la fumigación de cultivos y construcción de grandes obras de ingeniería, han sido implicados en el declive de las poblaciones naturales (Ehrlich y Ehrlich, 1992; WCMC, 1992; Thomas, 1994).

Los procesos estocásticos son aquellos cambios cuya ocurrencia es azarosa, y pueden actuar independientemente o influir en los procesos determinísticos. Se distinguen cuatro tipos de procesos: la incertidumbre demográfica, la ambiental, la genética y la provocada por catástrofes naturales.

La *incertidumbre demográfica* resulta de eventos al azar en la supervivencia y reproducción de la especie; es sólo peligrosa para poblaciones pequeñas y afecta la oportunidad de los eventos de mortalidad y natalidad. La *incertidumbre ambiental* afecta la tasa promedio de natalidad y mortalidad en cada generación, debido a cambios en el clima, en el suministro de alimento, la aparición de enfermedades y competidores de las poblaciones, y depredadores o parásitos. Las *catástrofes ambientales* como las inundaciones, incendios y sequías, pueden ocasionar extinción a pesar de que el tamaño inicial de la población no sea pequeño. La *incertidumbre genética* es cuando la poza génica de muchas especies ha sido reducida a través de la eliminación de la mayoría de sus poblaciones, perdiendo la capacidad de adaptarse a nuevas enfermedades y a otros riesgos ambientales, provocando así extinción (Meffe y Carroll, 1997).

Existen por lo menos tres circunstancias biológicas que llevan a la extinción. La primera es que formas de vida inicialmente raras son más susceptibles a volverse extintas que aquellas inicialmente abundantes (Terborgh y Winter, 1980). Cuando una especie es rara, la tasa de crecimiento de la población es inestable respecto a los factores que puedan contribuir a una pérdida posterior, entonces es probable que éstas se extingan (Humphrey, 1985, Soulé, 1986; Thomas, 1990).

Un segundo factor de la extinción es la disponibilidad de hábitat; cuando el área disponible se reduce, incrementa el porcentaje de especies extintas (Wilcox, 1980), ya que no sólo se trata de la relación área-extinción, sino también la naturaleza del área que se pierde, pues las especies tienen diferentes requerimientos de hábitat. Simberloff (1974) y Soulé (1985) plantearon la existencia de un tamaño mínimo de la población por debajo de la cual sobreviene la extinción, que a menudo está relacionado a un área mínima, por lo que una superficie del hábitat reducida y un incremento en el aislamiento (insularización) son determinantes para provocar la extinción. Si además, las relaciones interespecíficas son consecuencia de una dinámica de metapoblación, una reducción en el tamaño del hábitat que aumente el aislamiento de los parches remanentes puede tener un efecto negativo mayor en el tamaño de la población que la reducción equivalente en el área de un hábitat continuo.

El tercer factor involucrado en la extinción es la depresión endogámica, consecuencia de la pérdida de la diversidad genética. Por ejemplo, se sabe que juveniles endogámicos tienen mayor tasa de mortalidad que juveniles exogámicos (Ralls *et al.*, 1979 en Humphrey, 1985), y la endogamia puede causar la pérdida de capacidad de adaptación de poblaciones pequeñas (Humphrey, 1985).

En el caso específico de los peces de agua dulce, éstos han sido más afectados por factores humanos que por factores naturales. La mayoría de las extinciones documentadas recientemente, están relacionados a la pérdida o modificación del hábitat, introducción de especies, contaminación y sobreexplotación (Miller *et al.*, 1989; Frissel, 1993; Angermeier, 1995). Muchas especies de peces están en fase de extinción, debido a su ubicación dentro de un "hábitat específico" (Cadieux, 1991). Es por esto, que en este trabajo se pretende discernir algunas de las causas antrópicas que promueven el declive y extinción local en los peces nativos de la subfamilia Goodeidae.

### ➤ 1.2.2. Extinción de ecosistemas dulceacuícolas

Los ecosistemas dulceacuícolas (lagos, lagunas, pozas y ríos) son probablemente los sistemas más diversos: varían en forma, tamaño, composición del sustrato, dinámica de intercambio de agua, etc. En ellos intervienen muchos factores y procesos, la mayoría de ellos interrelacionados (Moss, 1992). En términos de su valor biológico, estos ecosistemas mantienen una rica y variada biota, contienen una alta diversidad de peces y otros vertebrados, y una gran diversidad de invertebrados, plantas y algas (Jonsson *et al.*, 2001). Por otro lado, juegan un papel económico, social y cultural importante (Newson,

1994; Singh, 1995). Por ejemplo, los sistemas fluviales proporcionan múltiples beneficios al hombre: abastecimiento de agua con fines domésticos, industriales y agrícolas, generación de electricidad, disposición de residuos, rutas de navegación y actividades recreativas. Sin embargo, dichas utilidades promueven el deterioro, ya que han actuado como atrayentes de los asentamientos humanos. De hecho, en la actualidad existen pocos ecosistemas que no estén afectados por las actividades humanas (Malmqvist y Rundle, 2002).

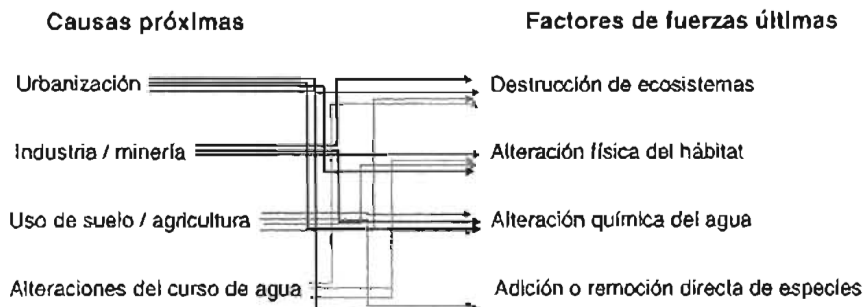
Las alteraciones en los cuerpos de agua pueden presentarse de muchas formas, como cambios en la calidad del agua, en el hábitat ripario, eutrofización y la introducción de nuevas especies (Brown, 2000), como lo demuestran los estudios sobre el impacto de la urbanización y el uso de suelo (Mason, 1991; Moss, 1992, Dixit *et al.*, 2000; Bradford e Irvine, 2000; Omoto *et al.*, 2000; Colombo *et al.*, 2000; Trombulak y Frissell, 2000; Jones *et al.*, 2000). Estos cambios en la calidad del agua y hábitat han estado acompañados por cambios en la fauna de peces, tanto en el declive como en la extinción de especies nativas que son dependientes de estos hábitats (Moyle y Nichols, 1973).

Son muchas las actividades humanas que alteran los componentes de estos ecosistemas (*Tabla 1*), ya que disminuyen su integridad, afectando la capacidad de los peces y otros organismos para sobrevivir (Morgan *et al.*, 1991; Boon, 1992; Domagalski *et al.*, 1997).

**Tabla 1. Principales actividades humanas que afectan a los sistemas fluviales.**

Actividad	Efecto	Consecuencia
<b>Actividades ribereñas</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cambios de uso de suelo</li> <li>▪ Deforestación</li> <li>▪ Drenajes</li> <li>▪ Infraestructura</li> <li>▪ Remoción de la vegetación de riberas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alteración del régimen hidrológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cambio en las aportaciones de sedimentos</li> <li>▪ Cambio en la distribución de aportaciones a lo largo del año</li> <li>▪ Cambio en la carga de sedimentos</li> <li>▪ Asolvamiento</li> <li>▪ Erosión</li> <li>▪ Disminución de la fauna asociada (aves)</li> <li>▪ Pérdida de hábitat</li> </ul>
<b>Actividades para infraestructura hidráulica</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Canalizaciones y dragados</li> <li>▪ Obras de defensas contra avenidas</li> <li>▪ Regulación de caudales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eliminación del hábitat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eliminación de la vegetación de ribera</li> <li>▪ Empobrecimiento de la fauna acuática</li> <li>▪ Pérdida de micro hábitat</li> </ul>
<b>Actividades rurales</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extracción de material</li> <li>• Pastoreo incontrolado</li> <li>• Agricultura</li> <li>▪ Actividades recreativas</li> <li>▪ Contaminación orgánica e inorgánicas</li> <li>▪ Contaminación térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Incorporación de elementos tóxicos (pesticidas, fertilizantes, metales pesados, elementos traza)</li> <li>▪ Perturbación de las interrelaciones entre el cauce y su llanura de inundación</li> <li>▪ Concentraciones de sólidos disueltos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eutrofización</li> <li>▪ Disminución de la fauna acuática</li> <li>▪ Pérdida de hábitat</li> <li>▪ Alteración de la calidad del agua</li> </ul>
<b>Actividades urbanas</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Urbanización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sobreexplotación de mantos acuíferos</li> <li>▪ Disposición de residuos sólidos</li> <li>▪ Descarga de la industria y minería</li> <li>▪ Efluentes de aguas residuales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cambios en la calidad del agua</li> <li>▪ Cambios en los hábitats acuáticos</li> <li>▪ Pérdida de hábitats</li> <li>▪ Concentraciones tóxicas en algunos organismos acuáticos</li> </ul>

Los factores que causan cambios en los ríos puede ser divididos en cuatro tipos principales: destrucción de ecosistemas, alteración física del hábitat, alteración química del agua, y adiciones o remociones de especies directas. Las relaciones entre causas e impactos son muy complejos (*Figura 1*), ya que los factores que causan alteraciones en los ríos pueden tener múltiples impactos (*Tabla 2*).



*Figura 1. Principales causas del cambio de ecosistemas en arroyos y ríos*

*Tabla 2. Principales factores antropogénicos que generan cambios en las aguas superficiales.*

Efecto en		Causas últimas	Alteración abiótica	Implicaciones bióticas
Destrucción del ecosistema	Hidrodinámica	Expansión urbana y agrícola, extracción de agua	Pérdida completa del ecosistema	Extinción de especies y poblaciones
		Represamiento, canalización, extracción del agua, deforestación, transferencia de agua	Pérdida de la periodicidad natural de flujo, riesgo de sequías separar los enlaces río arriba-río abajo.	Alteración de las condiciones del hábitat, reducción de la dispersión
Alteración física del hábitat	Sedimentación	Deforestación, desarrollo agrícola	Reducción del sustrato	Pérdida de especies
	Alteración del corredor ripario	Urbanización, canalización, agricultura	Alteración de la entrada materia orgánica/luz y hábitat marginal	Alteración de las dinámicas tróficas y condiciones del hábitat
	Acidificación	Emisión industrial (SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> ), emisiones (NO <sub>x</sub> )	Reducción del pH, incremento de AP	Efectos fisiológicos directos, efectos indirectos (cadena alimenticia)
	Adición de nutrientes	Agricultura/deforestación, industria, landfill/trabajos de aguas residuales, emisiones atmosféricas de NO <sub>x</sub> .	Incremento de N y P	Incremento producción primaria, florecimiento de algas
Alteración química del hábitat	Metales tóxicos	Minería, emisiones industriales gaseosas, landfill/trabajos de aguas residuales	Muchos metales traza (Cu, Hg, Zn, Al, Pb, Cd)	Efectos directos fisiológicos/tóxicos
	Toxinas organocloradas	Industria (emisiones atmosférica y agua), aguas residuales, incineración de residuos, agricultura	PCBs, pesticidas organoclorados (DDT, dieldrin)	Efectos tóxicos a través biomagnificación
	Contaminación orgánica	Urbanización, aguas residuales, agricultura	Reducción de O <sub>2</sub> , incremento de sólidos suspendidos	Pérdida de especies
	Desorganizado-res endocrinos	Industria, agricultura, incineración de residuos	Organoclorados (dioxinas, furanos, PCBs, pesticidas (DDT, dieldrin)	Interferencia con hormonas producidas naturalmente
Remoción y introducción de especies		Pesquerías, acuicultura/ acuario trade, pesca deportiva, horticultura /plantas riparias	Especies invasivas	Alteración de la entrada de energía y dinámica de ecosistemas, incremento y reducción de competencia

Por último, la restauración y conservación de los sistemas naturales se justifica en términos del mantenimiento de los sistemas que soportan vida, su valor práctico (control de la erosión, potencial terapéutico y genético para especies cultivadas), su importancia económica (minerales, turismo, etc.), de investigación científica, educación, valor estético, recreativo y consideraciones éticas.

### 1.3. Biodiversidad

El concepto de "biodiversidad" tiene una amplia variedad de acepciones en función del contexto, y se utiliza como un sinónimo de la "diversidad biológica". En general, se refiere a la variabilidad de la vida e incluye tanto a los ecosistemas terrestres y acuáticos, los complejos ecológicos de los que forman parte, como la diversidad entre las especies y dentro de cada especie (Harper y Hawkworth, 1995).

Se han publicado muchas definiciones en las que se puede observar la heterogeneidad del concepto de biodiversidad (*Anexo I*). Sin embargo, el origen del sentido actual de la biodiversidad se encuentra en las publicaciones que aparecieron en los años ochenta de Lovejoy (1980), de Norse y MacManus (1980) y de Norse y colaboradores en 1986.

Lovejoy (1980 a, b) no definió el término de biodiversidad, pero lo utilizó esencialmente en el sentido del número de especies presentes. Norse y MacManus (1980) lo emplearon para incluir dos conceptos relacionados: diversidad genética y diversidad ecológica. Estos autores equipararon diversidad ecológica con riqueza de especies, "el número de especies en una comunidad de organismos". Finalmente, en un trabajo posterior Norse *et al.* (1986) consideraron en su definición tres niveles de diversidad biológica; genético (dentro de las especies), especies (número de especies) y diversidad ecológica (comunidad). Por lo tanto, siguiendo a este último autor, podemos decir que la biodiversidad abarca tres niveles de expresión de variabilidad biológica: ecosistemas, especies y genes. En estos niveles se integra una amplia gama de fenómenos, de manera que la biodiversidad de un país es el reflejo de los diferentes tipos de ecosistemas, el número de especies, el cambio en la riqueza de especies de una región a otra, el número de endemismos, las subespecies y variedades o razas de una misma especie, entre otros (Neyra y Durand, 1998).

La conservación de la biodiversidad es compleja, requiere de datos históricos, nueva información y, el seguimiento y manejo de la vida silvestre. De forma paralela, es importante proporcionar mediciones de biodiversidad dentro del contexto de una estrategia general para la conservación (Humphries *et al.*, 1995). En este sentido, este trabajo pretende cuantificar algunas mediciones de biodiversidad (medidas taxonómicas distintivas y distinción taxonómica) para ver a lo largo del tiempo si se ha perdido biodiversidad de goodeidos por causas antrópicas.

En biología, las mediciones de la biodiversidad fueron generadas a finales de 1960 y principios de 1970, derivadas de información teórica, la cual combinó el número de especies y la uniformidad de las abundancias de las mismas (Magurran, 1988, 2004). Estas medidas de biodiversidad basadas en el número de especies presentes y en la uniformidad de éstas son útiles como medidas comparativas de biodiversidad, sobre todo cuando los métodos de muestreo, el tamaño de la muestra y los tipos de hábitat están controlados. No obstante, tienen desventajas en la evaluación de los cambios de

biodiversidad en escalas espaciales amplias y escalas temporales largas (Clarke y Warwick, 1998 a, b). Se han desarrollado medidas basadas en el grado de parentesco de especies, las cuales superan los problemas mencionados y pueden dividirse en dos categorías: las medidas taxonómicas distintivas (*taxonomic distinctiveness*) y de distinción taxonómica (*taxonomic distinctness*).

Las medidas taxonómicas distintivas se basan en la comparación de patrones de parentesco en muestras de campo de una comunidad, y monitorean cambios en estos patrones en espacio y tiempo. Éstas miden la distancia promedio de todos los pares de individuos o especies de la muestra trazados a través de un árbol taxonómico (o arreglo filogenético) o la variabilidad en estructura a través del mismo (Warwick y Clarke, 2001). Las especies que divergen cerca de la base de un árbol filogenético o taxonómico, tienen menos parientes cercanos en común y podrían preservar más historia evolutiva que aquellas que divergen más arriba y comparten más congéneres (Nee y May, 1997).

Las medidas de distinción taxonómica se definen en términos del promedio de distancia de todos los pares de individuos (o especies) en una muestra (Warwick y Clarke, 2001). Warwick y Clarke (1995) definieron dos índices de distinción taxonómica, los cuales consideran tanto la estructura de la distribución de abundancias entre especies como a su parentesco taxonómico en cada muestra.

#### 1.4. Peces Dulceacuícolas

Los peces son un grupo de vertebrados muy diverso con aproximadamente 8 411 especies de peces dulceacuícolas en el mundo (Nelson, 1984). México tiene 506 especies, lo cual representa aproximadamente el 6% de los peces dulceacuícolas del mundo, cifra significativa en cuanto a diversidad (Espinosa *et al.*, 1993b; Castro-Aguirre y Balart, 1993). Esto se refleja en 113 géneros, 47 familias y 18 órdenes (Espinosa *et al.*, 1993b). Además, en México existe un importante grado de endemismo, hay 163 de especies endémicas, lo que representa el 1.9 % de las especies conocidas en el planeta (Espinosa, 1993; Flores y Gerez, 1994).

A pesar de la riqueza biológica y el endemismo que caracterizan a los peces dulceacuícolas en México, desafortunadamente, de las 506 especies nativas 126 se encuentran dentro de las categorías de especies raras, amenazadas o en peligro de extinción, y al menos 16 especies se han reportan como extintas, de las cuales 14 eran endémicas (Miller *et al.*, 1989; UICN, 1996, *Tabla 3*).

En la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001 existen 185 peces acuáticos incluidos en alguna de las siguientes categorías: especies en peligro de extinción, amenazadas, raras y sujetas a protección especial, lo cual representa un 22% de incremento con respecto a la lista anterior que fue publicada en 1994 (DOF, 1994, 2002). Es evidente, que estos números pueden incrementarse o disminuir, pues no se ha estudiado el estado de conservación de muchas especies dulceacuícolas.



En 1960, Miller (1961) reportó para México cuatro especies extintas recientemente y 36 como claramente en peligro. Para 1979 en la lista de la American Fisheries Society's se mencionan 67 especies de peces mexicanas en peligro y amenazadas (Deacon *et al.*, 1979); una década después, se presentaron 123 especies, representando un incremento de 83% en 10 años (Williams *et al.*, 1991). En 1993, el número excede a 135 especies amenazadas o en peligro (Contreras y Lozano, 1994).

**Tabla 3. Peces dulceacuícolas extintos o desaparecidos en México 1600 - 1996 (UICN, 1996).**

Especie (nombre común)	Situación	Distribución
<i>Notropis aulidion</i>	extinta	endémica
<i>Nopris orca</i>	extinta	norteamérica
<i>Nopris saladonis</i>	extinta	endémica
<i>Evarra lahuacensis</i> (charal)	extinta	endémica
<i>Evarra engelmanni</i> (charal)	extinta	endémica
<i>Evarra bustamantei</i> (charal)	extinta	endémica
<i>Stypodon signifer</i>	extinta	endémica
<i>Skiffia francesae</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon garmani</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon lalisfasciatus</i> (perrito de Parras)	extinta	endémica
<i>Cyprinodon alvarezi</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon ceciliae</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon inmemoriam</i>	extinta	endémica
<i>Cyprinodon longodorsalis</i>	extinta	endémica
<i>Megupsilon aporus</i>	extinta	endémica
<i>Priapella bonita</i> (quayacón ojiazul)	extinta	endémica
<i>Scaphyrhynchus platorhynchus</i>	desaparecida	norteamérica
<i>Tiaroga cobitis</i>	desaparecida	endémica
<i>Ptychocheilus lucius</i> (salmón de río)	desaparecida	endémica
<i>Xyrauche texanus</i>	desaparecida	norteamérica

En las cuencas de la Mesa Central de México, la cuenca del Lerma-Santiago es la más rica en especies endémicas (45). Asimismo, la familia con mayor endemismo es la Goodeidae, sobre todo en esta cuenca con 13 especies (*Tabla 4*). Sin embargo, en ella se han desarrollado áreas agrícolas, pecuarias, corredores industriales y una refinería petrolera, que ha contribuido a que los cuerpos de agua de esta cuenca figuren como los más contaminados del país, que ha provocado la desaparición de la fauna y flora de sus aguas en algunas de sus porciones (Miller *et al.*, 1989; Soto-Galera *et al.*, 1999).

Los goodeidos pertenecen a una familia de peces vivíparos ciprinodóntidos distribuidos en el Altiplano Mexicano y suroeste de los E.U.A (Miller y Fitzsimons, 1971; Miller *et al.*, 1989; Miller y Humphries, 1996). Esta familia comprende 17 géneros y aproximadamente 37 especies (Webb *et al.* 2004), de las cuales una parte está extinta, otras están amenazadas y en peligro de extinción. Las especies de la subfamilia Goodeinae, se distribuyen en territorio mexicano y poseen una diversidad peculiar sobre todo dada la limitada extensión de su distribución.

Tabla 4. Especies endémicas en las cuencas de la Mesa Central de México (De la Vega, 2003).

Familia	Lerma Santiago	Balsas	Pánuco	Ameca	Nazas	Mezquital	Coahuylana Armería	Valle de México
Goodeidae	13	3	1	6	1	2	5	1
Ameiuridae	1	2	1	-	-	1	-	-
Atherinidae	18	1	-	-	-	1	-	4
Catostomidae	-	-	1	-	2	2	-	-
Characidae	-	1	-	-	1	-	-	-
Ciclididae	-	2	4	-	-	-	-	-
Cyprinidae	8	1	3	1	7	3	-	2
Persidae	-	-	-	-	1	1	-	-
Poeciliidae	2	4	5	-	-	-	-	-
Total	42	14	15	7	12	10	5	7

Los goodeidos presentan una gran variedad de historias de vida y morfología como resultado de su especialización. Existen especies herbívoras depredadoras como *Hubbsina tumeri* y *H. robustus*, las hay adaptadas a aguas muy rápidas (*Ilyodon spp*) y, también se les puede localizar en pequeños arroyos, así como en grandes lagos. A pesar de que los goodeidos ocupan una diversidad de hábitats, muchas especies están confinadas a una pequeña área geográfica o a una sola cuenca y algunas están restringidas a un solo ambiente como *Allotoca maculata*, *Girardinichthys viviparus* y *Chapalichthys encaustus*, las cuales están exclusivamente asociados con hábitat lacustre (Miller y Smith, 1986).

Los procesos evolutivos que promueven la diversificación de goodeidos son desconocidos. Sin embargo, la diversidad de estos peces parece ser resultado de eventos de vicarianza asociados con vulcanismo, levantamientos orogénicos durante el Plioceno y Pleistoceno y la captura fluvial (Barbour, 1973). Estas fuerzas geológicas produjeron diferentes ambientes acuáticos en todo el sistema de drenaje, y proporcionaron repetidas comunicaciones de cuencas y ciclos de aislamiento en los últimos millones de años (Barbour, 1973; Webb y Miller, 1998). A causa de la historia geológica que aisló la Mesa Central, los goodeidos son dominantes y se conforman en grupos. La poca competencia de estas especies con otro tipo de peces, permitió a los goodeidos diversificarse.

En la Familia Goodeidae se pueden distinguir tres elementos disyuntos en su distribución: un elemento norteño, uno intermedio y uno sureño. El primero, de extensión muy restringida, localizado en Nevada. Es el elemento más distante y está constituido por algunas pozas y manantiales desérticos. El segundo de extensión restringida, ocurre dentro de la Mesa del Norte en Durango y está constituido por pozas, manantiales y pequeñas corrientes en la cabecera del río San Pedro Mezquital. El tercer elemento ocupa un área mayor, que se localiza en la Mesa Central y cuencas del Eje Neovolcánico. Se tienen registros de goodeidos en 20 cuencas hidrográficas (Gesundheit, 2004; *Tabla 5, Mapa 1*). Más del 50% de las especies de goodeidos se distribuye en las cuencas del Lerma-Santiago, Ameca, Balsas y Cuitzeo (De la Vega-Salazar, 2003). Los goodeidos que nos interesan para este trabajo se encuentran en la subcuenca del río Teuchitlán en la cuenca del Río Ameca.

Tabla 5. Goodeidos encontrados en las cuencas dentro de su área de distribución (Gesundheit, 2004).

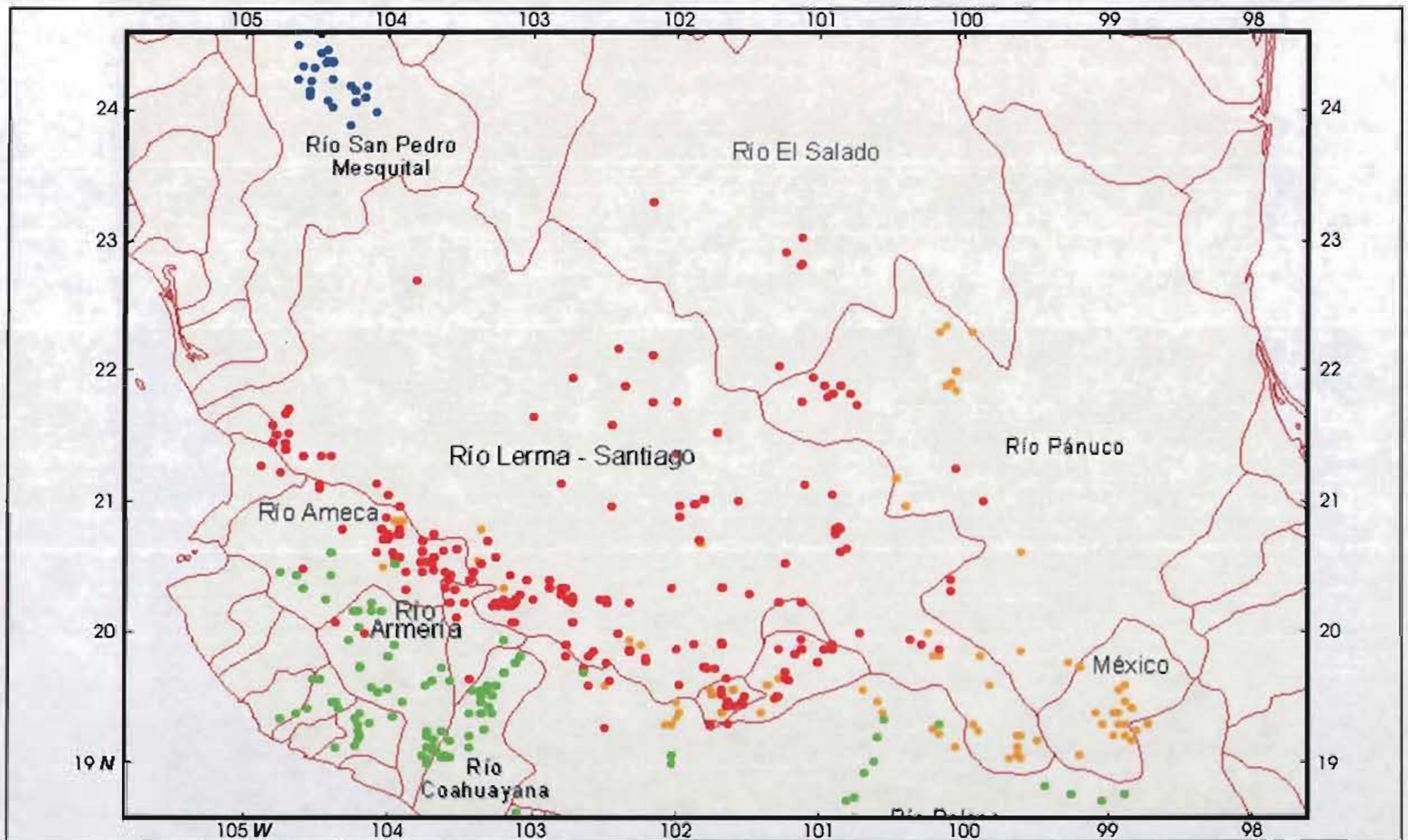
Cuenca	No. de especies	Cuenca	No. de especies	Cuenca	No. de especies
Lerma - Santiago	13	Pánuco	6	Huicicila	2
Lerma	12	Sayula	6	San Pedro Mezquital	2
Ameca	11	Pátzcuaro	5	Cuenca de México	1
Balsas	10	Zirahuén	5	Coalcomán	1
Cuitzeo	8	Santiago	4	Purificación	1
Coahuayana	6	Armería	3	Cuitzamala	1
Yuriria	6	Cihuallán	3		

La distribución actual de los goodeidos parece estar más restringida que la histórica debido a la alteración antropogénica de sus hábitats. Es probable que una especie se haya extinguido (*Allotoca catarinae*), otra haya sido extirpada (*Skiffia francesae*) y otra más se haya reducido a una población relictual (*Zoogoneticus tequila*) como resultado de dichas actividades, además varias de las restantes han sufrido una contracción en su área de distribución (De la Vega-Salazar *et al.*, 2003).

De 1996 a 1998, Moyaho (2002) encontró que algunas especies sólo habitaban una localidad como es el caso *Chapalichthys pardalis*, *Ameca splendens*, *Charcodon audax*, y por último, descubrió que algunas localidades donde se encontraban goodeidos habían desaparecido. El autor revisó 53 localidades donde habían reportado goodeidos y encontró que existe una disminución en el número de localidades donde estaban presentes estos peces (65%). Es importante resaltar que cinco especies (14%) presentaron el 100% de reducción en el número de localidades que se evaluaron; tres especies (8%) más del 75%; y siete especies (19.5%) más del 50%. Es un hecho que la disminución en el número de localidades ha llevado a una reducción en la distribución geográfica de por lo menos 14 especies de goodeidos (39%). Destacan *A. catarinae*, *A. dugesi*, *Allodontichthys hubbsi*, *Skiffia francesae* con el 100% de reducción; *Hubbsina tumeri* con el 99.8%; *Xenotoca melanosoma* y *Zoogoneticus tequila* con el 90%; *S. lermae* 86%; *S. bilineata* 80%; y *X. eiseni* 75%.

Estos estudios sugieren que una especie, *A. catarinae*, está extinta; *S. francesae* esta extinta en la naturaleza; ocho se encuentran en la categoría de críticamente en peligro; once están en peligro; ocho pueden ser consideradas como vulnerables; cuatro están en riesgo próximo y dos parecen estar sin ningún riesgo.

Existen otros factores de riesgo inherentes de la familia Goodeidae, ya que estos peces presentan dimorfismo sexual y tienen hábitos alimenticios bénticos, características fisiológicas que parecen favorecer la acumulación de contaminantes y posiblemente ponen en peligro su reproducción y supervivencia. Algunos goodeidos son afectados por factores extrínsecos como agroquímicos (De la Vega-Salazar *et al.*, 1997) y, su sistema de reconocimiento de pareja es vulnerable a la presencia de especies introducidas (Zambrano *et al.*, 1999).



**Simbología**

— Cuencas

**Tribus**

- Allodontichthyini
- Chapalichthyini
- Characodontini
- Girardinichthyini

**DISTRIBUCIÓN DE LA SUBFAMILIA  
GOODEINAE  
MÉXICO**

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Instituto de  
Ecología

Instituto de  
Geografía

Octubre, 2004

Mapa 1. Distribución de la subfamilia Goodeinae en las cuencas hidrográficas

La subcuenca del río Teuchitlán ha sido sometida a diversos impactos antropogénicos entre los que resaltan la construcción del embalse la Vega en 1955 y la introducción de especies exóticas (Kingston, 1978; Webb y Miller, 1998). Antes de las primeras introducciones de peces exóticos, en 1978, el ensamblaje de peces en la subcuenca estaba compuesto de trece especies nativas agrupadas en cinco familias, la familia Goodeidae estaba representada por nueve, incluyendo tres especies endémicas *Skiffia francesae*, *Z. tequila* y *A. splendens* (Miller y Fitzimons, 1971; Kingston, 1978; Webb y Miller, 1998).

La fragmentación e introducción de especies exóticas probablemente causaron un severo empobrecimiento del ensamblaje de peces con una pérdida del 35.7% de todas las especies y el 64.3% de las especies nativas, incluyendo *S. francesae*. Actualmente el ensamblaje de peces está formado por cinco especies nativas y cuatro exóticas. En los manantiales hay poblaciones substanciales de especies nativas, mientras que las exóticas son la fauna dominante en las pozas (De la Vega-Salazar *et al.*, 2003).

De la Vega-Salazar *et al.* (2003) buscaron la presencia del género *Skiffia* y *Zoogoneticus* y encontraron una reducción en el número de localidades reportadas históricamente (14). A pesar de la búsqueda exhaustiva, *S. francesae* no se encontró en ninguna localidad. *S. lermæ* sólo se encontró en tres de las 7 localidades reportadas, *S. multipunctata* se reportó en tres y sólo se localizó en una. *S. billneata* se presentó en 2 de 5 localidades donde estaba presente. Considerando estas reducciones y de acuerdo con los criterios de la IUCN, todas las especies del género *Skiffia* están dentro de alguna categoría de amenaza. *Z. quitzeoensis* se presentó de forma abundante en 5 de 10 localidades (bajo riesgo). En 2002 *Z. tequila* sólo se encontró en una reducida población en una pequeña poza; consecuentemente, su estado de conservación ahora puede cambiar de extinta a un estatus de en peligro crítico. Todas las especies de *Skiffia* y *Zoogoneticus* han disminuido o han sido extirpadas de su medio posiblemente por el impacto antrópico.

La mayoría de las causas de la pérdida de la diversidad biológica de los goodeidos quizá está ligada al impacto antrópico (eutrofización, fragmentación del hábitat, introducción de especies) que influye en el tamaño, la densidad, la composición, la tasa de crecimiento y la estructura genética de sus poblaciones. Cuando las condiciones ambientales no son adecuadas, las poblaciones reducen su tamaño y conducen a las poblaciones a refugios pequeños donde están propensos a la extinción estocástica. Es por esto, que en este trabajo se pretende discernir cuáles son algunas de las causas antrópicas (cambio en la cobertura forestal, deforestación, erosión, sedimentación) que promueven el declive y extinción local en Goodeidos.



## II. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivos

#### ➤ 2.1.1. Objetivo General

Discernir algunas de las causas antropogénicas (cobertura forestal, deforestación, erosión y sedimentación) del cambio en la comunidad de peces dulceacuícolas de la Familia Goodeidae en la cuenca del Río Teuchitlán, a fin de entender la relación entre actividad humana y extinción local.

La estrategia incluye describir la cobertura forestal y deforestación donde ha habido modificaciones de la distribución y extinción de goodeidos, a partir de dos imágenes de satélite 1973 y 2000, a fin de cuantificar la magnitud de la alteración y relacionarla con el cambio en la ocurrencia de especies.

#### ➤ 2.1.2. Objetivos Particulares

- ❖ Cuantificar la diversidad de las especies de peces, número de especies nativas de la Familia Goodeidae y número de especies exóticas a partir de los datos de colectas obtenidas por la Laboratorio de Conducta Animal del Instituto de Ecología (UNAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Universidad de Michigan con la ayuda de un Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- ❖ Analizar los cambios en la cobertura forestal, deforestación, sedimentación y erosión a partir de material bibliográfico, cartas temáticas e imágenes de satélite (1973 y 2000) y utilizando un SIG.
- ❖ Determinar si existe una relación entre estos cambios físicos (cobertura forestal, deforestación, sedimentación y erosión) en la cuenca durante el periodo evaluado y la distribución geográfica y diversidad biológica en las especies de los peces dulceacuícolas de la Familia Goodeidae en la subcuenca del río Teuchitlán.

### III. MÉTODOS

Los métodos utilizados en este estudio engloban la recopilación, generación y diseño de bases de datos y análisis de información a partir de imágenes de satélite, así como su procesamiento con el Sistema de Información Geográfica (SIG).

A manera de introducción a los métodos de este trabajo, presentaré algunos conceptos sobre percepción remota, Sistemas de Información Geográfica y el uso de sensores remotos. Una explicación a mayor detalle de estos temas utilizados a lo largo de la metodología se puede consultar en el *Anexo II*.

#### Percepción Remota

La percepción remota se puede definir como la técnica de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la Tierra (Chuvieco, 1996).

Los sensores remotos se definen como aquellos instrumentos capaces de captar las características de un objeto desde la distancia (Bird, 1991). En un sentido amplio se refiere a todos aquellos aparatos que pueden servir para medir y captar información sobre campos de fuerza (gravedad, magnetismo), energía acústica emitida por un cuerpo o reflejada por él y, energía electromagnética (Barrett y Curtis, 1995). La información que es captada por los sensores pertenece a una parte del espectro electromagnético.

La percepción remota se reduce al análisis de determinadas bandas del espectro conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta y la radiación electromagnética se desplaza sin problemas. Cada objeto en la superficie de la Tierra refleja en longitudes de onda específicas conocidas como curvas espectrales, las cuales son captadas por los sensores que se encuentran en los satélites (Bird, 1991). Además, los objetos también emiten radiación en función de su temperatura.

Los sensores multiespectrales son generadores de imágenes y existen dos principales sistemas: los de barrido o scanner; y los de pulsación (push broom). En ambos casos, se transforma una señal, la radiancia recibida en el sensor, en pulso eléctrico. Este pulso se cuantifica y genera un dígito que representa un elemento gráfico llamado píxel (picture element). Cuentan con un divisor de haz (beam splitters) que separa la radiancia en diferentes bandas del espectro (luz visible, infrarrojo próximo, infrarrojo cercano, infrarrojo térmico, etc.). Cada banda corresponde a un canal. A su vez, la energía de cada banda de radiancia genera una señal eléctrica que se digitaliza y se traduce en valores de canal para el píxel particular (Wilkinson, 1991).

## Imágenes de satélite

Una imagen digital debe entenderse como una malla fina formada por filas y columnas (matriz de datos) que definen unas coordenadas espaciales en la que cada una de las tramas (píxeles) tiene un valor determinado. Es decir, una imagen digital es un conjunto de píxeles, cada uno de los cuales tiene un valor medio formado por la combinación de valores binarios de 8 o 16 bits ( $2^8$  o  $2^{16}$ ). A su vez, ese valor refleja la radiancia que cada canal ha captado de un área (Lillesand y Kiefer, 1987).

Las imágenes de satélite adquiridas para el desarrollo de este trabajo fueron del sensor Landsat MSS del año 1973 y del sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) del satélite Landsat 7 con el fin de analizar la cobertura forestal, la deforestación y la erosión, que son quizá algunos factores que influyen en el cambio de la distribución geográfica, declinación y posible extinción de algunas especies de goodeidos en la subcuenca del Río Teuchitlán, Jalisco.

## Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)

El comportamiento espectral teórico de la cubierta vegetal ha sido la base para obtener los índices de vegetación (IV) que se basan en el contraste entre la banda roja del infrarrojo cercano del espectro. Los IV se construyen a partir de la combinación entre las bandas 3 y 4 de la imagen Landsat TM. Los IV son cocientes y efectúan una división píxel a píxel entre los niveles digitales en dos bandas de la misma imagen (Chuvieco, 1996). Estos índices son una medida de la proporción de cobertura vegetal en un área determinada y están diseñados para brindar una comparación de los cambios temporales y espaciales de la vegetación, al responder a la cantidad de vegetación fotosintéticamente activa en determinado píxel, al contenido de clorofila y óptica foliar, y a las características estructurales del dosel.

El NDVI (Índice Normalizado de Vegetación) es uno de estos índices, cuya función es realzar las características de la vegetación, en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros elementos (Rouse *et al.*, 1974). Este índice es la diferencia normalizada de la banda del rojo e infrarrojo cercano de la imagen Landsat TM, y cuyo rango de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1, que están correlacionados directamente con la biomasa (Gilbert *et al.*, 1997). Los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos son generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, y corresponde a nubes, neblina, agua, zonas deforestadas, entre otros. El NDVI se define de acuerdo a la siguiente relación (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR\ cercano - Rojo}{NIR\ cercano + Rojo}$$

donde NIR y Rojo son las respectivas reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo,

En este trabajo se obtuvo el NDVI para la imagen satélite de 1973 y del 2000, con el fin de conocer cual ha sido la pérdida de cobertura vegetal en este período. Posteriormente, se utilizó este NDVI para calcular la densidad de vegetación y el material erosionado en la subcuenca del río Teuchitlán, para relacionarlo con la pérdida de biodiversidad en este lugar.



## Modelos Digitales de Terreno (MDT)

Los Modelos Digitales de Terreno (*MDT*) se han definido como una representación digital de la variación continua del relieve en el espacio (Burrough, 1986). Bosque (1994) lo define como una representación de la topografía expresada como elevación, pendiente y orientación del territorio, en formato digital. Un *MDT*, generalmente representa la topografía del terreno, es decir, la altura (s.n.m.) en cada punto (píxel) de un área. Los *MDT* se pueden representar mediante tres tipos de modelo de datos distintos (Peucker y Chrisman, 1975). Las diferencias entre ellos residen en cuáles son los elementos base utilizados: puntos, líneas y funciones matemáticas. El *MDT* obtenido para este estudio, se utilizó para generar la hipsometría, la pendiente, la red fluvial y para el análisis de la cuenca. En este último se necesitó el *MDT* para reconstruir el fondo de la Presa La Vega, se calculó el volumen total erosionado del área de captura de la subcuenca del río Teuchitlán, para posteriormente, relacionarlo con la pérdida de biodiversidad de los goodeidos en este lugar.

## Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) puede definirse como un programa informático para el procesamiento de datos que contienen referencias espaciales; de este modo, es posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas (Bosque, 1992). Pero sobre todo es un Sistema de Información. Un sistema de información es un conjunto de elementos organizados que permite dar respuesta a preguntas no necesariamente definidas de antemano (Igarzabal, 1989). Está conformado por una base de datos; una base de conocimiento (conjunto de procedimientos para el análisis de datos) y un sistema de interacción con el usuario (Bosque, 1992).

### 3.1. Métodos

La metodología utilizada en este estudio se divide en dos etapas: primero, recopilación y análisis de información y segundo, procesamiento con el Sistema de Información Geográfica (*SIG*).

#### ➤ 3.1.1. Primera Etapa: Recopilación y análisis

En la primera etapa se obtuvo el material bibliográfico, cartas temáticas, e imágenes de satélite con el fin de analizar algunos factores (la cobertura forestal, la deforestación y la erosión) que influyen en el cambio de la distribución geográfica, declinación y posible extinción de especies en un espacio temporal de dos periodos 1970 y 2000 en la subcuenca del Río Teuchitlán, Jalisco.

El material cartográfico que se utilizó lo conforma las cartas temáticas: geológica, edafológica, topográfica y uso de suelo y vegetación, a escala 1:50,000 y 1:250,000 elaboradas por el INEGI. En la escala 1: 50,000 se necesitaron las cartas: Etzatlán (F13D53), Tequila (F13D54), Ameca (F13D63), Tala (F13D64), y Guadalajara Oeste (F13D65). La carta (F13-12) escala 1:250,000 se utilizó porque ofrece una visión regional de los principales rasgos topográficos (INEGI, 2001, 1998, 1992, 1997 y 1996).

Utilizando las cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI mencionadas anteriormente, se definió y digitizó la subcuenca hidrológica del río Teuchitlán a partir de su parteaguas. El parteaguas o línea divisoria de aguas es una línea imaginaria que encierra el área de confluencia de una cuenca; y en su trazado no debe cortar ninguna corriente de agua, salvo a la salida de la cuenca. Una vez definida la subcuenca se realizó la descripción de su medio físico: relieve, geología, edafología, clima, hidrología y clasificación de órdenes de corrientes. Se elaboró un mapa correspondiente para cada tema.

Para conocer las características del clima de la subcuenca, se utilizó la información de las 12 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro del área de estudio o en sus cercanías. Con los datos recopilados de temperatura y precipitación, y calculando los valores promedio tanto mensuales como anuales, se definió el clima de acuerdo a la clasificación climática de Köeppen, modificada por García (1988) y se elaboró el mapa climatológico correspondiente.

Para los aspectos biológicos, se caracterizó con detalle la distribución de las especies de peces dulceacuícolas de la Familia Goodeidae en la subcuenca del río Teuchitlán. Se ubicaron aquellas localidades en la zona de estudio donde se han encontrado peces de esta familia. Se utilizaron los datos de colectas obtenidas por el Laboratorio de Conducta Animal del Instituto de Ecología (UNAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Universidad de Michigan. Se elaboró un mapa de distribución histórica (antes de 1970) y un mapa de distribución actual de las especies de la Familia Goodeidae. Se calculó la biodiversidad en 1970 y en 2000 de los goodeidos y de las especies exóticas, a partir de las medidas taxonómicas distintivas y las medidas de distinción taxonómica.

### ➤ 3.1.2. Segunda Etapa: Procesamiento con SIG

En la segunda etapa se realizaron los procesos y análisis respectivos con un conjunto de algoritmos específicos y el SIG. Se interpretaron y analizaron las imágenes de satélite *Landsat MSS* del año 1973 y *Landsat 7 ETM+* del 2000. Con ello, se digitizó y analizó la información necesaria para la elaboración de un MDT y los siguientes mapas: de altitudes, de orientación, de pendientes, hidrográfico, geológico, climatológico, de uso de suelo y vegetación, entre otros.

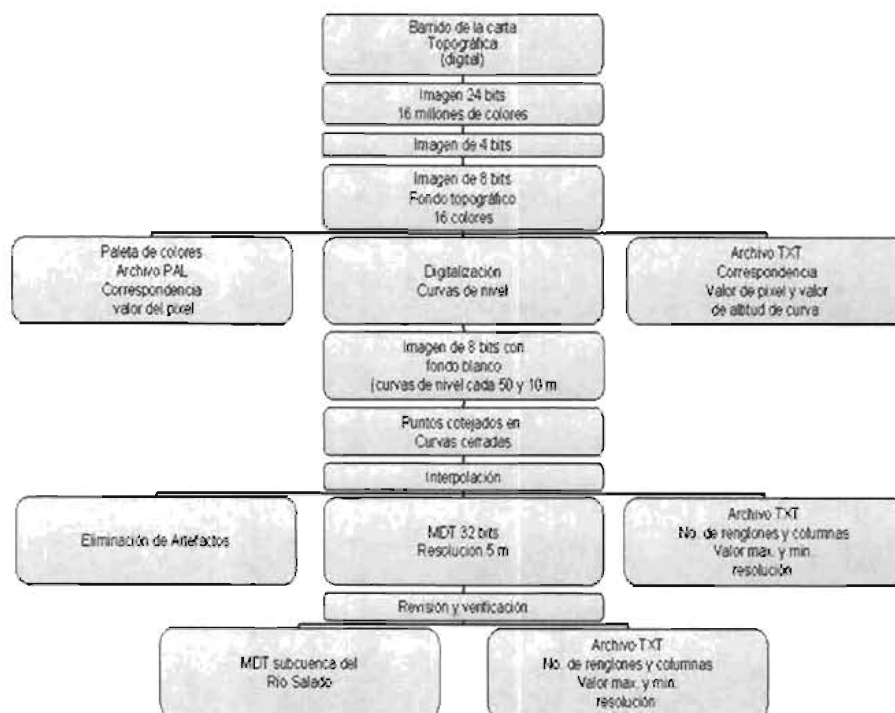
La información generada a partir de estos mapas permitió desarrollar la parte descriptiva de la subcuenca del río Teuchitlán que se presenta en el siguiente capítulo. Asimismo, se utilizaron algunos de estos resultados (pendiente, orientación, edafología y cobertura forestal) como base para el análisis de la subcuenca en relación a la reconstrucción del fondo de la presa de La Vega, material erosionado y relleno de la presa con el fin de relacionar algunos factores que influyen en el cambio de la distribución geográfica, declinación y posible extinción de algunas especies de goodeidos en la subcuenca del Río Teuchitlán, Jalisco.

Se va a explicar a continuación con detalle la metodología utilizada para obtener el MDT, las pendientes, la orientación, la hipsometría, red fluvial, análisis de la cuenca y los mapas temáticos, para lo cual se utilizaron varios algoritmos generados por Parrot (*Anexo III*).

### ➤ 3.1.2.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

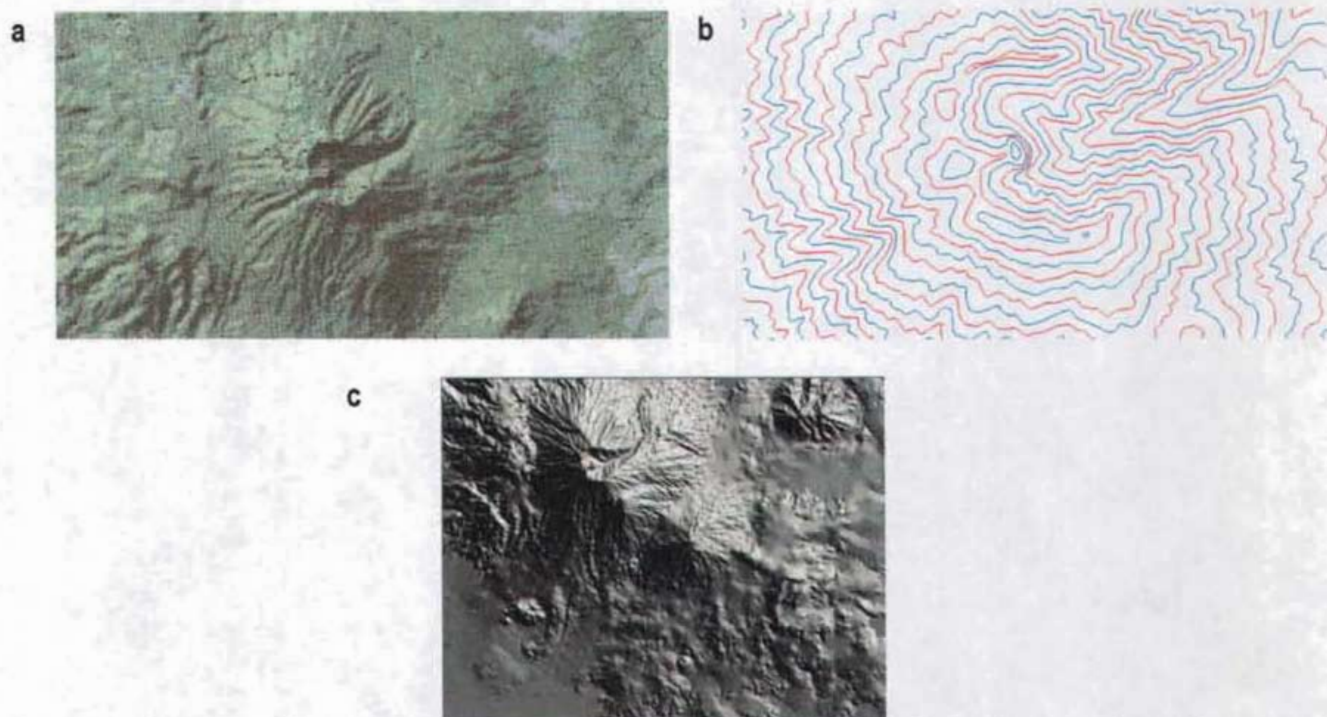
La carta topográfica representa la base para la creación de un *MDT*, del cual se derivaron otros productos cartográficos, tales como modelo de relieve sombreado, mapa de pendientes, de altitudes y de orientación. A partir del mapa topográfico escaneado se digitizaron en pantalla las curvas de nivel cada 50 m de equidistancia vertical, asignando una codificación de acuerdo a los valores de cada curva con el programa *PhotoShop 4*, el cual tiene una plataforma raster, donde se generó un imagen con escala de grises (8 bytes) de extensión *raw* (Parrot y Ochoa, 2004).

Se creó una tabla donde se registró la correspondencia entre los valores de tonos de gris y los valores de altitud, la cual se utilizó para crear una imagen de 4 bytes de las curvas de nivel con sus valores reales de altitud con el programa *Brod4\_mx* (Parrot, 2003). Se hizo una interpolación multidireccional de las curvas de nivel con el programa *Miel4\_mx\_v2* (Parrot, 2003) con el fin de generar el *MDT* a partir de la imagen *\_c4.raw*. Un esquema de todo el proceso puede verse en la *Figura 2*. Debido a que la imagen satelital adquirida tiene una resolución de 30 metros y el Modelo Digital del Terreno (*MDT*) elaborado es de 6 metros, se equiparó la resolución de este último a través del programa *Reduc\_mnt* (Parrot, 2003).



*Figura 2. Diagrama de flujo para la elaboración del MDT de la subcuenca del río Teuchitlán, Jalisco.*

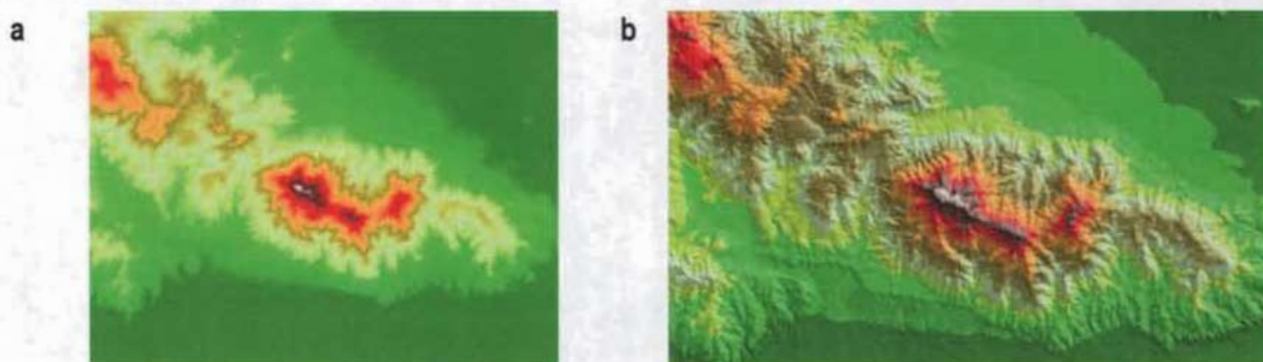
El MDT de la subcuenca del Río Teuchitlán, Jalisco es de 32 bits (4 bytes) y una precisión isométrica de 600 centímetros, es decir con una resolución del tamaño del píxel de 6 m; el tamaño de la imagen es de 5 607 líneas por 9 732 columnas; altura mínima 1 220 msnm y altura máxima 2925 msnm. El MDT obtenido se utilizó para generar la hipsometría, la pendiente, la red fluvial y para el análisis de la cuenca (*Figura 3*).



*Figura 3a) Mapa topográfico 1:50,000. 3b) Curvas digitizadas en pantalla. 3c) MDT resultante sombreado*

#### ➤ 3.1.2.2. Hipsometría

A partir del MDT se obtuvo un mapa de altimetría en la subcuenca de estudio, definido con intervalos hipsométricos iguales. Asimismo, se generó un mapa altitudinal sobrepuesto en un MDT sombreado para facilitar únicamente la percepción visual de las características del terreno (*Figura 4*), ya que no se puede utilizar para realizar ningún cálculo.



*Figura 4a. Imagen hipsométrica. 4b) Imagen de relieve sobrepuesto en un MDT sombreado*



### ➤ 3.1.2.3 Pendientes (orientación y ángulo)

La pendiente de una superficie se puede definir como el ángulo entre ésta y el plano horizontal. El valor de la pendiente se calcula a partir del valor de la normal de la superficie. Por otro lado, la proyección de la normal sobre un plano horizontal indica su orientación. En el modelo *raster* no existen superficies continuas y el cálculo de la normal no se puede realizar directamente; es necesario definir una representación de la continuidad de la superficie a partir de los valores de altitud de cada punto del *MDT*. El cálculo del gradiente de las pendientes se basó en los dos operadores ( $S_x$ ,  $S_y$ ) del filtro de Sobel, los cuales corresponden a las matrices:

$$S1 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix} \quad S2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \left[ \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N S1_{m,n} * A_{i-m,j-n} \right] / (8xp) \\ S_y &= \left[ \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N S2_{m,n} * A_{i-m,j-n} \right] / (8xp) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Con } M=N=1, \\ &\text{donde } A \text{ es la altitud del píxel de coordenadas } (i,j) \text{ y } p \text{ es el} \\ &\text{tamaño del píxel} \end{aligned}$$

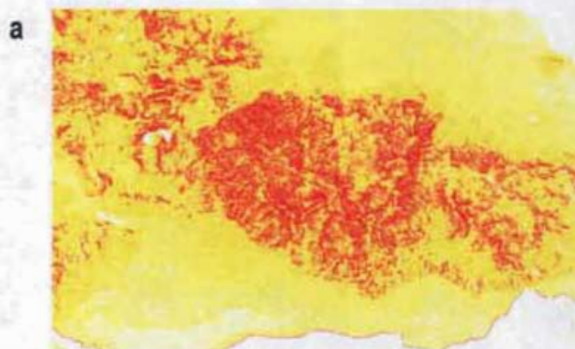
El valor de la pendiente se calcula de la siguiente manera:

$$Pendiente = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \text{ y, finalmente, } Pendiente = (a \tan(Pend) + 180) / \pi$$

Por otro lado, la dirección de la pendiente es igual a:

$$Dirección = \arctag (-S_x, S_y) \times (180/\pi)$$

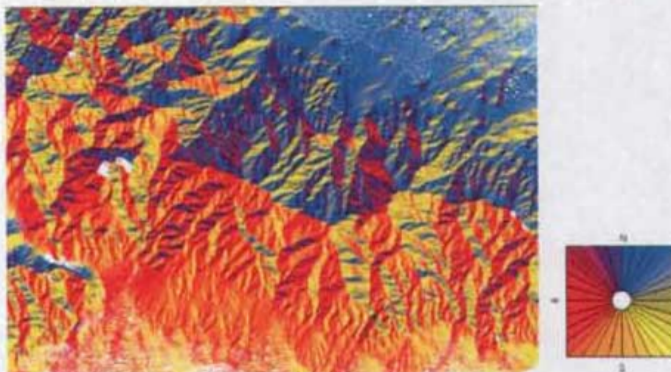
Las pendientes se obtuvieron mediante el programa *Versant* (Parrot, 2003), tomando como base el *MDT*, el cual calcula la pendiente original dentro de una ventana móvil. Se obtuvo un rango de pendientes en grados de inclinación. Se realizó una clasificación cada 8 grados obteniendo 11 rangos y se consideró una escala de colores que van de los tonos amarillos a los morados, por lo tanto, las zonas de menos pendiente son de color amarillo ( $0^\circ$ ) y las más inclinadas de color morado ( $> 20^\circ$ , *Figura 5*).



*Figura 5. Imagen de pendientes de la subcuenca de estudio.*



A partir del MDT se generó una imagen de orientación (*Figura 6*), en la que se asignó un color primario a cada dirección con respecto al Norte (azul = orientación  $0^\circ$  o Norte, amarillo =  $120^\circ$  y rojo =  $240^\circ$ ), correspondiente a la paleta del pintor. Los valores intermedios aparecen representados por mezclas de los colores primarios (anaranjado =  $180^\circ$ , morado =  $270^\circ$ ). Las orientaciones están reportadas cada  $10^\circ$ .

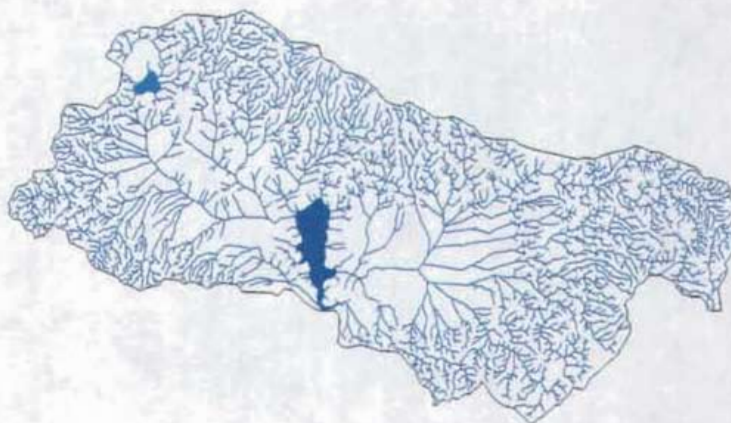


*Figura 6. Imagen de orientación de las pendientes*

#### ➤ 3.1.2.4. Red fluvial

El estudio de las redes fluviales y su extracción a partir de los MDT ha sido ampliamente estudiado. Una red fluvial, según los cartógrafos la definen como una línea codificada sobre el mapa que corresponde a la presencia de un río dentro de un *talweg* (línea formada por los puntos más bajos del lecho de un río). Se define una zona de *talweg* como el conjunto de las superficies topográficas ubicadas debajo de todos los puntos vecinos más altos y dirigidos según una dirección. Estas superficies pueden contener agua de manera temporal o permanente.

La red hidrográfica se extrajo del MDT con el programa *Rio4* (Parrot, 2002). El algoritmo que se utiliza toma en cuenta la definición de Deffontaines y Chorowicz (1991). Los escurrimientos que no se obtuvieron por este procedimiento se infirieron por medio de las curvas de nivel, sobreponiendo la red fluvial extraída con la carta topográfica. Se realizó un mapa hidrográfico y se comparó la configuración obtenida con la clasificación compilada por Guerra (1980) (*Figura 7, Anexo IV*).



*Figura 7. Imagen de la red fluvial y la presa de La Vega*

La clasificación de órdenes de corrientes se realizó tomando como base el mapa hidrográfico, atendiendo el método de Horton y Strahler. Las corrientes que no posean afluentes son de primer orden, con la unión de dos corrientes de primer orden se forma una corriente de segundo orden, si se juntan dos corrientes de segundo orden se tiene una corriente de tercer orden, de esta manera se siguen trazando las corrientes hasta que se encuentra el último orden (Lugo, 1988). La relación de confluencia para el segundo orden se obtuvo dividiendo las corrientes de primer orden entre las de segundo, posteriormente las de segundo orden se dividen entre las de tercero y así sucesivamente hasta que se divide el último orden. La distribución de la red de drenaje se obtuvo con el valor logarítmico del número total de corrientes de cada orden.

La longitud de la red fluvial se calculó utilizando la densidad de píxeles y la densidad de disección del relieve. El relieve es resultado de procesos endógenos (tectonismo y vulcanismo), así como la erosión y la sedimentación que continúan a los primeros y son los encargados de suavizar la forma original del relieve. Por esta razón, es importante medir la disección del relieve tanto desde el punto de vista horizontal como del vertical (Parrot *et al.*, 2005).

La densidad de píxeles que constituyen la red fluvial se obtuvo dentro de una ventana móvil de 3 X 3 píxeles que recorre la imagen desde la esquina superior izquierda hasta la esquina inferior derecha (*raw order*), donde cada píxel que no se encuentre en la zona de borde le corresponde un valor de densidad. Para calcular la densidad dentro de la ventana móvil es necesario contar el número de píxeles ( $N_p$ ) que constituyen la red fluvial y dividirla por el valor de  $S_v$  que es la superficie de la ventana móvil calculada en número de píxeles. Esta densidad  $D_f$  normalizada (0, 100) es igual a:

$$D_f = (N_p / S_v) \times 100$$

La superficie de la ventana móvil  $S_v$  está relacionada tanto con el tamaño del lado de la ventana móvil ( $L_v$ ) como con su número de orden  $n$ . La relación es  $L_v = 2n + 1$ . Por ejemplo, cuando  $n=1$ , el lado  $L_v$  es de 3 y por lo tanto la superficie es de 3X3, es decir 9.

Se puede realizar un cálculo denominado densidad de disección, que puede ser expresado como una relación entre la red de drenaje (km) y el área de la zona observada ( $\text{km}^2$ , Parrot, *et al.*, 2005). Para lo cual se midió la longitud total de los cauces  $L_c$  presentes en la ventana móvil, tomando en cuenta el valor del lado  $L_p$  que corresponde al lado del píxel y de la superficie  $S_p$  del píxel, es decir, el grado de resolución, utilizando un algoritmo capaz de medir un perímetro (Ochoa *et al.*, 2002).

El algoritmo *Disec* (Parrot, 2003), utiliza cualquier tamaño de la superficie y puede definir una malla regular o elegir ventanas móviles que recorren toda la imagen y dan un valor a cada píxel. El programa calcula directamente la relación longitud en km / superficie de los cuadrantes en  $\text{km}^2$  dentro de una ventana móvil, por lo que no se requiere hacer una interpolación a partir del valor central de los cuadrantes como hace el parámetro de disección aplicado por Lugo (1988).

En este caso la densidad  $D_2$  es igual a:

$$D_2 = (L_c / S) \times \xi$$

donde  $\xi$  es un coeficiente de normalización,  $S_r$  es la superficie real de la zona de observación

$$S_r = N_{pv} \times S_p \text{ con } N_{pv} = (L_v - 1)^2, S_p$$

$N_{pv}$  es igual a la superficie en píxeles de la zona de observación de la red hidrográfica.

Para medir la longitud de la red fluvial en 3D, es necesario tomar en cuenta los valores de altitud de los diferentes píxeles involucrados. El valor del elemento de la red fluvial proyectado sobre la superficie del píxel corresponde a la hipotenusa de un triángulo recto con base igual a  $l_{z1}$  o  $l_{z2}$ , la altura es la diferencia de altitud  $H$  entre el píxel central y el píxel vecino.

La longitud de dichos elementos locales  $l_{3D1}$  y  $l_{3D2}$  es igual a:

$$l_{3D1} = l_{z1} \text{ y } l_{3D2} = l_{z2} \text{ si } H = 0$$

$$l_{3D1} = \sqrt{(l_{z1})^2 + (H/2)^2} \quad \text{y} \quad l_{3D2} = \sqrt{(l_{z2})^2 + (H/2)^2}$$

y la longitud total  $l_{3D}$  medida en una ventana móvil de 3 x 3 píxeles es:

$$l_{3D} = \sum l_{3D1} + \sum l_{3D2}$$

### ➤ 3.1.2.5. Mapas temáticos

En el caso del mapa geológico y el de uso de suelo y vegetación escala 1:50,000 elaborado por INEGI, se les asignaron las coordenadas UTM y se procedió a digitizar en pantalla el límite de la subcuenca de estudio y las unidades correspondientes a cada carta. Una vez digitizados los segmentos que conforman las diferentes unidades, se procedió a verificar segmentos y hacer polígonos de cada unidad, es decir, se le asignó el nombre que le corresponde a cada unidad y el color que la va a diferenciar de las demás, con esta información fue posible obtener histogramas de porcentajes (*Tabla 6*).

Debido a que el SIG que se utilizó (Ilwis) emplea un formato *raster*, todos los mapas digitalizados que se obtuvieron en plataforma vectorial, fueron convertidos a formato raster usando el algoritmo para rasterizar que proporciona este software. Para clasificar los polígonos se utilizaron las clases del INEGI.

### ➤ 3.1.2.6. Imagen de satélite

Las imágenes de satélite adquiridas para el desarrollo de este trabajo fueron del sensor Landsat MSS de 1973 y del sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) del satélite Landsat 7 del 22 de enero de 2000 (10:00 AM), la cual es pancromática, multiespectral infrarroja. La serie es 029046 con un azimut de 143.26 y una elevación del Sol de 41.25. La imagen corresponde al estado de Jalisco y una pequeña porción a Michoacán, México. La imagen consta de un canal pancromático (0.52 a 0.90  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 15 m, tres bandas visibles (0.45 a 0.515, 0.525 a 0.605 y 0.63 a 0.690  $\mu\text{m}$ ), tres bandas en el infrarrojo cercano (Irc 0.75 a 2.35, Irm 1.55 a 1.75 y Ir2.09 a 2.35  $\mu\text{m}$ ), estas seis con una resolución de 30 m y una banda en el infrarrojo térmico (10.40 a 12.35  $\mu\text{m}$ ) con 60 m de resolución.



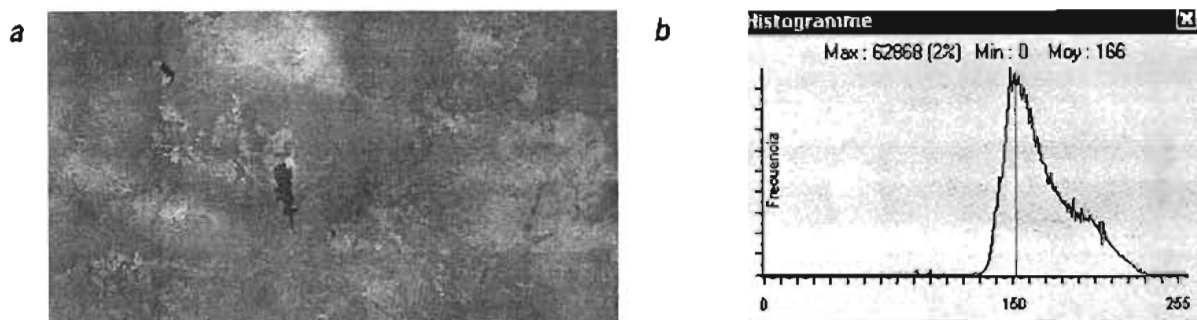
Tabla 6. Clasificación de unidades de uso de suelo.

Uso del suelo	Clasificación INEGI
Agricultura de temporal	Atp
Agricultura de riego	Ar
Pastizal	Pas
Matorral	Mat
Vegetación secundaria	Vs
Bosque de encino	FBL(Q)
Bosque de encino-pino	FBL(Q)-FBC(P)
Bosque de encino-pino con erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-FBC(P)-Ehf
Bosque de encino-pino con pastizal inducido	FBL(Q)-FBC(P)-Pi
Bosque de encino con erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-Ehf
Bosque de encino con pastizal inducido	FBL(Q)-Pi
Bosque de encino con pastizal inducido y erosión hídrica media	FBL(Q)-Pi-Ehm
Bosque de encino con pastizal inducido y erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-Pi-Ehf
Bosque de encino con pastizal inducido y vegetación secundaria con matorral subinorme	FBL(Q)-Pi-S(Ms)
Bosque de encino y vegetación secundaria con matorral subinorme y pastizal inducido	FBL(Q)-S(Ms)-Pi
Bosque de encino con pastizal natural y matorral inorme	FBL(Q)-Pn-Mi
Bosque de encino con matorral inorme	FBL(Q)-Mi
Bosque de encino con matorral inorme y erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-Mi-Ehf
Bosque de pino-encino	FBC(P)-FBL(Q)
Bosque de pino-encino con erosión hídrica fuerte	FBC(P)-FBL(Q)-Ehf
Bosque de pino-encino con pastizal inducido	FBC(P)-FBL(Q)-Pi
Bosque de pino con agricultura de temporal	FBC(P)-At
Bosque de pino con pastizal inducido	FBC(P)-Pi
Bosque de pino con pastizal inducido y vegetación secundaria con matorral subinorme	FBC(P)-Pi-S(Ms)
Bosque gal sauce	FBg(Sx)
Selva baja subcaducifolia	FSB(sc)
Erosión hídrica fuerte con pastizal inducido	Ehf-Pi
Erosión hídrica fuerte con pastizal inducido y vegetación secundaria con matorral subinorme	Ehf-Pi-S(Ms)
Cuerpos de agua	Agua
Laguna Colorada	L
Presa	P
Zona Urbana	ZU

Debido a que las imágenes de satélite adquiridas tienen una resolución de 30 metros y el Modelo Digital del Terreno (MDT) elaborado es de 6 metros, se equiparó la resolución de este último a través del programa *Reduc\_mnt* (Parrot, 2003).

A partir de la combinación de las bandas 3 y 4 de las imágenes Landsat MSS y Landsat 7 ETM+, y con el programa de algoritmos *TM\_index* (Parrot, 2003), se obtuvo el Índice Normalizado de Vegetación.

La *Figura 8* muestra una imagen del NDVI del Landsat 7 ETM+ con su respectivo histograma que corresponde a la sección de la subcuenca del Río Teuchitlán en el estado de Jalisco. Es una imagen del NDVI obtenida a partir del programa *TM\_index* (Parrot, 2002), utilizando la banda 3 y 4. Las imágenes de estas bandas se les dio un tratamiento con el programa PINS (Parrot, 2003) con el fin de normalizar los datos y ampliar la base del histograma. Posteriormente, estas bandas normalizadas se utilizaron para obtener el NDVI a partir del programa *TM\_index*.



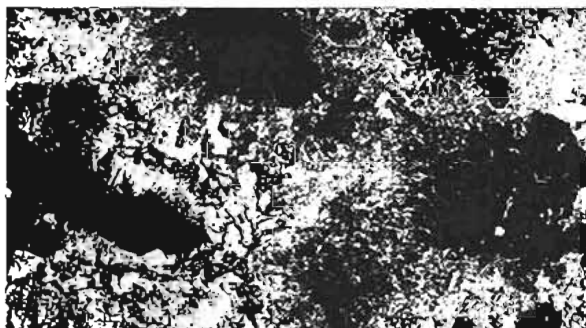
**Figura 8.** Imagen del NDVI tratada con el programa PINS La línea verde en el histograma corresponde al valor de umbral donde es reflejada la vegetación.

Los valores del histograma del NDVI, en el eje de las abscisas (X) representan las frecuencias de cada valor de la vegetación y en el eje de las ordenadas (Y) el número de píxeles (frecuencia). Por lo tanto, en X se encuentran los valores de la escala de grises a blancos normalizados entre 0 y 255, donde los valores más oscuros son áreas sin vegetación y los blancos con vegetación activa.

El valor 150 en el histograma de la *Figura 8*, corresponde al valor máximo de umbral que se alcanza y donde se representa la máxima frecuencia de la reflectancia de la vegetación (frecuencia). Como una primera aproximación, el valor del umbral de 150 se tomó como base o valor inicial para los tratamientos de binarización y homogenización.

Con el fin de obtener una imagen binaria (0, 1) sobre la imagen resultante del NDVI normalizado, se realizó una binarización con el programa Binar3 (Parrot, 1997). Se obtuvo una imagen donde sólo se encuentran las áreas con vegetación activa (1) y sin vegetación o deforestadas (0). En este tratamiento de binarización se realizaron diferentes pruebas, con el fin de elegir el valor del umbral adecuado; se comenzó con un valor de umbral de 120 hasta 155 con intervalos de 5 (*Figura 9*).

La vegetación no es homogénea (fragmentación) y su densidad es variable. Las áreas con diferente densidad de vegetación se definieron utilizando el programa *Homo2* (Parrot, 2003), el cual delimita las áreas homogéneas dentro de una ventana móvil; el algoritmo mide el número de píxeles iguales al valor del píxel central de esta ventana. Por ejemplo, en una ventana móvil de 3x3 el número de píxeles va de 1 a 9; donde 9 píxeles corresponde al 100% de homogeneidad.

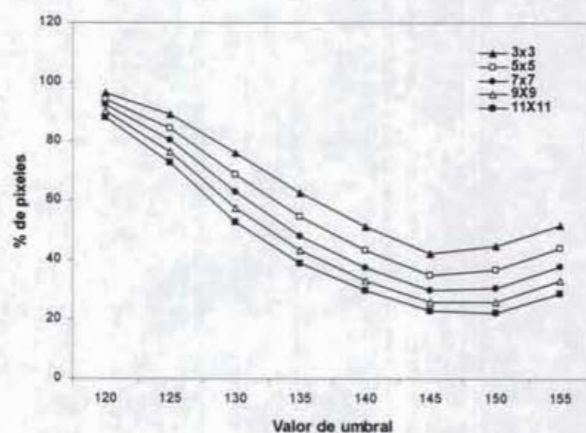


**Figura 9.** Imagen binarizada del NDVI con valor de umbral 140 obtenidas con Binar3.

La imagen del NDVI tiene 4 210 183 píxeles, este valor se obtuvo a través del programa *NB\_pixitem* (Parrot, 2001) que calcula el porcentaje de píxeles codificados con el valor 1 (presencia de vegetación).

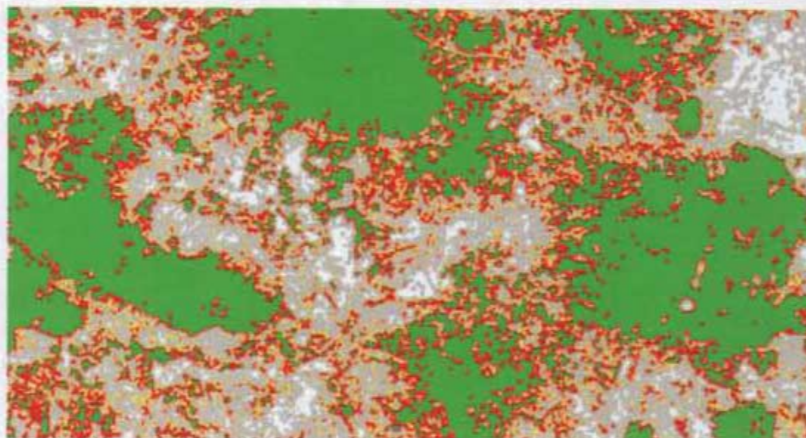
Se realizaron diversos tratamientos de la imagen binarizada del NDVI con el programa *Homo2* (Parrot, 2003) tomando en cuenta los 8 diferentes valores de umbral y considerando los cinco tamaños de ventana móvil, pero cambiando el valor máximo y mínimo de binarización en el programa *NB\_pixitem* (Parrot, 2001). Esto, con la finalidad de comprobar que la elección del umbral es correcta.

En este sentido, se encontró que la imagen de 4 210 185 píxeles, con valor de umbral 145, tiene más del 50% de píxeles binarizados que representan la vegetación, como se observa en la curva de la *Gráfica 1*, la cual se estabiliza sin disminuir el número de píxeles en cualquier ventana móvil. Es decir, este valor es considerado como óptimo y es donde existe mayor absorbancia de la vegetación.



*Gráfica 1. Porcentaje de píxeles que corresponden a densidad de vegetación igual a 100% de acuerdo a la ventana móvil, y al valor del umbral de la imagen binarizada del NDVI.*

La homogeneidad de la vegetación que se decidió utilizar es la que corresponde a la imagen con una ventana de 11X11 píxeles, con un total de 1 642 685 píxeles, con una normalización entre 0 y 100 para obtener el porcentaje de homogeneidad y un valor umbral de 145 (*Figura 10*).



*Figura 10. Imagen de la densidad de vegetación con un valor umbral de 145 y una ventana de 11X11.*



La imagen generada por el programa *Homo2* (Parrot, 2003), representa la densidad de la vegetación en la zona de estudio, el color verde corresponde a las áreas con vegetación muy densa (100%), el color rojo son las áreas con vegetación densa (90%) y, generalmente colindan con las áreas de vegetación muy densa. Los colores naranja y amarillo, corresponden a áreas con vegetación poco densa, entre 80 y 70% de homogeneidad, respectivamente. Las áreas de estos últimos intervalos de homogeneidad son pocas. El color gris son aquellas áreas con vegetación escasa y el color blanco son las áreas desprovistas de vegetación, deforestadas o con poca actividad fotosintética y, en algunos casos son cuerpos de agua (presas y laguna).

### ➤ 3.1.2.7. Análisis diacrónico de la cuenca

Para el análisis de la cuenca se utilizaron tres programas en lenguaje C++. El programa *Lake\_bottom* (Parrot, 2004) permite la reconstrucción del fondo de la Presa cuando se desconoce su batimetría. El segundo algoritmo, denominado *Materos* (Parrot, 2004), calcula el volumen total erosionado del área de captura; este volumen depende de la superficie desnuda en la zona y requiere del Modelo Digital del Terreno (*MDT*) y de la imagen de satélite para obtener la densidad de vegetación en el área de estudio y la tasa de erosión. Las tasas de erosión reportadas en la literatura fluctúan entre 5 y 1 700 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> (*Tabla 7*). Los valores de tasa de erosión de 0.05, 0.1, 0.5, y 1 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> se utilizaron para realizar los tratamientos. El tercer programa, *Lake\_filling* (Parrot, 2004), permite rellenar la presa con el volumen del material erosionado que entra en la cuenca de captura.

*Tabla 7. Tasas de erosión.*

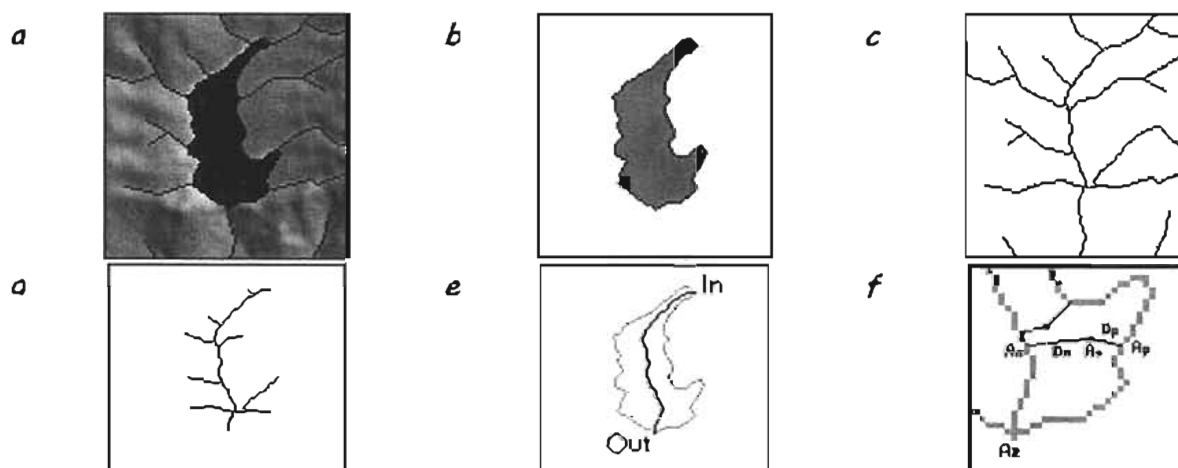
Tasa de erosión m <sup>3</sup> / has	Tasa de erosión m <sup>3</sup> / km <sup>2</sup>	Fuente
0.05	5	Gao <i>et al.</i> , 2002
0.11	11	Grace III, J. M. 2004.
0.19	19	Cerda, A. y Lavee, H. 1999
0.30	30	Cerda, A. y Lavee, H. 1999
0.31	31	Gao, Q.; L. Ci y M. Yu. 2002
0.32	32	Tiscareño-López <i>et al.</i> , 1999.
0.79	79	Lee <i>et al.</i> , 1999.
0.80	80	Alstrom, K. y A. Bergman-Akerman, 1992.
1.30	130	Grace III, J. M. 2004.
2.15	215	Seckely <i>et al.</i> , 2002.
2.30	230	Evans, R. 1995
2.50	250	Watson, A. y R. Evans. 1991
3.60	360	Govers, G. 1991
4.80	480	Liu <i>et al.</i> , 2001
6.70	670	Watson, A. y R. Evans. 1991
9.00	900	Bartsch <i>et al.</i> , 2002
10.00	1000	Richter, G. 1983.
11.70	1170	Ludwing <i>et al.</i> , 1995.
12.80	1280	Bollinne, A. 1982
15.60	1560	Bollinne, A. 1982
17.00	1700	Pimental <i>et al.</i> , 1995.

### 3.1.2.7.1. Reconstrucción del fondo de la Presa de La Vega

El programa *Lake\_bottom* presenta diferentes etapas. La primera etapa consiste en extraer las zonas planas a partir de la imagen binaria (1, 0) de la red de drenaje de la superficie de la presa. Cuando un píxel codificado con el valor 1 no corresponde con el fondo codificado con el valor 0, se considera como un píxel de superficie, así como cuando todos los píxeles de vecindad 4 tienen el mismo valor. Cuando hay un agrupamiento de píxeles juntos, el etiquetado (por ejemplo valor 2) permite seleccionar la superficie de la presa definiendo las coordenadas de cualquier punto  $(i, j)$  ubicado en esta superficie y entonces se localiza la altitud de la presa seleccionada y todos los píxeles ubicados en el perímetro del agrupamiento de píxeles seleccionados con la misma altitud se agregan a este agrupamiento (píxeles en la *Figura 11b*). Así se obtiene la máscara de la superficie de la presa en estudio.

En la segunda etapa se aplica un proceso de esqueletización con el algoritmo propuesto por O'Gorman (1990), el cual permite obtener la red interna de la presa (*Figura 11c*). Se utilizó la máscara de la superficie de la presa de estudio generada en la etapa anterior para extraer la porción de la red de drenaje localizado debajo de la superficie de la presa. Se averiguaron las diferentes ramas terminales de la red de drenaje que se encuentran dentro de la superficie de la presa (*Figura 11d*). Una de las ramas corresponde a la salida de la red y las ramas restantes a los puntos de entrada a la presa.

La tercera etapa consiste en conocer la trayectoria más larga entre el punto de entrada y el punto de salida de la presa (*Figura 11e*). Se siguió la trayectoria más larga desde el punto de entrada hasta alcanzar el punto de salida, cuando se encontró un punto de cruce se siguió uno de los segmentos presentes, se regresó al punto de cruce si no existe un punto de salida.



*Figure 11. Reconstrucción del fondo de la presa. a) Red de drenaje y superficie de la presa superpuesta en el MDT sombreado b) Extracción de la superficie de la presa (tonos grises: píxeles de la superficie; tonos oscuros: píxeles del perímetro). c) Extracción de la red de drenaje en la escena completa. d) Porción de la red dentro de la superficie de la presa (10 ramas terminales). e) Búsqueda de la trayectoria más larga entre el punto de salida y el de entrada. f. Interpolación toma en cuenta la distancia menor  $D_n$  entre el píxel estudiado (altitud  $A_o$ ) y un punto que pertenece a la trayectoria del drenaje (Altitud  $A_n$ ) y la distancia menor  $D_p$  entre este punto y el perímetro de la presa (altitud  $A_p$ ).*

Este procedimiento se empleó para cada punto de cruce localizado. Cuando se alcanza el punto de salida, la longitud de la trayectoria correspondiente se mantiene en la memoria y luego se comparó con todas las trayectorias calculadas. Una vez que se definió la trayectoria más larga fue necesario aplicar un procedimiento similar para definir las coordenadas de los puntos sucesivos que componen la trayectoria.

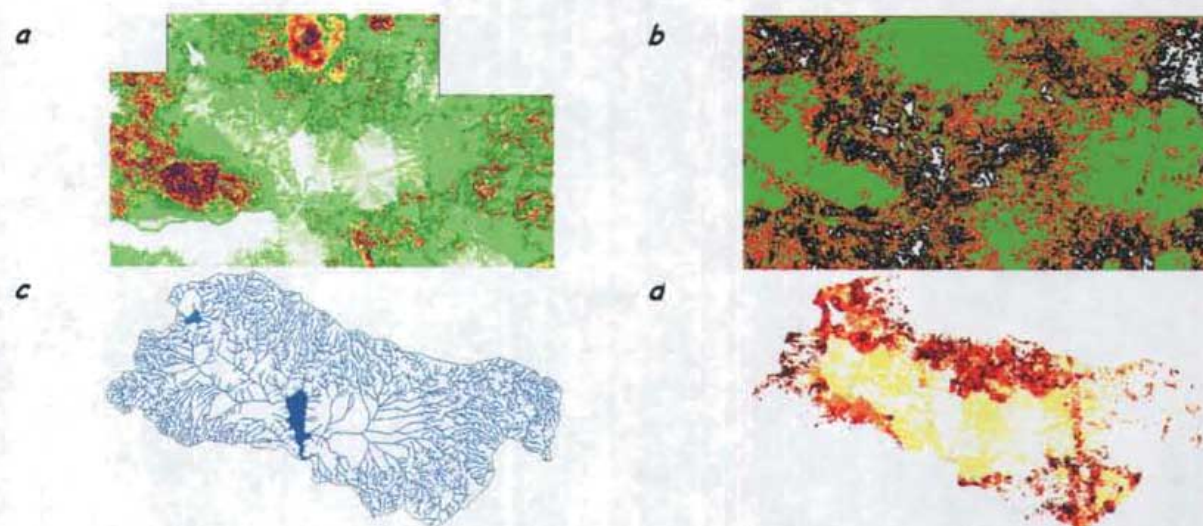
En el último paso se tomó en cuenta los píxeles que pertenecen al perímetro de la presa y la curva formada por la trayectoria más larga. Primero, se aplicó un valor nulo para conectar el componente correspondiente a la superficie de la presa. Entonces, la altitud de los píxeles que describen la trayectoria más larga se calculó tomando en cuenta la altitud del punto de entrada, la altitud del punto de salida y el número de píxeles que componen la trayectoria. Se hizo una interpolación lineal. Para buscar la distancia mínima  $D_p$  entre un punto nulo y el perímetro, así como la distancia mínima  $D_n$  entre este punto nulo y la trayectoria principal. La altitud  $A_0$  es el punto igual a

$$A_0 = A_n + \left[ \left( \frac{A_p - A_n}{D_p + D_n} \right) \times D_n \right] \quad (1)$$

donde:  $A_p$  es la altitud de la superficie de la presa y  $A_n$  es la altitud del punto más cercano de la trayectoria.

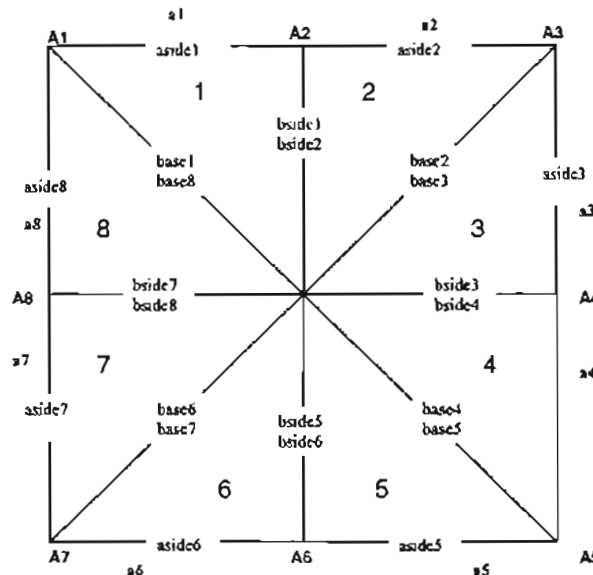
#### ▪ 3.1.2.7.2. Material Erosionado

Se calculó el volumen del material erosionado cada año en el área de captura con el fin de rellenar la presa reconstituida con el programa *Materos* (Parrot, 2004). Para calcular este volumen es necesario considerar el Modelo Digital del Terreno (*MDT*), la densidad de vegetación y la tasa de erosión (*Figura 12*).



**Figura 12.** Erosión anual de la subcuenca del río Teuchitlán 12a. Pendiente. 12b. Densidad de Vegetación. 12c. Red de drenaje y superficie de la presa en la zona de captura 12d. Perdida de suelo.

El volumen del material erosionado se calculó tomando en cuenta diferentes tasas de erosión (*Tabla 7*), las cuales generan un volumen de material y por lo tanto, producen una superficie tridimensional determinada. Para calcular esta superficie, cada píxel es dividido en 8 triángulos rectángulos que convergen en el píxel central. Se toma en cuenta el valor de la altura del píxel estudiado y la altura de los 8 píxeles que lo rodean. Se asume que la altura de las esquinas del píxel y la del centro de cada píxel contiguo es el resultado de una interpolación lineal entre la altura del píxel central y la altura de los píxeles vecinos (*Figura 13*).



*Figura 13. Cálculo tridimensional de la superficie del píxel*

Para calcular la superficie de cada triángulo se utilizó la fórmula de Heron.

$$S = \sqrt{\omega(\omega - base)(\omega - aside)(\omega - bside)} \quad (2)$$

$$\text{donde } \omega = (base + aside + bside) / 2$$

La superficie tridimensional  $S_{3D}$  del píxel corresponde a la suma de los 8 triángulos resultantes

$$S_{3D} = \sum_{l=1}^{l=8} S(l) \quad (3)$$

Otra variable a considerar para calcular el volumen del material erosionado, es la densidad de vegetación activa en el área de estudio, la cual fue extraída utilizando el NDVI. La densidad se obtuvo utilizando la siguiente ecuación:

$$d(i, j) = \left[ \frac{\sum_{j=1}^{j=n^2} Pb(j)}{n^2} \right] \times 100 \quad (4)$$

donde  $n$  es el tamaño de la ventana móvil,  $i$  y  $j$  las coordenadas del píxel estudiado y  $Pb$  los píxeles binarios de la imagen NDVI



Finalmente el volumen del material erosionado (*Figura 12a*) se cálculo de la siguiente manera.

$$V = \sum_{i=0, nl-1}^{j=0, nc-1} \left( \frac{\tau}{\xi} \times \alpha(i, j) \times S_{3D}(i, j) \right) * v(i, j). \quad (5)$$

donde  $(i, j)$  son las coordenadas de un píxel,  $nl$  número de líneas,  $nc$  número de columnas,  $\tau$  tasa de erosión ( $m^3/km^2$ ),  $\xi$  el valor en grados del ángulo que corresponde a la tasa de erosión dada  $\tau$ ,  $\alpha$  el valor en grados de la pendiente del punto  $(i, j)$  y  $S_{3D}(i, j)$  es la superficie recalculada  $Km^2$  del píxel calculada con la ecuación 8.

#### • 3.1.2.7.3. Relleno de la presa

Sin tomar en cuenta un proceso complejo de decantación, el programa *Lake\_filling* (Parrot, 2004) permite rellenar progresivamente la presa a partir del valor de altitud más bajo de la presa reconstituida con el volumen anual erosionado en la subcuenca, el cual fue calculado con el algoritmo anterior. Es evidente que la profundidad de la presa disminuirá en medida que se va rellenando ésta. En este sentido el *MDT* permite calcular el volumen de agua correspondiente a cada capa de relleno, el ancho de cada capa sucesiva de agua está en concordancia con la resolución hipsométrica del *MDT*. Si existe una estimación de este volumen de agua, entonces es posible estimar la proporción de sedimentación tomando en cuenta la edad del lago, sobre todo si se trata de un lago resultante de una presa, como es el caso de la presa de La Vega. Este programa además infiere la fecha del relleno completo.

#### 3.1.2.8. Índices de Biodiversidad

A partir de la delimitación de la subcuenca del Río Teuchitlán se ubicaron aquellas localidades donde se han encontrado peces de la Familia Goodeidae con la finalidad de caracterizar con detalle su distribución en la subcuenca del río Teuchitlán. Se elaboró un mapa de distribución histórica (antes de 1970) y uno de distribución actual (hasta 2000). Para la elaboración de estos mapas se construyó una base de datos con los registros de colecta provenientes de varias colecciones. Los datos para realizar el mapa de distribución histórica fueron en su mayor parte del Museo de Zoología de la Universidad de Michigan y en menor proporción de otras colecciones de instituciones extranjeras, disponibles en línea a través de la base de datos NEODAT. En el mapa de distribución actual (1971 – 2000) se emplearon los datos de colectas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la Universidad de Michigan y otras fuentes.

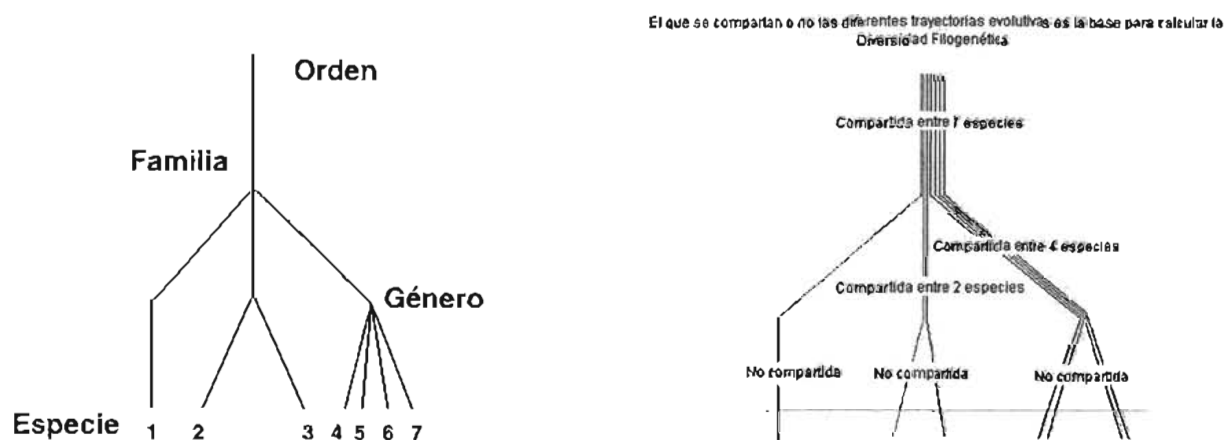
Se calculó la biodiversidad en 1970 y en 2003 de los peces dulceacuícolas de la Familia Goodeidae y los de las especies exóticas, utilizando los índices de biodiversidad denominados medidas taxonómicas distintivas y las medidas de distinción taxonómica.



Las medias taxonómicas distintivas que se calcularon fueron el *peso de la raíz* y la *diversidad filogenética (PD)*. El índice denominado "*peso de la raíz*", que es una medida que registra con pesos altos los clados basales de un árbol, mientras que a los clados altos se les da pesos bajos. La distintividad taxonómica de las especies de este índice se basa en el número de nodos o conexiones de rama desde las especies hasta la base del árbol (Van-Wright *et al.* 1991; Williams *et al.*, 1991).

En la *Figura 14*, la especie uno pasa por un solo nodo, en tanto que las especies 2 a 7 pasan por dos nodos. La distintiva taxonómica de las especies es inversamente proporcional al número de nodos. Entonces, la especie 1 tendrá el estatus de conservación más alto, y las especies 2 a 7 tendrán el estatus más bajo, pero igual entre ellas. Claramente este método tienen una desventaja, las especies 2 y 3 tienen la misma distintividad taxonómica que las especies 4 a 7. Sin embargo, las especies 2 y 3 tienen solamente otro conespecífico en su género, mientras que las especies 4 a 7 tienen 3; por lo tanto, las especies 2 y 3 podrían tener una distintividad taxonómica más alta.

Una modificación de May (1990) para resolver este problema, consiste en contar la suma de ramas en todas las conexiones de rama, más que el número de nodos por especie. En el ejemplo, para la especie 1 este valor es 3, para la especies 2 y 3 este valor es 5 y para la especies 4 a 7 este es 7. Es importante mencionar que estas 2 medidas sólo son dependientes en la topología del árbol y no son afectadas por las diferencias en la longitud de la trayectoria.



*Figura 14.* Árbol taxonómico que ilustra la posible clasificación de siete especies en tres taxa superiores.

Una aproximación similar al método del "*peso de la raíz*" es el de la *diversidad filogenética*, que usa en los cladogramas procedimientos categorizados de forma binaria con ponderación y sin ella para dar valores de diversidad a taxa terminales (Williams y Humphries, 1994).

Faith (1992, 1994) definió la *diversidad filogenética (PD)* como la longitud total de la trayectoria que constituye el árbol filogenético completo, siempre y cuando sea posible cuantificar la longitud de la rama. Las secciones de la rama que son compartidas por más de una especie son divididas

igualmente y la distintiva taxonómica de una especie es, entonces, simplemente la longitud de la trayectoria de la base del árbol. La longitud de la rama desde la base del árbol hasta el taxón terminal se iguala a 100 y las longitudes de los eslabones intermedios entre los niveles jerárquicos son iguales.

En el ejemplo de la *Figura 14* la contribución de *PD* total de la especie 1 es  $(33.3+33.3+33.3/7)$ , de la especie 2 es  $(33.3 + 33.3 / 2 + 33.3 / 7)$  de la especie 4 es  $(33.3 + 33.3 / 4 + 33.3 / 7)$ , etc. Sumando estas contribuciones a través de las especies mencionadas, se tiene un total de *PD* de  $(33.3 \times 7 + 53.3 \times 3 + 33.3) = 366.3$ . Los subgrupos de especies que abarcan una proporción mayor del árbol darán una contribución alta a la diversidad filogenética y podrán ser el blanco para la conservación desde el punto de vista de complementariedad y representación del rango de caracteres exhibidos por ese grupo de organismos.

En ambos tipos de medidas, el árbol filogenético ideal es el cladograma (representa el parentesco de especies) siempre y cuando la longitud de las ramas este determinada por métodos moleculares. No obstante, la longitud de la rama puede ser inferida entre los niveles jerárquicos de la clasificación de Lineo, ya que muchas de estas jerarquizaciones se basan en principios cladistas (Williams y Humphries, 1994).

Las medidas de distinción taxonómica que se evaluaron fueron la *diversidad filogenética promedio* (*AvPD*, denotado por  $\phi^*$ ) y la *distinción taxonómica promedio* ( $\Delta^*$ ). La *AvPD* es simplemente la diversidad filogenética total (*PD*) dividida por el número de especies (*S*), mientras que la  $\Delta^*$  es el promedio de la longitud de la trayectoria entre todos los pares de especies de una muestra, es decir se usa sólo con información de presencia/ausencia para cada especie.

El primer índice, *diversidad taxonómica* ( $\Delta$ ), puede ser considerado como la "distancia" taxonómica promedio entre dos organismos elegidos al azar de una muestra; esta distancia puede ser visualizada como la longitud de la trayectoria que conecta a estos dos organismos a partir del conjunto completo de especies involucradas en la clasificación de Linneo o en un árbol filogenético. A partir de este índice se puede calcular la *diversidad taxonómica promedio* ( $\Delta$ ), que es el promedio de la longitud de la trayectoria entre todos los pares de individuos de una muestra (Warwick y Clarke, 1995) y se define:

$$\Delta = \frac{[\sum \sum_{i < j} \omega_{ij} x_i x_j + \sum x_i (x_i - 1) / 2]}{[\sum \sum_{i < j} x_i x_j + \sum x_i (x_i - 1) / 2]} \quad (6)$$

$$= \left[ \sum \sum_{i < j} \omega_{ij} x_i x_j \right] \left[ n(n-1) / 2 \right]$$

donde  $x_i$  y  $x_j$  ( $i = 1, \dots, s$ ) denota la abundancia de las  $i$  especies,  $n (= \sum_i x_i)$  es el número total de individuos en una muestra,  $\omega_{ij}$  es el "peso distintivo" dado por la longitud del trazo ligado a las especies  $i$  y  $j$  en la clasificación jerárquica. La doble sumatoria es sobre todo los pares de especies  $i$  y  $j$ .

En términos estadísticos,  $\Delta$  es la longitud del trazo esperado entre dos individuos cualquiera elegidos al azar de una muestra (sin reemplazo), y sostiene una simple relación de parentesco para índices estándares de diversidad: cuando  $\omega_{ij} \equiv 1$  (para toda  $i < j$ ), por ejemplo, cuando la jerarquía taxonómica es ignorada,  $\Delta$  se reduce a la forma de diversidad de Simpson (Magurran, 1988, 2004). La *diversidad taxonómica promedio*  $\Delta$  puede entonces ser vista como una generalización de la diversidad de Simpson  $\Delta^\circ$  incorporando un elemento de parentesco taxonómico.

El segundo índice, *distinción taxonómica* ( $\Delta^*$ ), es el promedio de la longitud de la trayectoria entre dos individuos cualquiera elegidos al azar, a condición de ser de diferente especie. Esto es, equivale a dividir la diversidad taxonómica ( $\Delta$ ), por el valor que tendría si ésta no tuviera jerarquía taxonómica (todas las especies pertenecen al mismo género). El índice de distinción taxonómica ( $\Delta^*$ ), puede entonces ser visto como una medida de parentesco taxonómico puro, mientras que ( $\Delta$ ) mezcla el parentesco taxonómico con las propiedades de la uniformidad de la distribución de la abundancia.

Una medida derivada de este último índice es el de la *distinción taxonómica promedio* (AvTD), que refleja la riqueza en el taxón más alto y la uniformidad en el componente de diversidad. Esta medida se construye promediando la distintiva taxonómica de cada especie, la cual genera un índice denominado *diversidad filogenética promedio* (AvPD, denotado por  $\phi^+$ ), esto es simplemente la diversidad filogenética total (PD) dividida por el número de especies ( $S$ ).

El índice de *distinción taxonómica promedio*  $\Delta^*$  (Warwick y Clarke, 1995), elimina algunas de la dependencias de  $\Delta$  sobre la distribución de la abundancia de especies representadas por  $\{x_i\}$ . Este índice divide la diversidad taxonómica promedio ( $\Delta$ ) por el índice tipo Simpson ( $\Delta^\circ$ ).

Por ejemplo,  $\Delta$  es dividido por este valor cuando la clasificación jerárquica es colapsada como es el caso especial donde todas las especies pertenecen a un solo género. La proporción resultante,  $\Delta^*$ , es entonces más cercana a una función de parentesco taxonómico puro de individuos. La definición algebraica de la distinción taxonómica promedio es:

$$\Delta^* = \frac{\left[ \sum \sum_{i < j} \omega_{ij} x_i x_j \right]}{\left[ \sum \sum_{i < j} x_i x_j \right]} \quad (7)$$

En el caso que se utilice sólo información de presencia/ausencia para cada especie.

$$\Delta^* = \frac{\left[ \sum \sum_{i < j} \omega_{ij} \right]}{\left[ s(s-1) / 2 \right]} \quad \text{donde } S \text{ es el número de especies presentes para la doble sumatoria, el rango } i \text{ y } j \text{ sobre estas especies} \quad (8)$$

Los valores de estos índices son independientes del tamaño de la muestra, por ejemplo, el número de individuos en el caso de  $\Delta$  y  $\Delta^*$  y el número de especies en el caso de  $\Delta^*$  (Clarke y Warwick, 1998 b).

## IV. SUBCUENCA DEL RÍO TEUCHITLÁN

El Río Ameca tiene una cuenca de 12 237 km<sup>2</sup> y su longitud es de 205 km, nace en la Sierra de la Primavera, al Suroeste de Guadalajara y desemboca en el extremo Noroeste del Estado de Jalisco en la Bahía de Banderas. Una parte de su cuenca se encuentra en territorio del Estado de Nayarit (3 259 km<sup>2</sup>) y la otra en el Estado de Jalisco (8 978 km<sup>2</sup>).

La subcuenca del río Teuchitlán forma parte de la cuenca del río Ameca y se localiza en su parte este, en la región central del Estado de Jalisco. Está limitada por las coordenadas 20°30'28" y 20°48'55.4" de latitud Norte y 104° 5'47.7" y 103° 30'25.9" longitud Oeste (*Mapa 2*). Su división administrativa la ubica principalmente entre los municipios de Antonio Escobedo, Ahualuco del Mercado, Teuchitlán, Zapopan y Tala. Pequeñas porciones de la subcuenca se encuentran en los municipios de Ameca, Etzatlán, San Martín Hidalgo, Magdalena, Villa Corona, Arenal y Tlajomulco de Zúñiga. Su superficie es de 1 048.92 km<sup>2</sup>, el equivalente al 8.57% del total del área de la cuenca del río Ameca.

### 4.1. Relieve

La mayor elevación de la subcuenca se encuentra al noroeste, el volcán Tequila con 2 900 m.s.n.m<sup>1</sup>. Al sur de la subcuenca se localiza el cerro Grande de Ameca, el cual alcanza los 2 600 m.s.n.m., que es la segunda mayor altura registrada en la subcuenca. Existen también algunas elevaciones menores en el interior de la subcuenca que sobresalen como pequeñas lomas o cerros aislados, de ellos destacan los cerros Tomasillo (2 130), La Calabaza (2 160), El Tule (2 140), Alto (2 000) y El Trigo (2 120) (*Mapa 3*).

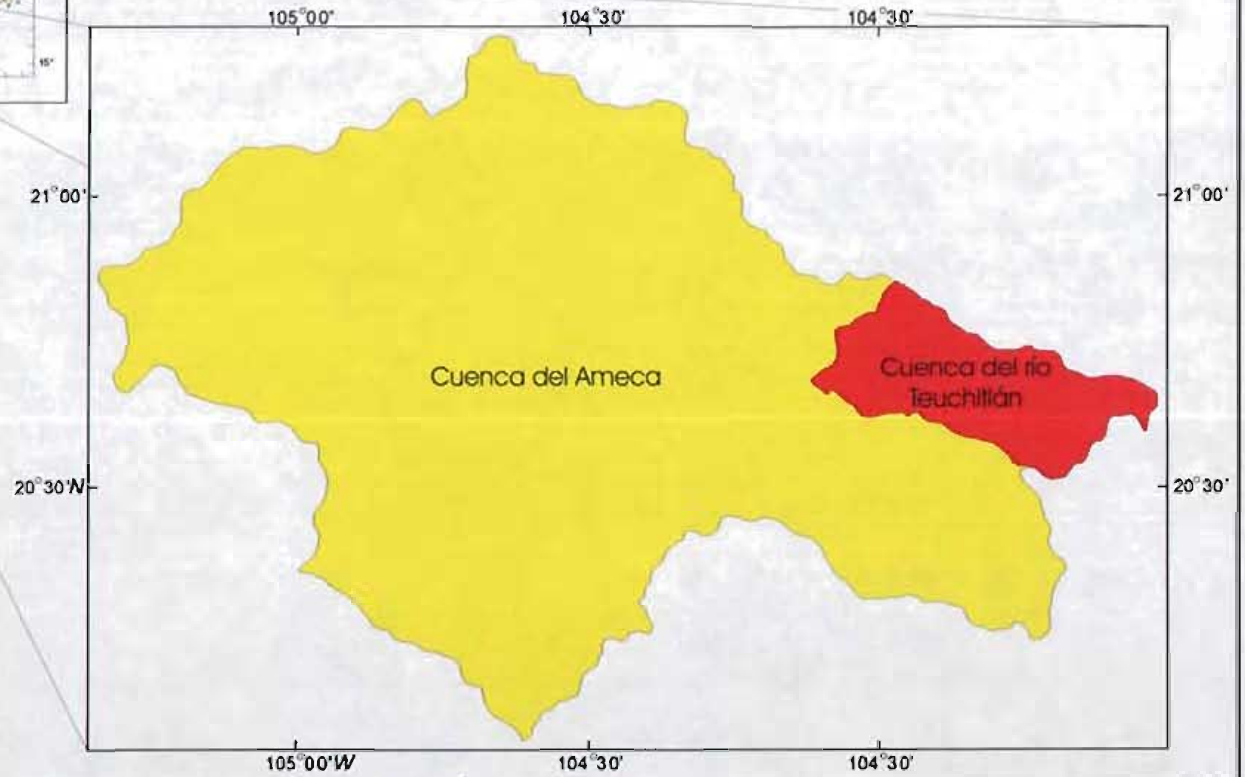
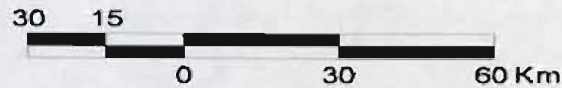
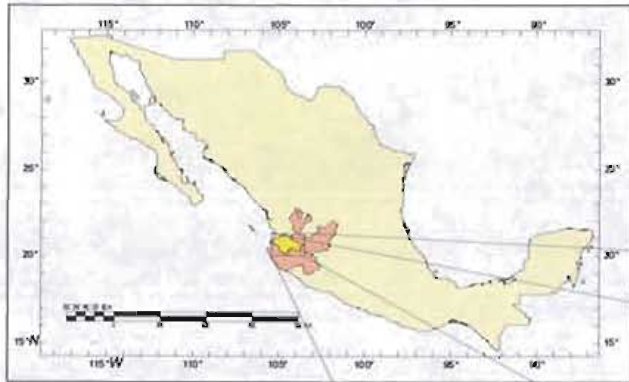
Al este de la subcuenca se encuentra la Sierra La Primavera, donde nace el río Salado que desemboca en La Presa de La Vega, y es el límite sur de la subcuenca. Se originó hace aproximadamente 140 mil años como consecuencia de la actividad volcánica, lo que le da el aspecto de un conjunto de domos y colinas dispuestos alrededor de dos mesetas volcánicas. Las máximas elevaciones de esta formación son el Cerro Las Planillas y el cerro San Miguel con 2 220 y 2090 m.s.n.m., respectivamente.

La parte central de la subcuenca del río Teuchitlán está formada por una enorme planicie aluvial en donde se encuentra la menor altitud (1 230 m.s.n.m.), además de otras planicies intermontanas de diferente dimensión y altitud. Las principales elevaciones se encuentran en el parte aguas, sin contar algunas montañas y lomeríos del interior.




---

<sup>1</sup> Metros sobre el nivel del mar.

# SUBCUENCA DEL RÍO TEUCHITLÁN JALISCO



## Simbología

-  Estado de Jalisco
-  Ameca
-  Teuchitlán

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

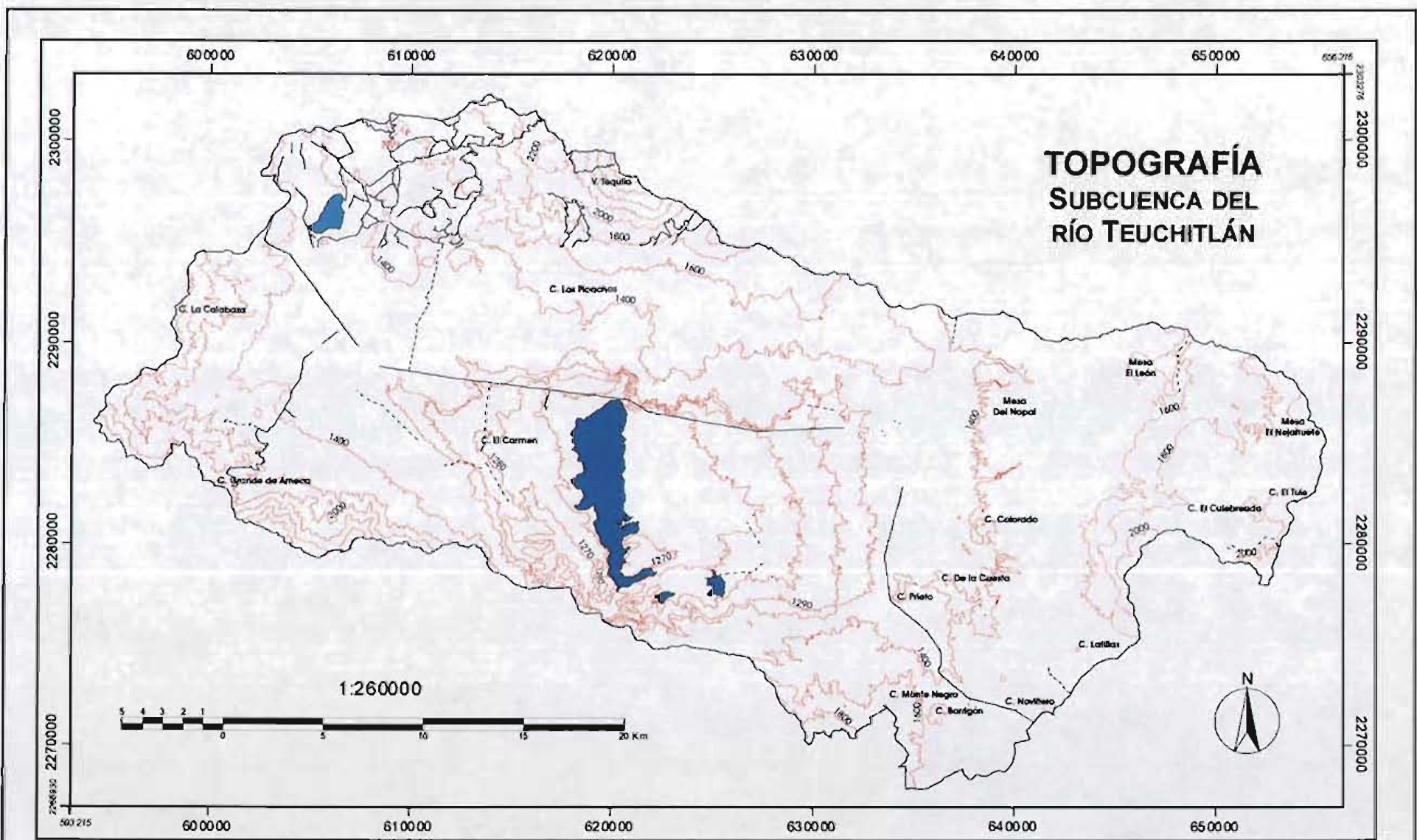
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Instituto de Ecología      Instituto de Geografía




Octubre, 2005

Mapa 2. Localización de la subcuenca del río Teuchitlán





**Simbología**

-  Ríos
-  Carretera
-  Terracería
-  Presa La Vega
-  Laguna Colorada

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**  
Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: INEGI, 1982  
Octubre, 2004

Mapa 3. Relieve de la subcuenca del río Teuchitlán

Es más fácil visualizar el relieve en el mapa altimétrico (*Mapa 4*) que en el mapa topográfico, porque representa con franjas de un mismo color todas las zonas que tienen la misma altitud (cuyo rango de altura depende del criterio que aplique el autor, en este caso fue de 126 metros).

En la subcuenca de estudio, la distribución del relieve es irregular. Corresponde la mayor área a la parte más baja y se reduce paulatinamente conforme asciende. La distancia vertical entre el punto más alto y más bajo de la subcuenca es de 1764 m.

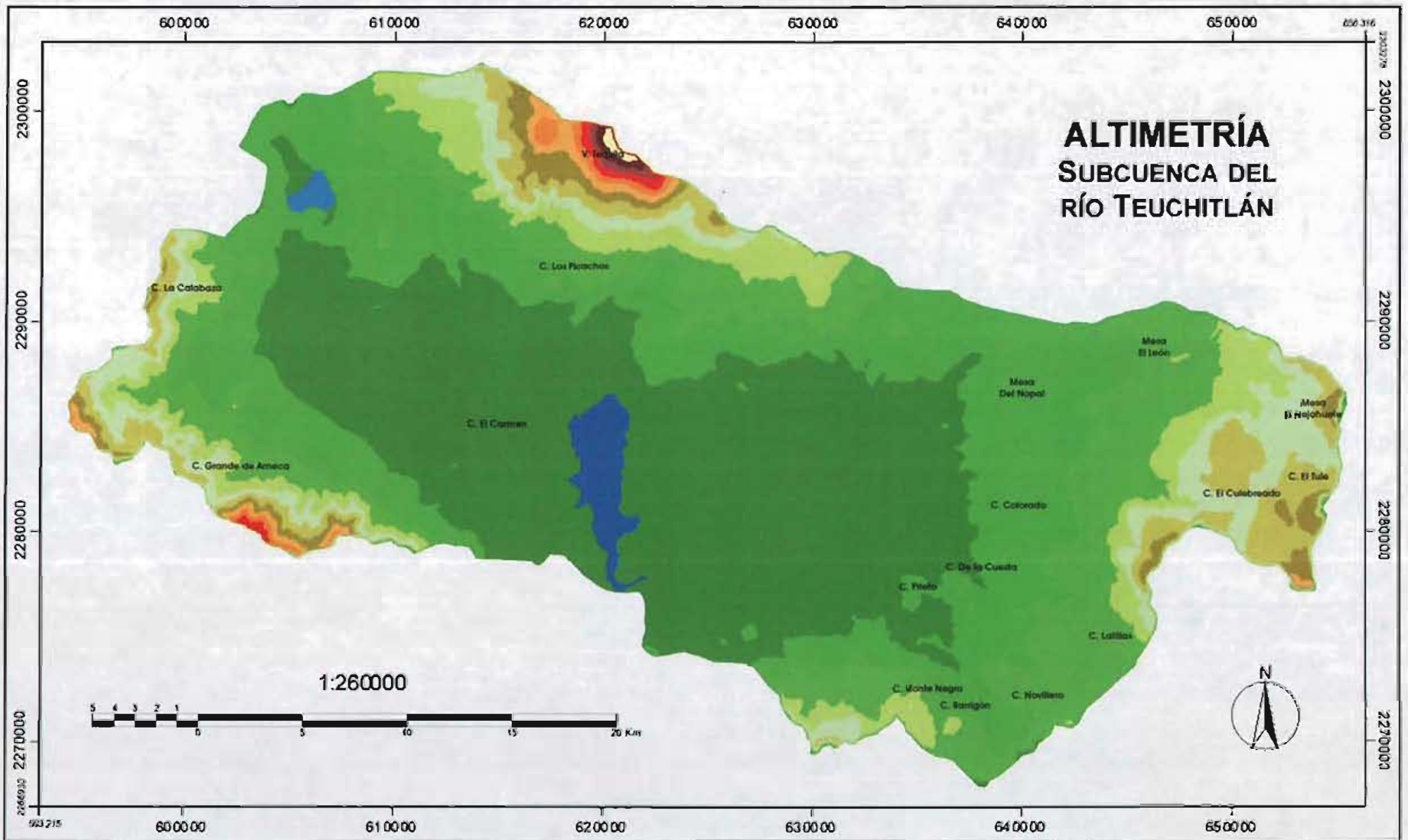
Para realizar un análisis altimétrico más completo de la subcuenca, se obtuvo la superficie en km<sup>2</sup> de cada piso altimétrico (*Tabla 8*); donde se puede observar tanto el área como el porcentaje que ocupa esta con respecto al total de la subcuenca de estudio.

*Tabla 8. Superficie de los pisos altimétricos (km<sup>2</sup>) de la subcuenca del río Teuchitlán.*



Piso altimétrico	Desnivel	Altura	Área en km <sup>2</sup>	% de área
2870 - 2744	126	1638	0.70	0.07
2744 - 2618	126	1512	1.05	0.11
2618 - 2492	126	1386	1.42	0.14
2492 - 2365	126	1260	2.37	0.24
2365 - 2239	126	1134	4.42	0.45
2239 - 2113	126	1008	7.47	0.76
2113 - 1987	126	882	17.77	1.80
1987 - 1861	126	756	45.52	4.61
1861 - 1734	126	630	61.97	6.28
1734 - 1608	126	504	74.25	7.52
1608 - 1482	126	378	159.34	16.14
1482 - 1356	126	252	251.29	25.46
1356 - 1230	126	126	359.58	36.43
<b>Total</b>			<b>987.15</b>	<b>100.00</b>

La distribución de los pisos altimétrico no es constante, pues el histograma sigue una curva regular. Son evidentes dos puntos de inflexión que permiten separar los pisos altimétricos en tres grupos (*Gráfica 2*). El primer grupo ocupa 3 pisos altimétricos, va de los 1230 a 1608 metros. La disminución visual entre un piso y otro es constante y uniforme. La mayor parte del área de toda la subcuenca (78.02%) se encuentra en estos primeros 378 metros de altitud, y por lo tanto, el volumen que ocupa el relieve también es mayor en ellos. El segundo ocupa el piso de 1608 a 2113 metros. El tercero va de los 2113 a los 2870 metros.

Los pisos más altos ocupan menor área ya que día con día los agentes erosivos las están reduciendo. Los sedimentos que estos producen se acumulan en las partes más bajas, incrementando principalmente el área del piso más bajo y por lo tanto, probablemente estén asolvando la Presa de La Vega (*Gráfica 2*).



**Simbología**

-  Presa La Vega
-  Laguna Colorada

**Altitud**

 2870 - 2744	 2239 - 2113	 1734 - 1608
 2744 - 2618	 2113 - 1987	 1608 - 1482
 2618 - 2492	 1987 - 1861	 1482 - 1356
 2492 - 2365	 1861 - 1734	 1356 - 1230
 2365 - 2239		

Elaboró: Itzla Calixto Albarrán

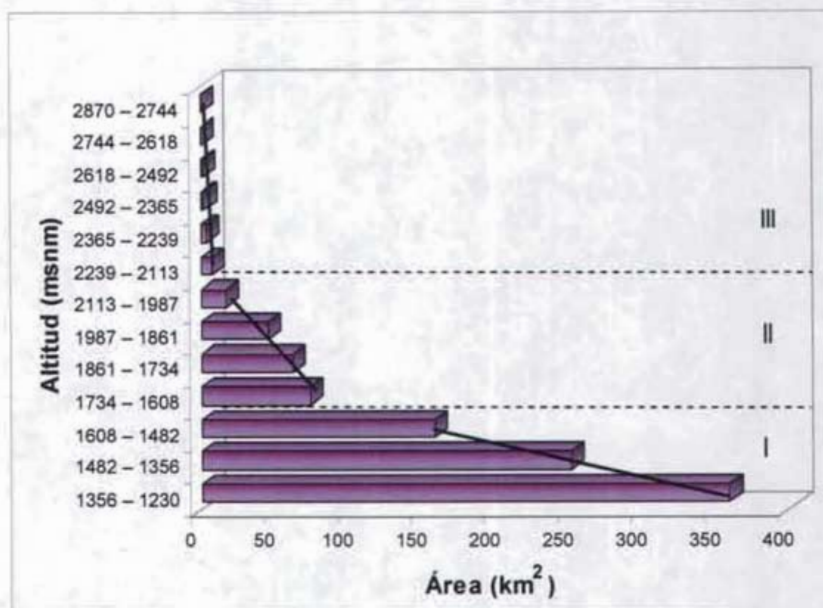
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: A partir del MDI  
Octubre, 2004

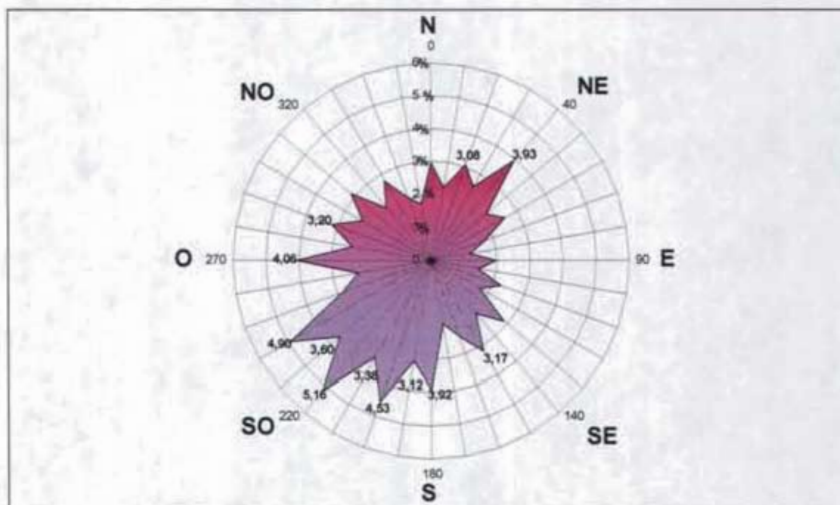
Mapa 4. Altimetría de la subcuenca del río Teuchitlán





Gráfica 2. Histograma de frecuencias altimétrica

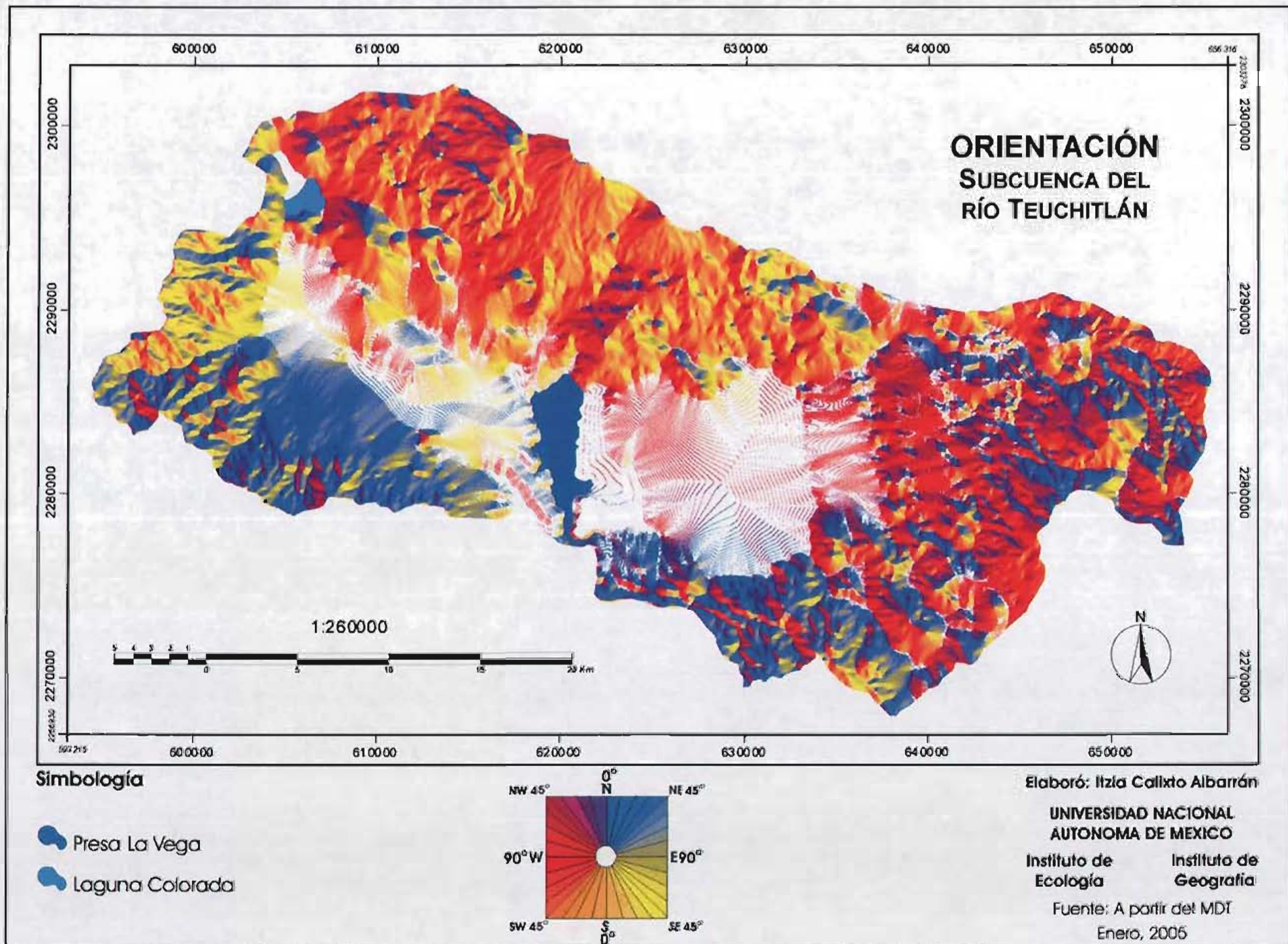
En cuanto a la orientación de las laderas de la subcuenca, éstas se orientan hacia los 180° - 270°. También predominan orientaciones de 270° a 360° (23.88%), de 0 a 90° (22.49%). La orientación de 90° a 180° es la menos frecuente (19.97%). La orientación que predomina es la SO y luego la NE (Gráfica 3, Mapa 5).



Gráfica 3. Orientación de las laderas en la subcuenca del río Teuchitlán

## 4.2. Clima

Las características del clima de la subcuenca se han definido a partir de la información de 12 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro del área de estudio o en sus cercanías. La ubicación de estas se puede apreciar en la *Tabla 9*.



Mapa 5. Orientación de las pendientes de la subcuenca del río Teuchitlán



**Tabla 9. Estaciones meteorológicas de la subcuenca del río Teuchitlán**

Clave	Nombre	Latitud grados	Latitud minutos	Longitud grados	Longitud minutos	Elevación	Período
14009	AMECA, AMECA	20	33	104	3	1248	1961-1980
							1986-1991
14010	ANTONIO ESCOBEDO	20	46	103	57	1360	1961-1989
14017	ATOTONILCO	20	34	102	31	1600	1963-1984
							1991
14066	GUADALAJARA	20	40	103	23	1583	1961-1987
							1991
14082	LA ESTANZUELA	20	40	103	48	1250	1961-1980
14089	LA VEGA	20	35	103	52	1250	1961-1983
							1991
14093	MAGDALENA	20	55	103	58	1359	1961-1968
							1970-1989
14113	PRESA HURTADO	20	29	103	40	1250	1961-1991
14121	RAYON 388	20	43	103	23	1567	1961-1983
14162	PRESA STA. ROSA	20	33	104	0	1755	1969-1990
14187	TEQUILA	20	53	103	50	1185	1961-1980
14292	ZAPOPAN	20	42	103	23	1700	1973-1983

Los datos recopilados para clasificar el clima principalmente son temperatura y precipitación en el período comprendido entre 1961 a 1991; se calcularon los valores promedio, tanto mensuales como anuales (*Tabla 10*).

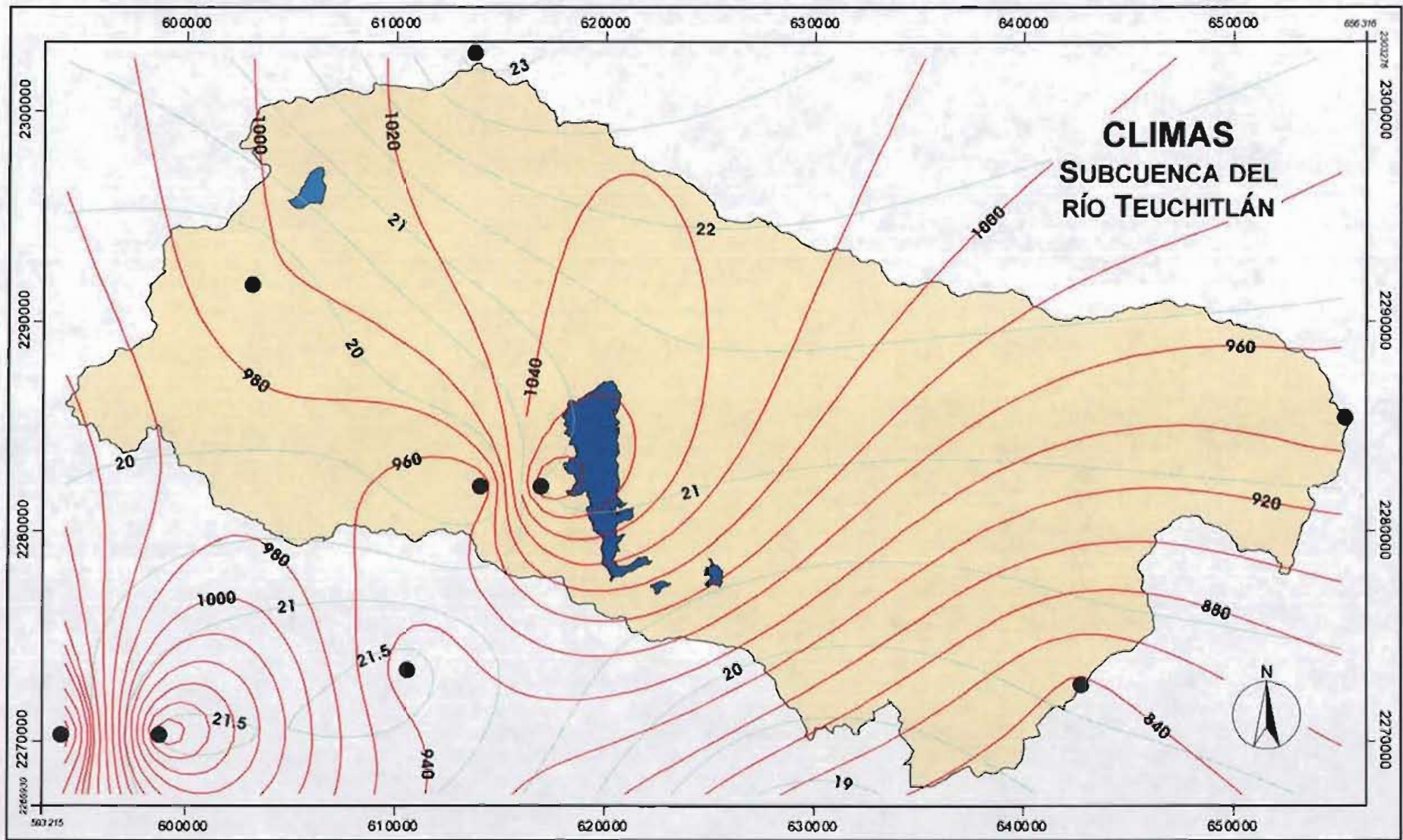
Con base en la distribución climática de Köeppen (1948), el clima en Teuchitlán corresponde al tipo C (templado). El régimen pluvial es el mismo que en la mayor parte de México, las lluvias ocurren durante los meses de verano (w).

Para caracterizar en forma más precisa el clima, la Información meteorológica de las estaciones se analizó de acuerdo con la clasificación climática de Köeppen, modificada por García (1988). Los datos se representaron en un mapa climatológico (*Mapa 6*), en donde se incluye el clima, el subtipo de clima, la distribución de la temperatura media mensual y la precipitación media mensual, así como la localización de la estación climatológica correspondiente (*Tabla 10*).

De acuerdo con la clasificación climática de García (1988). En la subcuenca de estudio existen 2 climas diferentes (A) C y Aw y 7 subtipos de clima. El clima Aw se denomina "clima caliente subhúmedo con lluvias en verano", no importa que a veces el mes más lluvioso no se halle incluido exactamente en esta estación. En estas zonas predominan las selvas altas o bajas y frecuentemente caducifolias. El clima (A) C se denomina "semicálido" y la temperatura media anual esta sobre los 18°C.






Tabla 10. Temperatura media mensual y media anual en °C y precipitación media mensual y media anual en mm.

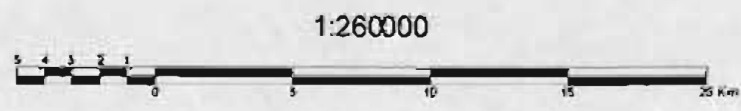
Clave	Estación	Evento	Meses													P/T	% P. Inv.	Osc	Tipo de Clima
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual				
14009	AMECA, AMECA	Temperatura	16.89	18.35	19.55	21.38	22.27	22.10	21.39	21.10	21.17	20.03	18.89	17.34	20.04	40.6	3.5	9.1	(A)Ca(w <sub>o</sub> )(w)(e)
		Precipitación	14.84	9.73	8.05	3.90	26.02	171.57	231.76	154.93	131.27	45.92	17.25	16.24	799.82				
14010	ANTONIO ESCOBEDO, (SMN)	Temperatura	15.50	16.50	18.31	20.30	22.00	23.54	21.47	21.07	21.71	20.10	17.09	16.75	19.53	50.60	2.8	8	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(e)
		Precipitación	17.23	11.37	7.60	6.93	37.70	197.37	287.95	205.42	153.80	66.35	17.17	18.52	996.00				
14017	ATOTONILCO	Temperatura	16.01	17.63	19.41	21.03	23.66	23.25	21.80	22.32	20.97	19.93	18.15	17.84	20.17	43.50	2	7.1	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(e)
		Precipitación	17.68	4.79	4.97	3.50	38.32	163.34	249.06	207.86	148.57	47.18	16.49	5.29	835.85				
14066	GUADALAJARA	Temperatura	15.63	16.54	19.29	21.34	23.38	22.69	20.24	20.98	20.16	19.70	17.30	15.81	19.42	47.70	2.2	7.8	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)g
		Precipitación	15.79	6.90	5.73	5.51	25.15	205.98	271.50	216.37	148.17	60.91	18.85	10.85	942.20				
14082	LA ESTANZUELA	Temperatura	16.93	17.59	19.90	22.92	24.54	24.89	22.81	22.52	23.39	21.90	19.20	16.09	21.06	52.80	3.6	8.1	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(e)w <sup>u</sup>
		Precipitación	20.63	10.27	11.24	8.95	32.14	221.15	336.61	183.71	176.93	64.77	9.65	22.63	1,098.67				
14089	LA VEGA	Temperatura	17.28	18.00	20.54	22.56	24.50	25.06	24.55	24.27	23.90	22.32	20.00	17.79	21.73	44.20	3	8.5	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(e)
		Precipitación	16.97	9.08	1.88	6.43	26.95	208.64	231.82	185.47	147.40	56.80	18.03	16.87	926.34				
14093	MAGDALENA	Temperatura	17.66	18.20	20.13	22.23	24.20	24.20	22.80	23.20	22.79	21.80	19.29	17.80	21.19	47.00	2.9	6.6	(A)Cb(w <sub>1</sub> )(w)(l <sup>i</sup> )
		Precipitación	14.81	9.66	7.61	7.47	24.61	202.11	273.50	231.31	148.04	53.26	11.10	10.30	893.79				
14113	PRESA HURTADO	Temperatura	14.50	15.20	17.20	19.40	21.10	21.40	20.10	20.20	20.10	19.10	18.40	14.80	18.20	43.80	3.8	6.8	(A)Cb(w <sub>1</sub> )(w)(l <sup>i</sup> )
		Precipitación	15.32	9.59	5.44	5.31	28.42	167.13	209.00	167.28	127.73	59.19	16.90	14.90	826.21				
14121	GUADALAJARA (RAYON 388)	Temperatura	17.93	18.94	21.10	23.57	24.50	23.17	22.20	22.30	21.43	19.92	18.30	21.30	21.22	44.10	3	6.6	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(l <sup>i</sup> )g
		Precipitación	15.10	7.44	7.71	7.90	20.77	184.88	272.40	214.95	150.92	57.69	18.81	15.60	950.78				
14162	VASO PRESA STA. ROSA	Temperatura	17.26	18.58	20.60	23.05	25.40	25.14	23.09	23.66	23.48	21.88	19.92	17.17	21.59	54.00	1.5	8.1	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(l <sup>i</sup> )g
		Precipitación	9.28	6.89	2.29	13.50	23.30	240.60	252.43	243.16	210.60	94.90	12.30	10.86	1,120.11				
14187	TEQUILA	Temperatura	19.50	21.00	23.10	24.20	26.20	26.50	24.50	24.50	24.30	23.80	21.60	19.90	23.20	44.3	2.1	7	Aw <sub>1</sub> (w)(l <sup>i</sup> )
		Precipitación	10.10	5.80	6.00	7.00	33.40	195.50	285.90	248.90	167.70	45.90	10.10	14.80	1,031.10				
14292	ESC. AGRIC. ZAPOPAN	Temperatura	17.50	19.28	21.08	23.44	24.88	23.32	22.21	22.23	22.36	21.21	20.20	18.30	21.33	44.10	3	6.6	(A)Ca(w <sub>1</sub> )(w)(l <sup>i</sup> )g
		Precipitación	27.71	10.23	1.79	6.23	19.32	158.30	296.43	220.93	160.96	33.93	29.78	9.26	974.86				



# CLIMAS SUBCUENCA DEL RÍO TEUCHITLÁN

## Simbología

-  Presa La Vega
-  Laguna Colorada
-  Precipitación mm
-  Temperatura °C
-  Estación climatológica



Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Instituto de  
Ecología

Instituto de  
Geografía

Enero, 2005

Mapa 6. Clima de la subcuenca del río Teuchitlán



Los subtipos de clima por estación son los siguientes:

*Ameca.* (A)Ca(w0)(w)e. Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal menor de 5 %, oscilación anual extremosa.

*Guadalajara.* (A)Ca(w1)(w)g. Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con marcha de la temperatura tipo ganges (el mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano).

*La Estanzuela.* (A)Ca(w1)(w)(e)w". Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal menor de 5 %, oscilación anual extremosa, presentando canícula (sequía Intra-estival; una pequeña temporada menos húmeda que se presenta en la mitad caliente y lluviosa del año).

*Antonio Escobedo, Atotonilco y La Vega.* (A)Ca(w1)(w)(e). Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal menor de 5 %, oscilación anual extremosa.

*Vaso Presa Sta. Rosa, Guadalajara y Zapopan.* (A)Ca(w1)(w)(i)g. Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal menor a 5%, con poca oscilación y marcha de la temperatura tipo ganges.

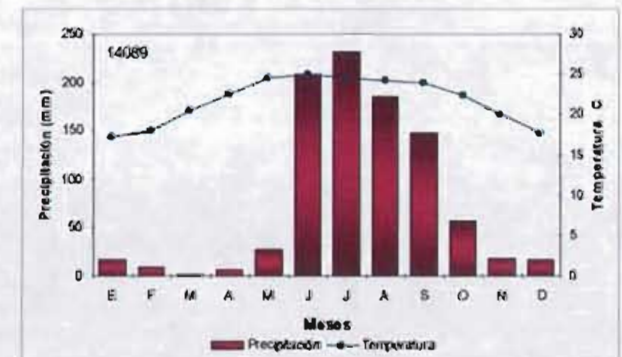
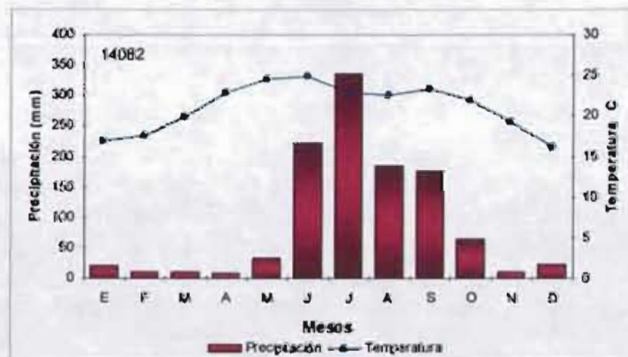
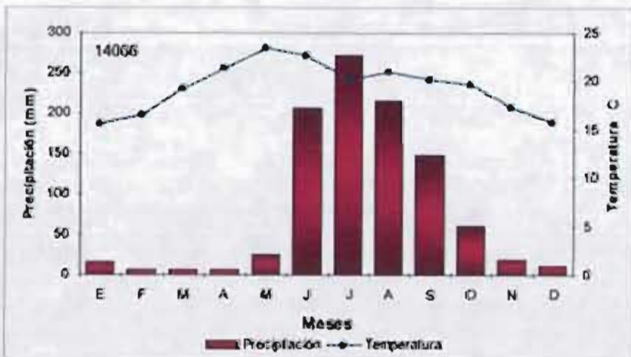
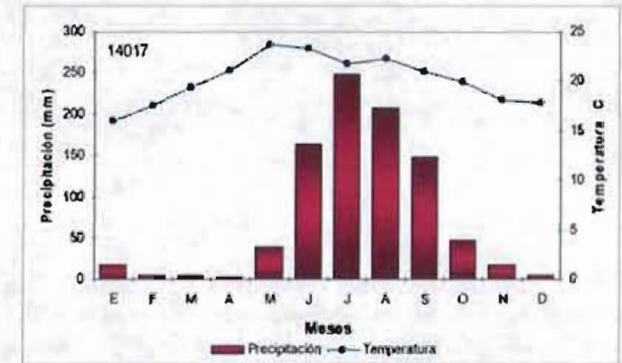
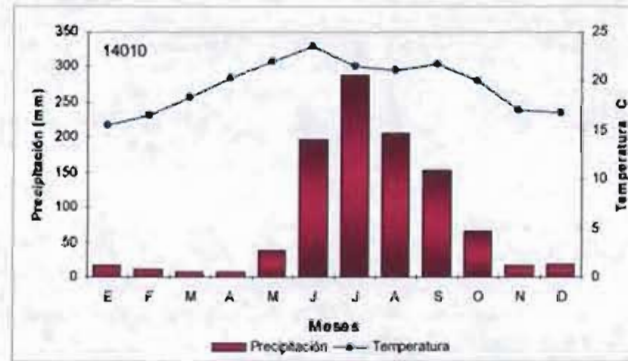
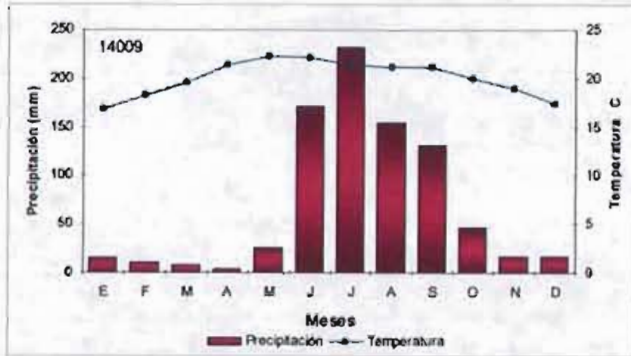
*Presas Hurtado y Magdalena.* (A)Cb(w1)(w)(i). Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, verano fresco largo, precipitación invernal menor a 5%, con poca oscilación anual.

*Tequila.* Aw1(w)(i). Cálido subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal menor de 5%, con poca oscilación anual.

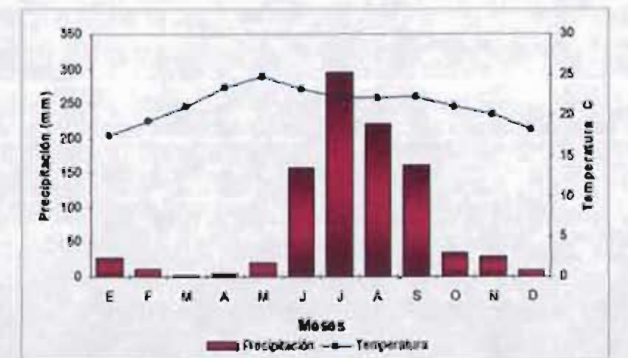
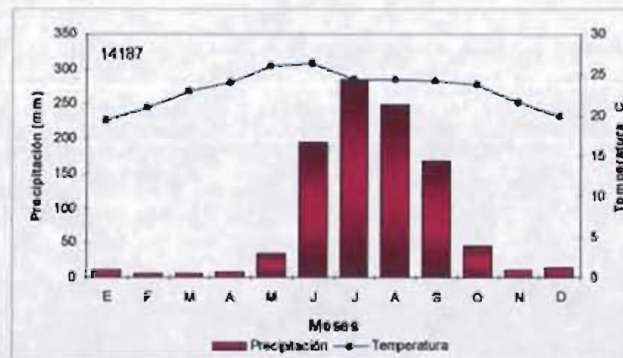
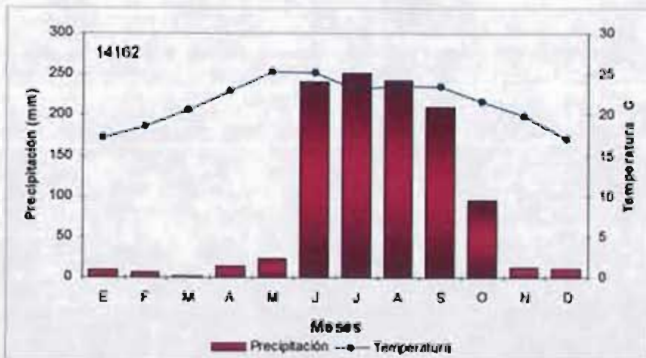
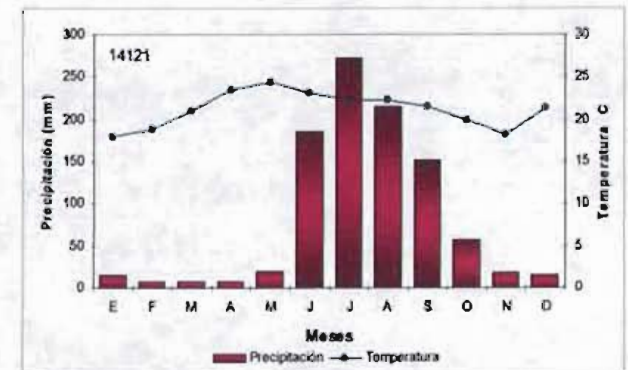
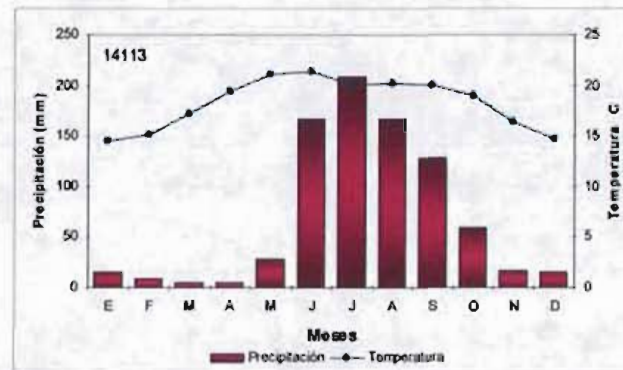
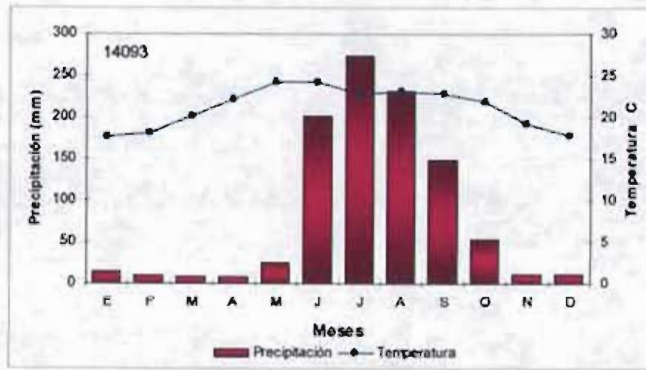
La marcha de la temperatura a lo largo del año tiene un comportamiento similar entre las diferentes estaciones meteorológicas (*Gráfica 3*) y sus pequeñas divergencias se deben a su diferencia de altura. Se presentan temperaturas promedio entre los 14.5 y 17.9°C en el mes más frío (enero), y la del mes más caliente (junio) varía entre 22.1 y 26.5°C; la temperatura promedio anual se encuentra entre 18 y 22°C. La excepción de este comportamiento se observa en la estación Tequila (14187), ya que la temperatura promedio en el mes más frío (enero) es de 19.5°C, la del mes más caliente (junio) es de 26.5° C y la marcha de temperatura anual es de 23.2° C. Estas características lo convierten en un clima cálido en tanto que las estaciones restantes tienen un clima semicálido.

La precipitación de la subcuenca se da en el verano (w), la precipitación media anual calculada mediante el método de isoyetas es de 965 mm. Su distribución espacial va de 826.21 mm en las zonas bajas y planas a más de 1 120.60 mm en las zonas altas de montaña. La distribución temporal en el año (*Gráfica 4*) se acentúa entre junio y septiembre con el 85.4% de la lluvia anual, durante los meses de transición (mayo y octubre) se recoge el 7.5% de la lluvia anual y entre noviembre y abril se registra el periodo más seco con el 7.1% de la lluvia anual.

Gráfica 4. Temperatura media mensual en °C y precipitación media mensual.



Gráfica 4. Temperatura media mensual en °C y precipitación media mensual (continuación).





### 4.3. Hidrografía

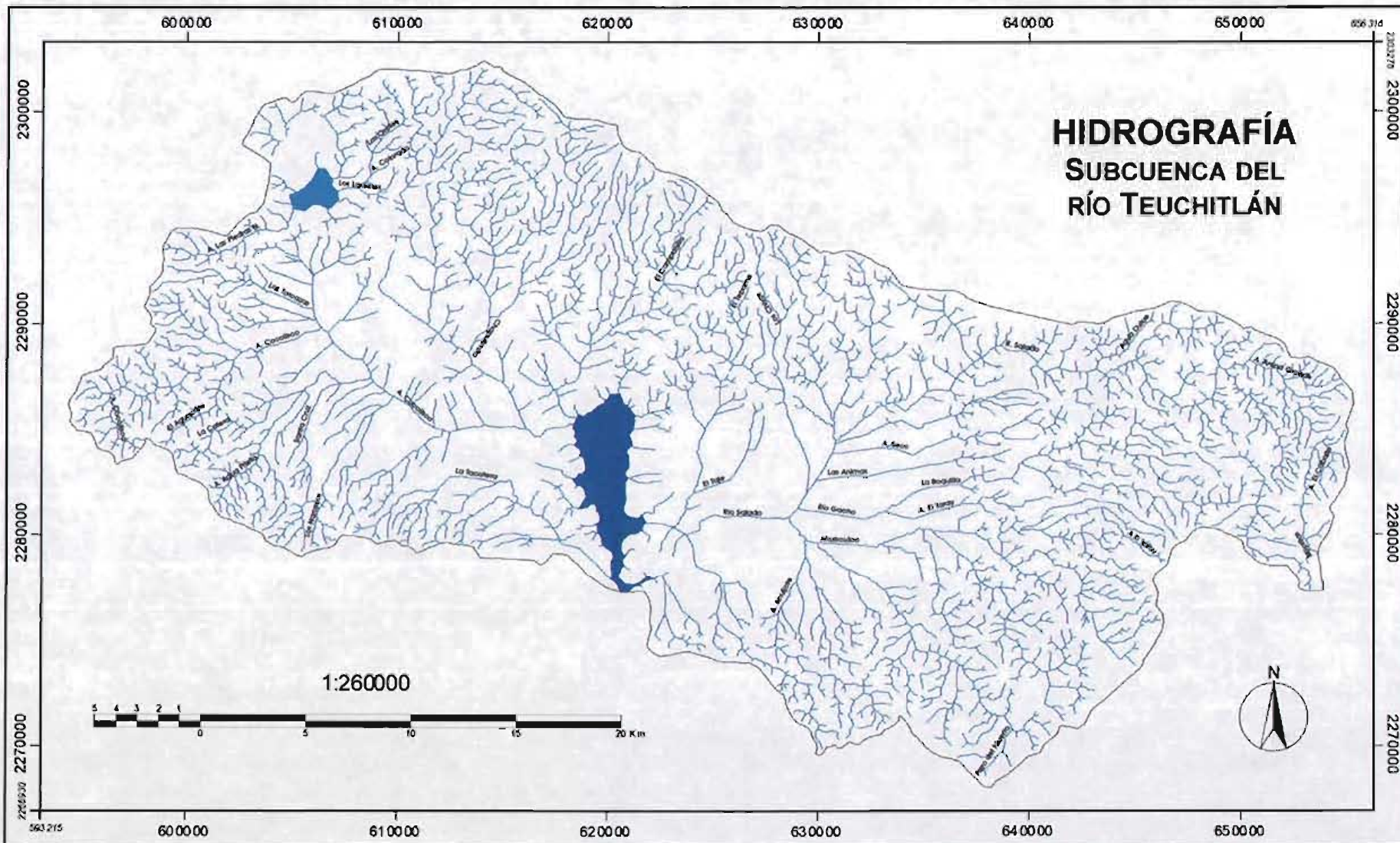
La hidrografía de la subcuenca (*Mapa 7*) está compuesta de numerosos manantiales, arroyos torrenciales, ríos permanentes, un cuerpo de agua que se ubica en la parte noroeste (Laguna Colorada) y una presa que ocupa la parte más baja: Presa La Vega.

En la zona Este, donde se ubica la sierra La Primavera existen aproximadamente 20 corrientes permanentes que nacen en el bosque del mismo nombre y que drenan hacia la cuenca del río Ameca, al oeste. La surgencia de agua más abundante se da en la zona de Agua Brava, donde nace el río Salado. Los ríos y arroyos más importantes de esta zona son: Ahuiculco. Las Tortugas, Zarco, Las Ánimas, La Villa y Agua Caliente. Otra fuente de abastecimiento que dependen de las recargas del bosque es la Presa de La Vega, ubicada en la parte sur de la subcuenca.




En la parte norte y central de la subcuenca del río Teuchitlán, la corriente principal es el río Salado, Cuisillos y el río Teuchitlán, y los arroyos de Chapulimita, Los Otates, El Agüilote, El Carrizo, Gamboa, Mezquite Gacho, Vadillo, Calderones, El Ahujote, Melchor, El Sixto, La Villita, Los Lobos y La Tabquera. Cuenta con manantiales como El Rincón y con algunos que son termales San Isidro, Volcanes y Mazatepec. Además de la presas de La Vega, existen las presas de San Juan de los Arcos, Agua Prieta, San Simón, La Lobera y Chapulimita.

La zona este y noroeste tiene muchos arroyos permanentes, siendo los principales la Mina, la Pila, las Torcasas, la Gloria, el Cocoliso, Aguacate, Piedra Bola, Santa Anita, Candelaria, Agua Prieta, Chapalimita, Santa Cruz, Carrizal, Calma, Hondo, Derramadero, Los Robles, Sidra, Los Laureles y Piedras Negras. En esta zona esta la Laguna Colorada y las presas Guarachilla y el Camen. El aporte de agua subterránea se manifiesta por algunos manantiales, que a lo largo del año aumentan o disminuyen su descarga, se observa que conforme transcurre la época seca del año la cantidad de descarga es menor que durante y después de la época de lluvia. Las corrientes permanentes están ligadas a la distribución de manantiales, siendo las de mayor importancia las de Agua Brava en el noreste y El Rincón al norte. Esto nos refleja la cantidad de manantiales que había en la subcuenca, muchos de los cuales pudieran estar debajo de la presa La Vega que se construyó en 1957, además estos manantiales sirven como balnearios. En planos de principios del siglo XX se localizan manantiales donde actualmente se encuentra el embalse (Brambila, 1928, Rodríguez, 1928).

La mayoría de los manantiales son aprovechados para abastecer de agua a los poblados aledaños. De igual manera la mayoría de los pozos y norias que hay dentro de la subcuenca se explotan con fines de proveer de agua a los pobladores del área y algunas industrias como los ingenios de Tala, Ameca y Bellavista (CONANP, 2000).



**Simbología**

-  Ríos
-  Presa La Vega
-  Laguna Colorada

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: CETENAL, 1974  
Noviembre, 2004

Mapa 7. Hidrografía de la subcuenca del río Teuchitlán

### ➤ 4.3.1. Patrón de drenaje

La red hidrográfica de la zona de estudio tiene una configuración natural, en su forma ordenada o regular; en particular dendrítica y radial. La mayor parte de la subcuenca tiene una configuración de tipo dendrítica, a la que también se le llama arborescente por su similitud con la configuración de un árbol; etimológicamente el nombre proviene del vocablo griego δένδρον (*dendron*) – árbol. Este tipo de configuración es la más común, su distribución sigue todas direcciones sobre la superficie, pero, siempre a favor de la pendiente, por lo mismo se van uniendo las corrientes una con otra en ángulos agudos.

Si se observa detalladamente la hidrografía (*Mapa 7*) y se correlaciona con la topografía (*Mapa 3*), se tiene que el patrón dendrítico localmente cambia su comportamiento a consecuencia de la longitud e inclinación de la ladera y de la litología del relieve.

En la zona de montaña, particularmente en los cerros La Calabaza, Grande de Ameca, San Miguel, Tomasillo El Pedernal y el volcán Tequila, las primeras corrientes son cortas y se van alargando a medida que descienden. Por el contrario, donde el terreno no alcanza grandes alturas y la pendiente es de poca inclinación como es el caso de los cerros El Carmen, Los Picachos, Monte Negro, La Cuesta y Novilleros, las primeras corrientes no son tan cortas como las anteriores, inclusive alcanzan longitudes de varios kilómetros.

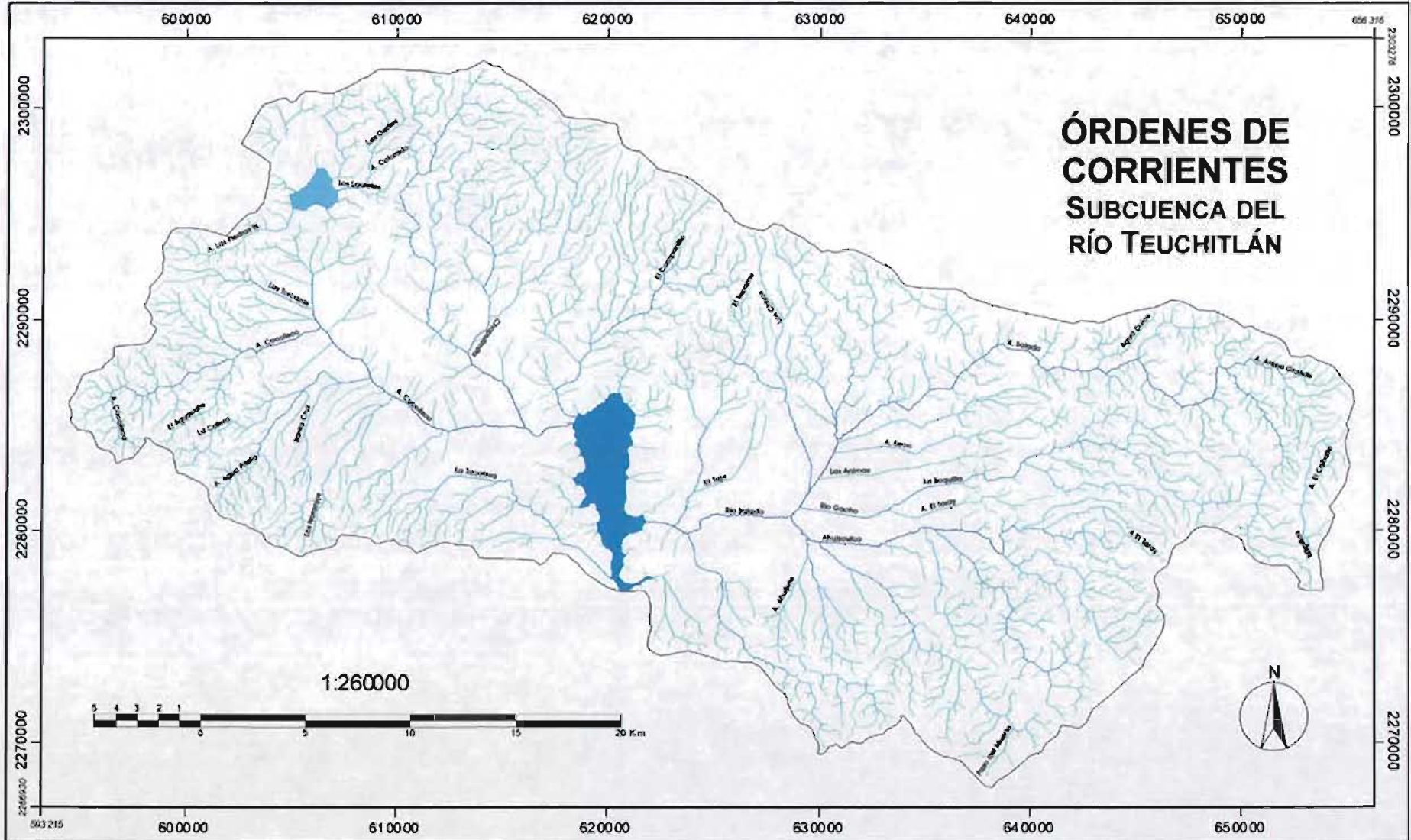
### ➤ 4.3.2. Clasificación de órdenes de corrientes

A partir del mapa de clasificación de corrientes (*Mapa 8*) se jerarquizó toda la red hidrográfica para conocer cómo se distribuyó cuantitativamente el drenaje dentro de la subcuenca, para lo cual se tuvo que contar las corrientes que existen de cada orden y conocer la relación de confluencia.









*Tabla 11. Distribución de corrientes por número de orden*

No. de orden	No. de corrientes	Relación de confluencia	Distribución corrientes
Primer	1787		3.25
Segundo	387	4.62	2.59
Tercero	88	4.40	1.94
Cuarto	23	3.83	1.36
Quinto	6	3.83	0.78
Sexto	2	3.00	0.30
Total	2294		





**Simbología**

- |   |  |  |
|---|--|--|
|  Laguna Colorada |  1er. orden |  4to. orden |
|  Presa La Vega   |  2o. Orden  |  5to. Orden |
|   |  3er. Orden |  6to. Orden |

Elaboró: Itzia Callixto Albarrán

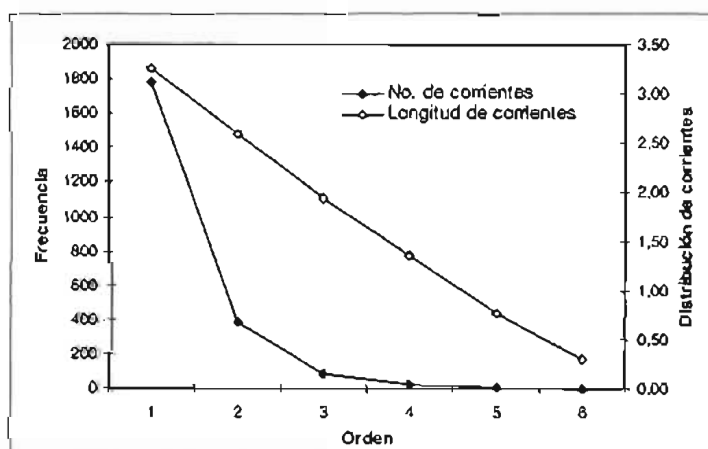
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO  
Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: CETENAL, 1974  
Noviembre, 2004

Mapa 8. Clasificación de órdenes de corriente de la subcuenca del río Teuchitlán

En la subcuenca se encontró un número elevado de corrientes de primer y segundo ordenes, por lo cual se puede inferir que el modelado de la superficie es relativamente joven y tiene fases de incisión vertical, lo que significa que la erosión hídrica lineal es potencialmente alta (si no hay vegetación disminuye la infiltración y aumenta el escurrimiento), concentrándose sobre todo en las corrientes de los primeros órdenes, lo que ocasiona el acarreo de grandes cantidades de material, mismo que posteriormente se deposita en las zonas planas. Si ocurriera lo contrario y los primeros órdenes no fueran numerosos y en su lugar hubiera pocos órdenes, pero de longitudes considerables, significaría que el modelado del relieve tiene fases de ensanchamiento y de depósito al estar alcanzando su madurez.

El número de corrientes de un orden en proporción es mucho menor a sus órdenes anteriores y posteriores, por lo que se observa una tendencia lineal (*Gráfica 5*). Sin embargo, ésta no es totalmente lineal, se aprecia un ligero quiebre entre el quinto y sexto orden, debido quizá al trazado de canales, los cuales interfieren en los escurrimientos naturales. Los escurrimientos “encauzados” se construyen en las partes más bajas y los últimos órdenes disminuyen en número.

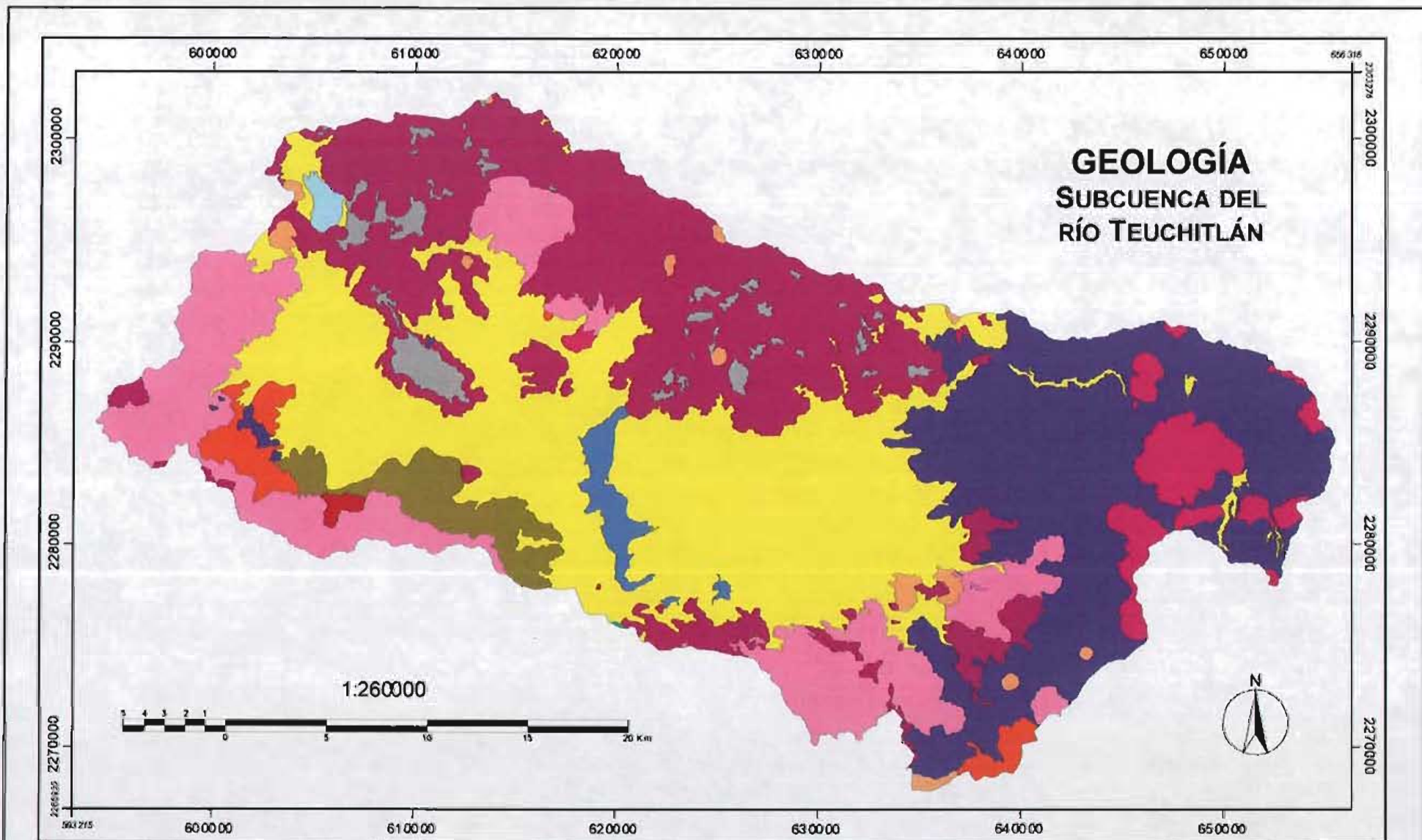


*Gráfica 5. Distribución de corrientes en función del orden en la subcuenca del río Teuchitlán.*

#### 4.4. Geología

La región de estudio se localiza en el Eje Neovolcánico Transversal. La subcuenca tiene una forma alargada en dirección ENE-WSW, su fondo está formado principalmente por formaciones del cuaternario por arena y localmente en el sur por conglomerados descansando en las tobas y en los basaltos. (*Mapa 9*). La formación volcánica más antigua corresponde a tobas ácidas sobre granitos intrusivos del Cretácico que no afloraron en la subcuenca del río Teuchitlán. Las tobas del Oligoceno-Mioceno se localizan al sur de la subcuenca y también aparecen localmente en su parte norte, las cuales fueron cubiertas por formaciones basálticas del Plioceno –Cuaternario y forman el principal relieve de la región (volcán Tequila); estos basaltos cubren la parte media del área de estudio aflorando esencialmente en la zona norte.





# GEOLOGÍA SUBCUENCA DEL RÍO TEUCHITLÁN

## Simbología

- |                 |                       |                  |          |
|-----------------|-----------------------|------------------|----------|
| Presa La Vega   | Aluvial               | Brecha volcánica | Riollita |
| Laguna Colorada | Andesita              | Extrusiva ácida  | Toba     |
|                 | Arenisca-conglomerado | Lutita-arenisca  | Vitrea   |
|                 | Basalto               | Residual         |          |

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: CETENAL, 1974  
Octubre, 2004

Mapa 9. Geología de la subcuenca del río Teuchitlán



La Sierra de La Primavera es una fracción del Eje Neovolcánico Transversal, su origen es muy reciente y se inicia cuando ocurrieron las erupciones volcánicas hace 120 000 años (Pleistoceno Superior) y finalizaron en los años 30 000 a 20 000 A. C. (Holoceno), tiempo durante el cual se emitieron una serie de flujos piroclásticos estimados en el orden de  $20 \text{ Km}^3$ , que cubrieron un área aproximada de  $700 \text{ Km}^2$  distribuidas en su mayor parte sobre lo que hoy es el área metropolitana de Guadalajara.

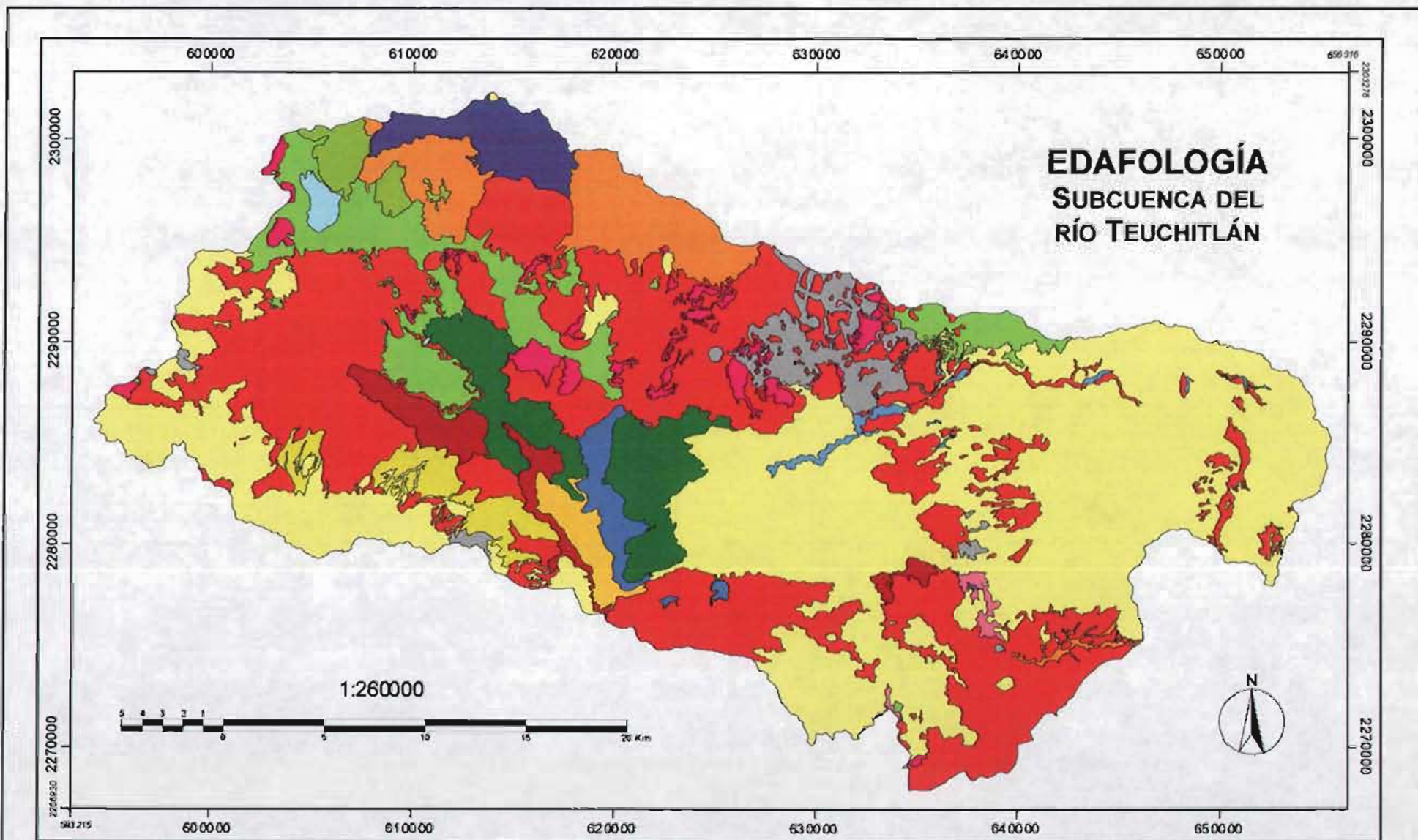
Al ocurrir este evento se provocó una depresión que originó un lago, actualmente extinto, de un diámetro aproximado de 11 kilómetros; en éste se depositaron sedimentos lacustres y vulcano-sedimentarios, sobre los cuales, o intercalándose con estos, fluyeron algunos derrames de lava (riolitas), dando lugar a mesetas o bien formando domos como es el caso de los Cerros Pelón, Planillas, Nejahuete, Mesa de León y Chapulín, en los cuales se observan aún diversas estructuras primarias típicas de edificios volcánicos jóvenes, como morfología y cráteres bien conservados (CONANP, 2000).

#### 4.5. Edafología

De acuerdo con la clasificación de suelos de la FAO-UNESCO aplicada por CETENAL (1977) e INEGI (1989) en la subcuenca del río Teuchitlán (*Mapa 10*), los suelos que se encuentran son: andosol, cambisol, feozem, fluvisol, litosol, luvisol, planosol, regosol y vertisol. Los suelos predominantes son el feozem y el regosol, que en términos generales son suelos susceptibles a la erosión en zonas con pendientes pronunciadas, pudiendo ser estos una fuente de aportación de sedimentos en la subcuenca de estudio.

El feozem se encuentra en diferentes zonas climáticas, como pueden ser semiáridas, templadas o tropicales muy lluviosas y en diferentes tipos de pendientes del terreno, ya sea plano o montañoso. Se caracteriza por tener una capa superior oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.

El feozem en terrenos planos, si se emplea con agricultura de riego o temporal tiene una alta productividad en granos, legumbres u hortalizas; sobre laderas tiene rendimientos bajos y se erosionan con facilidad. Si se utiliza para pastoreo o ganadería tienen resultados aceptables. Este suelo se localiza en una gran parte de la subcuenca (40%), aunque predomina en la parte plana, también se le encuentra sobre el pie de monte, en los lomeríos e inclusive sobre zona montañosa. En él se practica principalmente agricultura de temporal, la vegetación natural predominante es de matorral (CETENAL, 1977).



**EDAFOLOGÍA  
SUBCUENCA DEL  
RÍO TEUCHITLÁN**

**Simbología**

- |  |                 |  |                  |  |                  |  |                  |
|--|-----------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|
|  | Presa La Vega   |  | Andosol ocrio    |  | Feozem lúvico    |  | Planosol eutríco |
|  | Laguna Colorada |  | Cambisol crómico |  | Fluvisol eutríco |  | Planosol mólico  |
|  |                 |  | Cambisol eutríco |  | Litosol          |  | Regosol eutríco  |
|  |                 |  | Cambisol vertico |  | Luvisol crómico  |  | Vertisol pelíco  |
|  |                 |  | Feozem haplícico |  | Luvisol vertico  |  |                  |

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: CETENAL, 1974  
Octubre, 2004

Mapa 10. Edafología de la subcuenca del río Teuchitlán

El regosol se caracteriza por no presentar horizontes, en general es de color claro, con parecido a la roca que los subyace y de la cual se origina. Se encuentra con los litosoles o en afloramientos de rocas o de tepetate. Es un suelo totalmente inmaduro, someros, de fertilidad variable y su utilidad está condicionada por su profundidad. Se localiza en dos zonas: en la zona oeste, ocupa la parte alta e intermedia de los cerros Grande de Ameca, La Tetilla y Los Pericos; y en la parte sureste, en la mayor parte de las laderas y en la parte superior de la Sierra La Primavera están cubiertas por este suelo. Este tipo de suelo está presente también en la planicie ubicada al este de la Presa de La Vega (CETENAL, 1977).

Los suelos restantes se encuentran en poca proporción dentro de la subcuenca. El Andosol se localiza en la zona noroeste de la subcuenca, en las inmediaciones del volcán Tequila. El cambisol, en términos generales se encuentra en la parte central de la subcuenca, principalmente en la parte norte y oeste del pueblo Lucio Blanco y al este y norte del pueblo de Teuchitlán. Una buena parte se localiza al oeste de la Presa de La Vega. De forma más aislada se observa al noroeste de la subcuenca, en las inmediaciones de la Laguna Colorada. El Fluvisol está a las orillas del río Salado, aguas arriba de la Presa Chicamilpa. El Litosol se distribuye en la zona NNW de la subcuenca, ocupa preferentemente las cimas y laderas de los cuerpos montañosos y lomeríos. El luvisol se localiza principalmente en el extremo noroeste de la subcuenca, aunque de manera aislada también hay en la zona noreste. En el extremo noroeste se distribuye alrededor de la Laguna Colorada, en las cercanías de la Presa La Huarachilla y en el extremo noroeste del pueblo de Teuchitlán; de hecho se aprecia un corredor que corre en dirección noroeste desde Teuchitlán hasta la Laguna Colorada. En el extremo noreste de la subcuenca, se ubica en la parte norte del Balneario Los Chorros de Tala. En el se práctica agricultura de temporal y pastoreo; la vegetación original consiste en matorral, combinado con bosque, en algunas zonas hay erosión hídrica fuerte sobre todo en la zona de Los Chorros de Tala. El planosol ocupa parte de la planicie central de la subcuenca, especialmente al este y oeste de la Presa de La Vega; también se le ubica en las cercanías de los poblados de San Ignacio Portes Gil y el Amarillo cerca del cerro El Carmen. Finalmente, el vertisol se encuentra sobre todo en la planicie central, al oeste de la Presa de La Vega, además de algunos valles dispuestos en el interior de toda la subcuenca.

#### 4.6. Uso de suelo

La evaluación del cambio de uso del suelo permite conocer las causas de su impacto sobre los ecosistemas. En nuestro caso se evaluó el cambio en la cobertura vegetal y la deforestación. La cobertura vegetal es muy importante desde el punto de vista ambiental, ya que funciona como zona de captación de agua, protección del suelo contra la erosión, refugio de innumerables especies de fauna, absorbe CO<sub>2</sub> y, a su vez, producen oxígeno, regulan el clima, protegen cuencas hidrológicas, y favorecen ciclos bioquímicos como los del fósforo, azufre y nitrógeno. El daño a estos sistemas naturales provoca el desequilibrio de esos procesos. Es por tanto importante evaluar el cambio de uso de suelo, conocer sus causas y el impacto que tiene sobre los ecosistemas naturales.

A partir de 1970 con el fin de estimar la superficie de los diferentes usos de suelo, el INEGI generó las cartas de uso de suelo y vegetación con escala 1:50 000 de Tequila, Tala, Etzatlán, Ameca y Guadalajara Oeste (INEGI, 1974, 1975, 1974, 1974 y 1974), elaboradas a partir de fotografías aéreas. En estas cartas se identificaron cinco tipos de vegetación primaria (bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino-encino, bosque de sauce y selva baja caducifolia), así como diferentes zonas alteradas por actividades agrícolas, otras con vegetación secundaria (arbórea, arbustiva o herbácea) y áreas sin vegetación aparente (zonas urbanas, banco de material y zonas erosionadas) (*Tabla 12*).

El análisis de las cartas de uso de suelo y vegetación para los años 70 mostró que el 31.27% del área total de la subcuenca (334.48 km<sup>2</sup>) es cubierta forestal. De hecho, sólo el 13.58% de la superficie total es bosque de encino-pino, el 5.98% es bosque de encino, el 1.92% es bosque de pino-encino, el 0.29% es selva baja subcaducifolia y el 0.02% sauce. La vegetación primaria puede presentarse con parches de vegetación secundaria, pastizal, matorral y erosión hídrica. La vegetación no natural corresponde a 9.29% de vegetación secundaria, 6.97% de pastizal, 6.78% de matorral y 0.30% área con erosión hídrica. Es importante mencionar la considerable proporción de superficie dedicada a la agricultura (461.06 km<sup>2</sup>), ya que el 33.52% de la superficie total es agricultura de temporal (358.53 km<sup>2</sup>) y 9.59% (102.53 km<sup>2</sup>) es agricultura de riego. La zona urbana es poco significativa ya que sólo ocupa el 0.75% (8.03 km<sup>2</sup>) del área total de la subcuenca (*Tabla 12*).

A continuación hago una breve descripción de los tipos de vegetación primaria (*Mapo 11*):

*Bosque de encino FBL(Q)*. Su localización está restringida a las zonas altas de la subcuenca en altitudes mayores de 1800 m.s.n.m. Se presentan principalmente en suelos tipo regosol y feozem. Ocupa la parte alta e intermedia de los cerros Grande de Ameca, La Tetilla y Los Pericos. Una pequeña proporción de este tipo de bosque se localiza en la zona del volcán Tequila que se caracteriza por la presencia de suelos de tipo andosol.

*Bosque de encino-pino FBL(Q)-FBC(P)*. Se establece en suelos maduros y someros de tipo regosol. Es la asociación más extendida y se desarrolla principalmente en la zona este de la subcuenca en la Sierra de La Primavera entre los 1600 y 2000 m.s.n.m. Pequeños parches de este tipo de bosque se encuentran en el sureste, oeste y noreste de la subcuenca.

*Bosque de pino-encino FBC(P)-FBL(Q)*. Se encuentra en parches intercalados con el bosque de encino-pino, en suelos de tipo regosol. Se localizan en la zona de la Sierra de la Primavera (Este) en pequeños grupos aislados; y también hay una pequeña área en el oeste de la subcuenca.

*Bosque de sauce (FBg(Sx))*. Este tipo de vegetación se encuentra en la parte noroeste de la subcuenca y se presenta en suelos tipo feozem.

*Selva baja caducifolia FSb(sc)*. Se localiza al este de la presa de La Vega; es un pequeña área de 3.2 km<sup>2</sup>, y está asociado a suelos de color obscuro, poco profundos y de fertilidad variable.



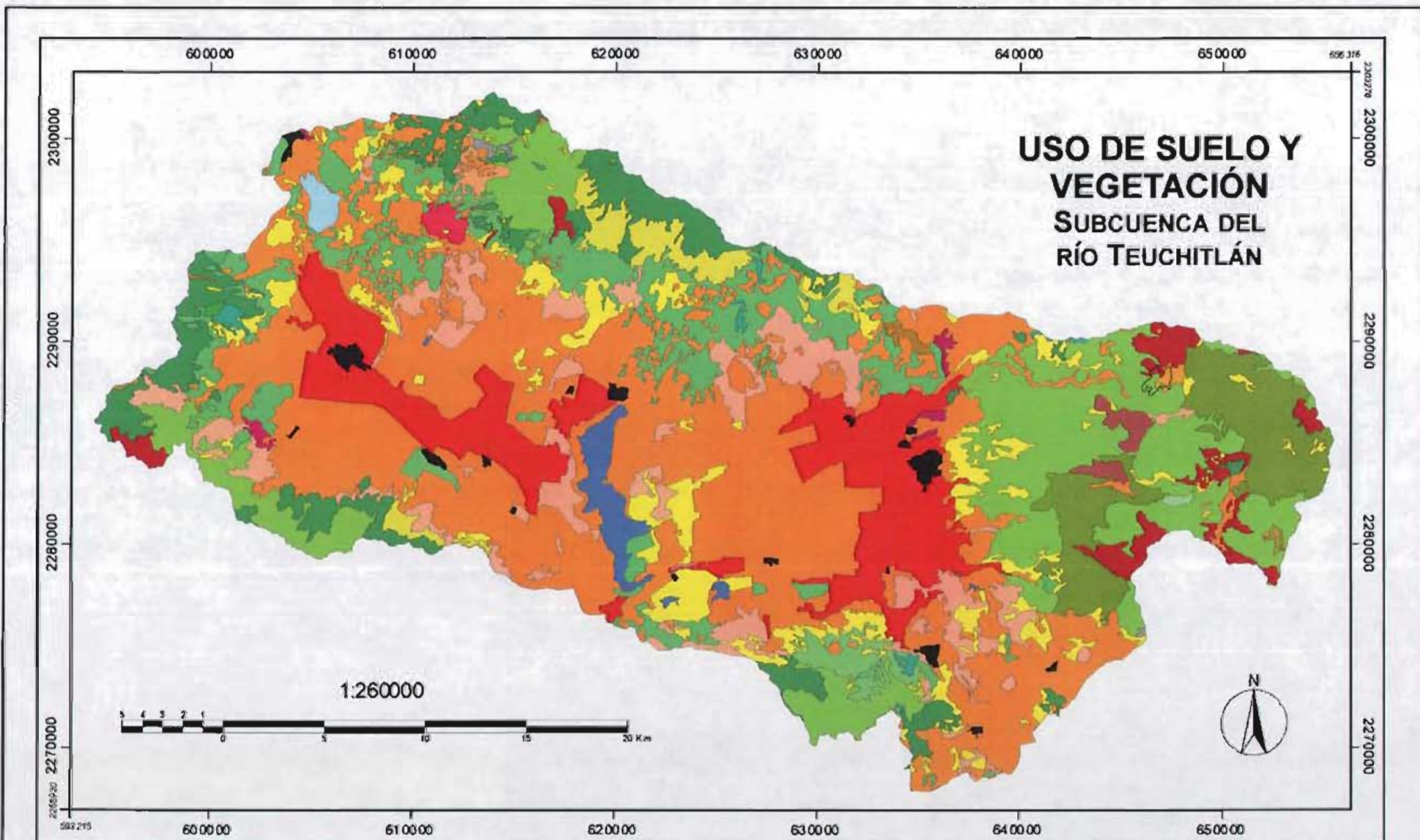
La vegetación secundaria (Vs) comprende grandes manchones y es común en toda la zona; es producto del aprovechamiento del bosque que fue utilizado como recurso forestal y permitió el establecimiento de áreas de cultivo. Bajo el sistema tradicional de roza-tumba-quema se van creando zonas con vegetación secundaria. De hecho, se puede observar que las áreas con esta vegetación siempre se localizan en una zona de transición entre la zona boscosa y las áreas agrícolas.

En la subcuenca hay áreas con un aprovechamiento permanente. La agricultura de temporal (Atp) es la principal actividad rural en la zona de estudio (358.53 km<sup>2</sup>), principalmente se produce agave. La agricultura de riego (Ar) también es una actividad importante, ya que se tiene una superficie irrigada de 102.53 km<sup>2</sup>, donde se produce arroz y caña de azúcar.

**Tabla 12. Extensión de las formaciones vegetales prevalecientes en la subcuenca del río Teuchitlán**

Categoría	Clave	Superficie km <sup>2</sup>	Porcentaje %
Cuerpo de agua	Agua	0.032	0,00
Agricultura de riego	Ar	102.53	9,58
Agricultura de temporal	Atp	358,53	33,48
Erosión hídrica fuerte con pastizal inducido	Ehf-Pi	2.15	0,20
Erosión hídrica fuerte con pastizal inducido y vegetación secundaria	Ehf-Pi-S(Ms)	1.07	0,10
Bosque de pino encino	FBC(P)-FBL(Q)	20.56	1,92
Bosque de pino encino con erosión hídrica fuerte	FBC(P)-FBL(Q)-Ehf	5.16	0,48
Bosque de pino encino con pastizal inducido	FBC(P)-FBL(Q)-Pi	1.17	0,11
Bosque de pino con pastizal inducido y vegetación secundaria	FBC(P)-Pi-S(Ms)	3.09	0,29
Bosque de sauce	FBg(Sx)	0.24	0,02
Bosque de encino	FBL(Q)	64.01	5,98
Bosque de encino con erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-Ehf	0.64	0,06
Bosque de encino-pino	FBL(Q)-FBC(P)	145.20	13,56
Bosque de encino-pino con erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-FBC(P)-Ehf	52.36	4,89
Bosque de encino-pino con pastizal inducido	FBL(Q)-FBC(P)-Pi	0.96	0,09
Bosque de encino con matorral inducido	FBL(Q)-Mi	21.68	2,02
Bosque de encino con matorral inducido y erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-Mi-Ehf	0.25	0,02
Bosque de encino con pastizal inducido	FBL(Q)-Pi	3.58	0,33
Bosque de encino con pastizal inducido y erosión hídrica fuerte	FBL(Q)-Pi-Ehf	0.16	0,01
Bosque de encino con pastizal inducido y erosión hídrica moderada	FBL(Q)-Pi-Ehm	0.47	0,04
Bosque de encino con pastizal inducido y vegetación secundaria	FBL(Q)-Pi-S(Ms)	0.04	0,00
Bosque de encino con pastizal natural	FBL(Q)-Pn	0.75	0,07
Bosque de encino con pastizal natural con matorral inducido	FBL(Q)-Pn-Mi	9.68	0,90
Bosque de encino con vegetación secundaria y pastizal inducido	FBL(Q)-S(Ms)-Pi	1.39	0,13
Selva baja caducifolia	FSb(sc)	3.10	0,29
Matorral	Mal	72.50	6,77
Pastizal	Pas	74.60	6,97
Vegetación secundaria	Vs	99.35	9,28
Presas de La Vega	PLaVega	12.81	1,20
Laguna Colorada	LColorada	3.50	0,33
Presas San Juan de los Arcos	PSJArcos	0.087	0,01
Presas Agua Prieta	PAPrieta	0.612	0,06
Presas Carrizal	PCarrizal	0.019	0,00
Presas Chapulimita	PChapulimita	0.025	0,00
Presas Chicamilpa	PChicamilpa	0.008	0,00
Presas Huarachilla	PHuarachilla	0.087	0,01
Presas San Simón	PSSimón	0.304	0,03
Población	Pob	8.03	0,75
Total		1,070.73	100,00





### Simbología

Presa La Vega	Ehf-Pi-S(Ms)	FBg(Sx)	FBL(Q)-FBC(P)-Pi	FBL(Q)-Pi-Ehm	Fsb(sc)
Laguna Colorada	FBC(P)-FBL(Q)	FBL(Q)	FBL(Q)-Mi	FBL(Q)-Pi-S(Ms)	Matorral
Ar	FBC(P)-FBL(Q)-Ehf	FBL(Q)-Ehf	FBL(Q)-Mi-Ehf	FBL(Q)-Pn	Pastizal
Atp	FBC(P)-FBL(Q)-Pi	FBL(Q)-FBC(P)	FBL(Q)-Pi	FBL(Q)-Pn-Mi	Población
Ehf-Pi	FBC(P)-Pi-S(Ms)	FBL(Q)-FBC(P)-Ehf	FBL(Q)-Pi-Ehf	FBL(Q)-S(Ms)-Pi	Vs

Elaboró: Itzia Callixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Instituto de  
Ecología

Instituto de  
Geografía

Fuente: CETENAL, 1974

Octubre, 2004

Mapa 11. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca del río Teuchitlán



## V. RESULTADOS

### 5.1. Factores involucrados en el análisis de la subcuenca

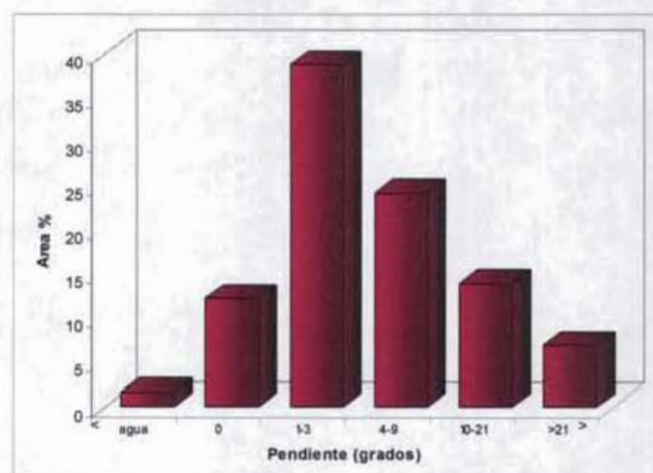
#### ➤ 5.1.1. Análisis de la superficie

Se calculo la densidad de vegetación, el material erosionado y la sedimentación en la subcuenca del río Teuchitlán con el fin de relacionarlo con la pérdida de biodiversidad en este lugar. Algunos factores que intervienen en la erosión y sedimentación de la subcuenca son la pendiente, el relieve, la repartición espacial de los suelos, la evolución de la vegetación y la relación vegetación-suelo-pendiente.

En el área de estudio, las zonas sin pendiente se localizan en las partes planas (planicies y valles intermontanos); conforme nos acercamos a la base de elevaciones (lomeríos o sierras montañosas), empieza a tener una ligera elevación hasta alcanzar los 6° grados. En las laderas se encuentran las pendientes más pronunciadas de más de 30° grados (*Mapa 12*).

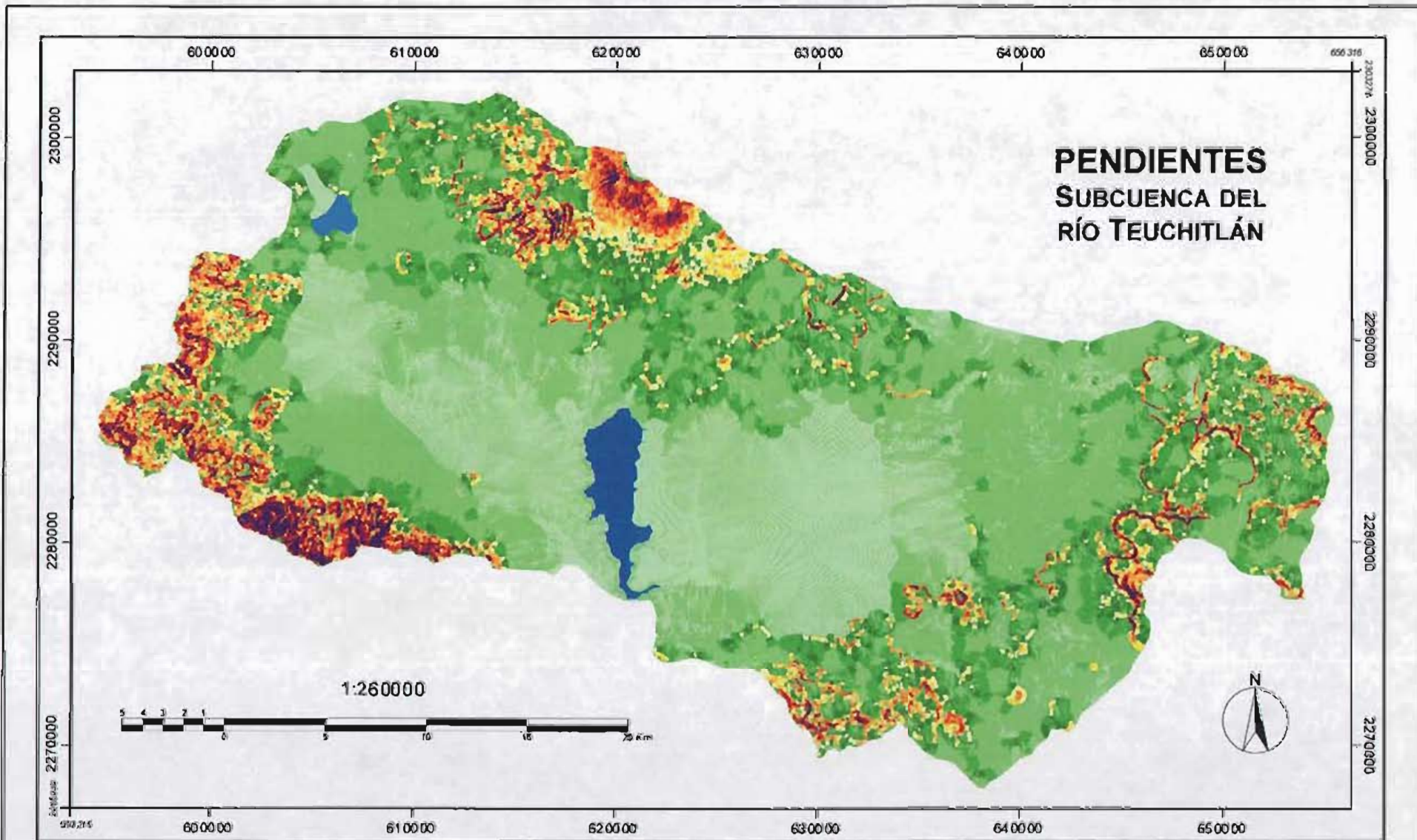
Terrenos con pendientes menores de 3° (sin contar los cuerpos de agua) ocupan el 50.95 % y se localizan en la planicie aluvial, que corresponde a la parte central de la subcuenca. El 24.19% de la subcuenca está formado por pendientes de 4° a 9°, y rodean a la zona de pendientes de menos de 3° hasta la base de las zonas montañosas y el 13.83 % por pendientes de 10° a 21°, las cuales se localizan principalmente en la parte oeste de la subcuenca en los cerros: El Trigo, y El Ocotillo. También se localizan en las partes bajas del volcán Tequila, al noroeste de la subcuenca y en menor grado en el sureste y noreste en los cerros: San Miguel, Las Planillas, El Tule, El Culebreado, El Tepopote, El Alto y El Chato. El 6.79% de la subcuenca tiene pendientes mayores de 21° ubicadas de manera importante al suroeste en las zonas altas del Gran Cerro de Ameca y en las laderas del Volcán Tequila.

La zona con mayor proporción en la subcuenca es, después de las zonas planas, es la que corresponde a la que se encuentra entre los 4° y 9°, pudiendo ser la zona más sensible a la erosión.





*Gráfica 6. Distribución de pendientes en la subcuenca.*





**Simbología**

-  Presa La Vega
-  Laguna Colorada

**Rango en grados**

 Menos de 1	 De 10 a 12	 De 22 a 24
 De 1 a 3	 De 13 a 15	 De 25 a 27
 De 4 a 6	 De 16 a 18	 De 28 a 30
 De 7 a 9	 De 19 a 21	 Más de 30

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Instituto de Ecología      Instituto de Geografía

Fuente: A partir del MDT  
Octubre, 2004

Mapa 12. Pendiente en grados de la subcuenca del río Teuchitlán

### 5.1.2. Disección del relieve

Uno de los métodos geomorfológicos principales que se utilizan para estudiar el relieve es la disección del relieve, el cual nos permite calcular la longitud de la red fluvial en una superficie. El programa *Disec* (Parrot, 2004) calcula la densidad de disección en cuadrantes de 1 x 1 Km. Se hicieron 10 rangos de la densidad de disección cada 0.5 km/km<sup>2</sup>. Se encontró que el 22.07% tiene una densidad de disección entre 2.1 a 2.5 km/km<sup>2</sup>, mientras que el 8.82% tiene densidades mayores a 3 km/km<sup>2</sup>. La longitud de la red fluvial en el espacio 2D fue de 122.35 km (*Tabla 13 y Mapa 13*).

Para medir con mayor precisión la longitud de la red fluvial es necesario considerar el espacio 3D, para lo cual se requiere integrar los valores de altitud de los diferentes píxeles involucrados. Se hicieron 10 rangos de la densidad de disección cada 0.5 km Se encontró que el 21.70% tiene una densidad de disección de 2.1 a 2.5 km/km<sup>2</sup>, y el 9.50% tiene una densidad mayor a 3 km/km<sup>2</sup>. La longitud fluvial para el espacio 3D fue de 127.45 km (*Tabla 13 y Mapa 14*).

**Tabla 13.** Densidad de disección en 2D y 3d de la red fluvial en la subcuenca del río Teuchitlán

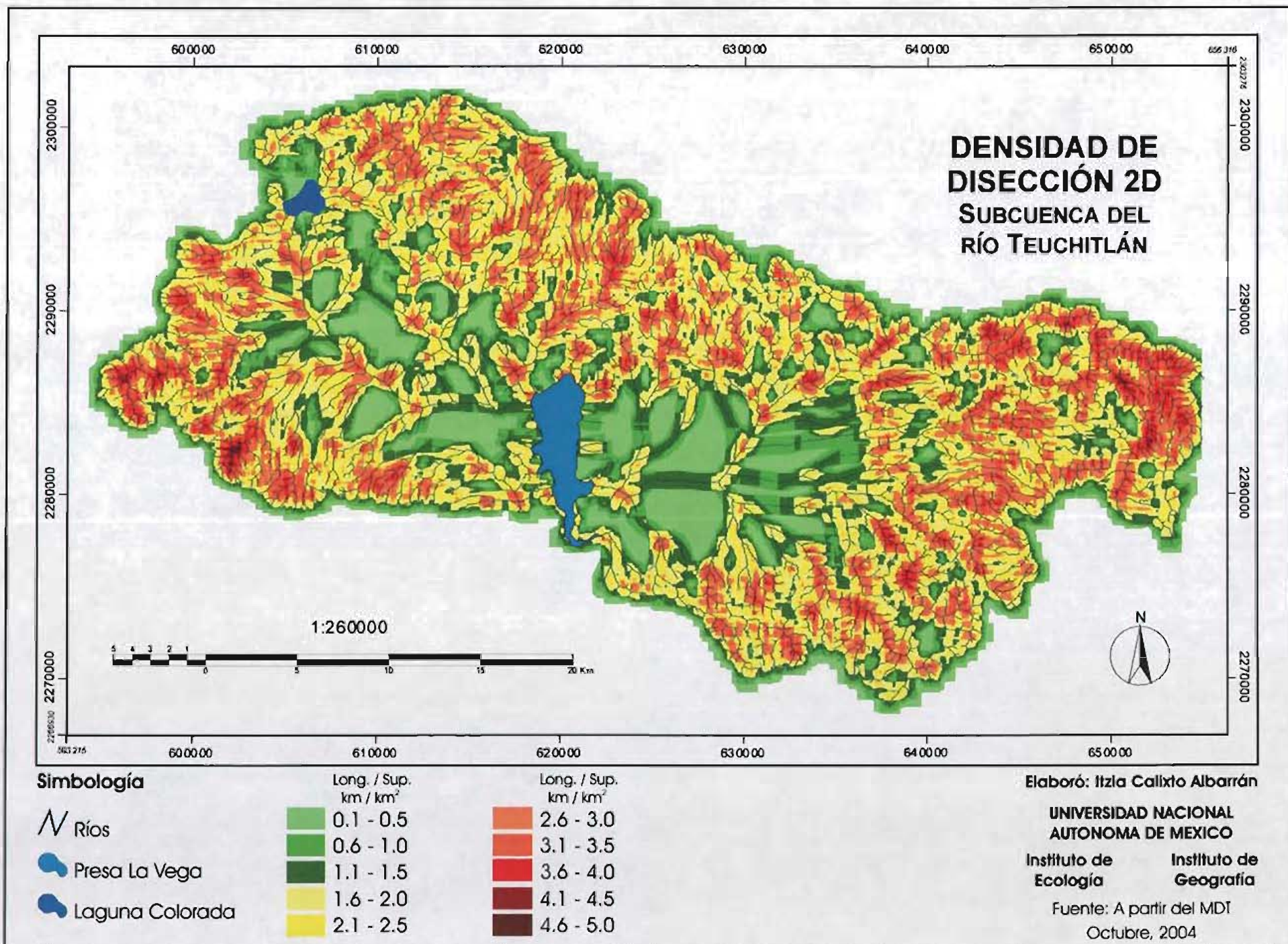
Long. Red/Sup. Cuadrante (Km / 1 km <sup>2</sup> )	Frecuencia 2D	% 2D	Longitud Km 2D	Frecuencia 3D	% 3D	Longitud Km 3D
0.1-0.5	80992	7.47	1,56	80267	7,40	1,56
0.6-1.0	108591	10.01	4,16	107499	9,91	4,16
1.1-1.5	170867	15.75	6,76	168738	15,55	6,76
1.6-2.0	213171	19.65	9,36	210232	19,38	9,36
2.1-2.5	239393	22.07	11,96	235400	21,70	11,96
2.6-3.0	176062	16.23	14,57	179690	16,56	14,57
3.1-3.5	75678	6,98	17,17	79960	7,37	17,17
3.6-4.0	17884	1,65	19,77	20252	1,87	19,77
4.1-4.5	1916	0,18	22,37	2610	0,24	22,37
4.6-5.0	138	0,01	14,67	265	0,02	19,77
Total	1084692	100	122.35	1084913	100	127,45

La diferencia entre la densidad de disección en el espacio bidimensional y tridimensional fue de sólo 5.1 km. Comparando este valor con la superficie total de la cuenca (1048 km<sup>2</sup>), se puede decir que el relieve predominante corresponde a zonas planas, donde había cuerpos de agua (manantiales debido principalmente a los escurrimientos provenientes del volcán Tequila Brambila, 1928, Rodríguez, 1928), y posteriormente desaparecieron a raíz de la construcción de la presa de La Vega.

### 5.1.3. Repartición espacial de los suelos

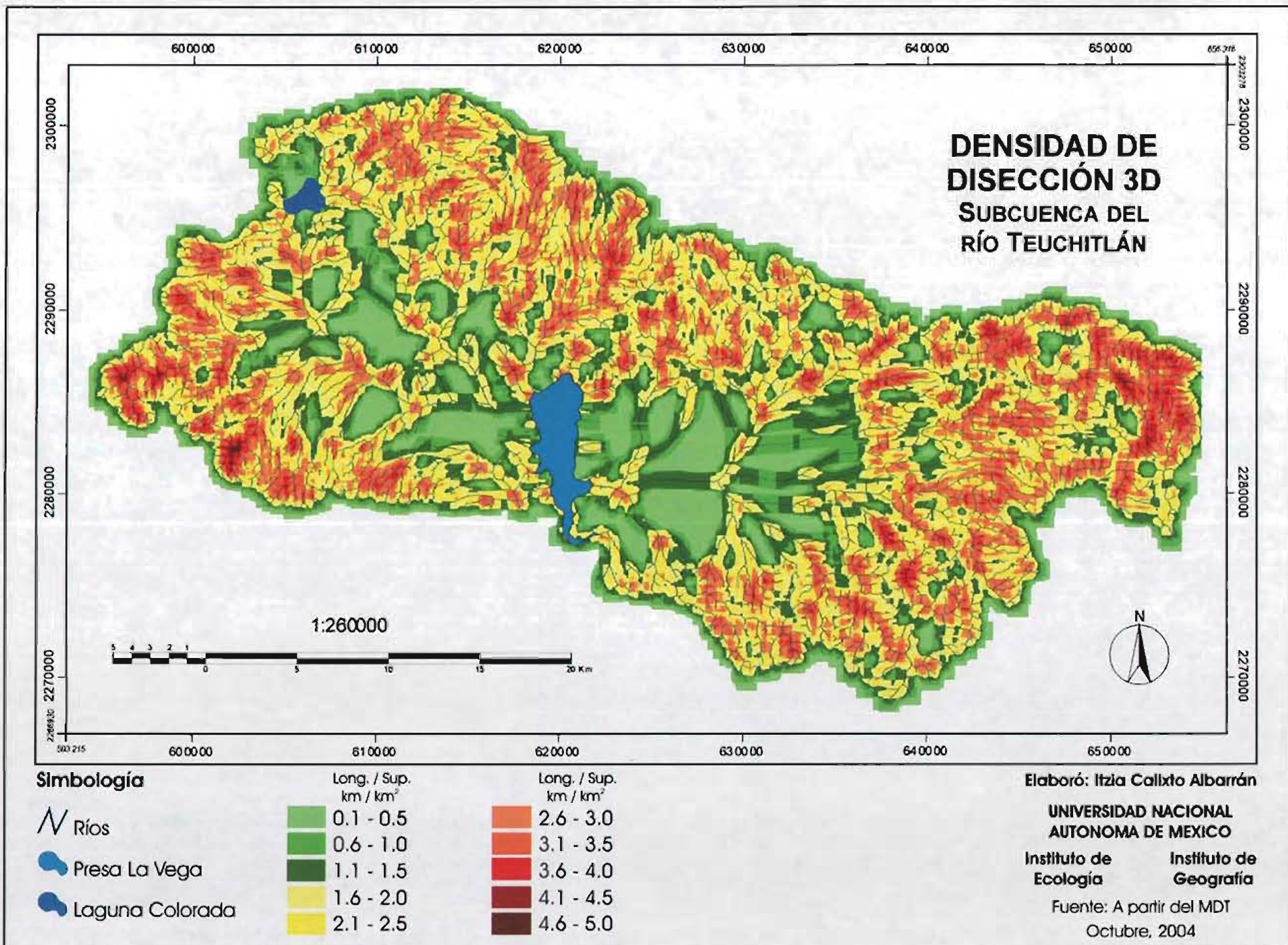
En la subcuenca del río Teuchitlán se presentan varios tipos de suelos como el feozem, regosol, luvisol, planisol, cambisol, entre otros. Sin embargo, los más frecuentes son el feozem (36,2%) y el regosol (37,8%), que ocupan el 73,9% de toda la subcuenca. Le siguen en importancia el luvisol (7,4%) y el planisol (6,5%), aunque son muy poco representativos dentro del área de estudio (*Gráfica 7*).





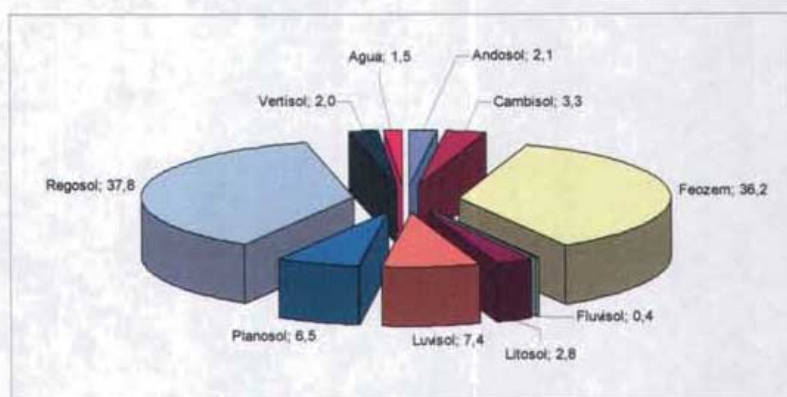
Mapa 13. Densidad de disección en 2D de la red fluvial de la subcuenca del río Teuchitlán





Mapa 14. Densidad de disección en 3D de la red fluvial de la subcuenca del río Teuchitlán





**Gráfica 7.** Tipos de suelo en la subcuenca del río Teuchitlán.

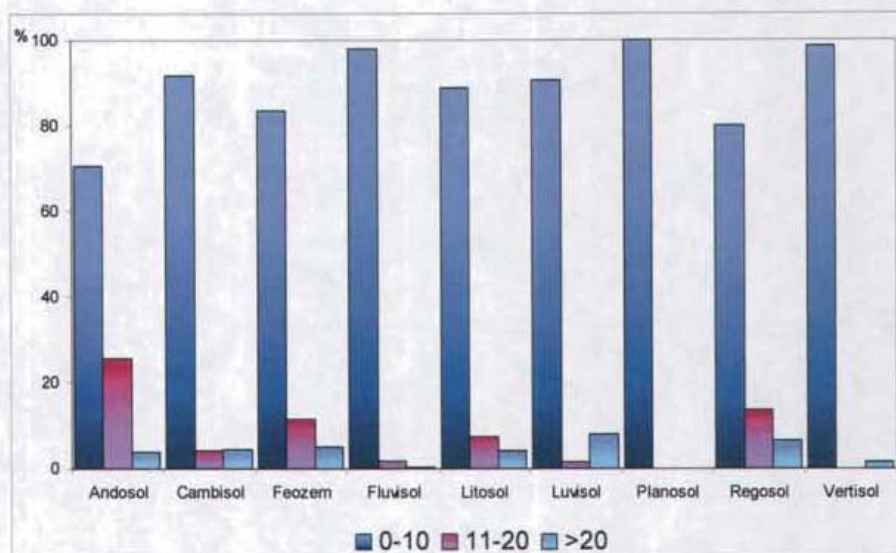
Los suelos presentes en la subcuenca del río Teuchitlán ocurren principalmente en las pendientes que van de 0° a 10°. De hecho, más del 75% de cada uno de los suelos se encuentran en estas pendientes. Cabe resaltar el caso del planosol que es el único suelo que se localiza en zonas planas. En el caso del vertisol, el 98.5% de este tipo de suelo se encuentra en pendientes de 0° a 10° y sólo el 1.5% en pendientes mayores a 20° (*Tabla 14*).

**Tabla 14.** Tipos de suelo con diferentes pendientes en la subcuenca del río Teuchitlán

Pendiente Tipo	0-5		6-10		11-15		16-20		21-90	
	%	No. píxeles	%	No. píxeles	%	No. píxeles	%	No. píxeles	%	No. píxeles
Andosol	36,00	8049	34,63	7742	17,95	4014	7,59	1696	3,83	856
Cambisol	79,96	27615	11,68	4035	2,87	990	1,16	400	4,34	1498
Feozem	69,26	264873	14,23	54419	7,21	27555	4,34	16582	4,97	19013
Fluvisol	95,64	4012	2,31	97	0,91	38	0,98	41	0,17	7
Litosol	65,35	19663	23,37	7032	5,38	1620	1,89	568	4,00	1205
Luvisol	84,03	66046	6,44	5063	1,22	955	0,29	226	8,03	6310
Planosol	98,94	67952	1,03	707	0,03	21	0,00	0	0,00	0
Regosol	65,94	263215	14,02	55950	8,12	32395	5,31	21199	6,62	26410
Vertisol	98,49	20909	0,00	0	0,00	0	0,00	0	1,51	320
Total		742334		135045		67588		40712		55619

Es importante poner atención en los suelos que son predominantes en la subcuenca. El feozem es un tipo de suelo rico en materia orgánica y en nutrientes, sin embargo sobre laderas tienen rendimientos muy bajos y se erosionan con facilidad (CETENAL, 1977). En este sentido, el 83.5% de este tipo de suelo se encuentra en pendientes de 0° a 10°, el 11.5% en pendientes de 11° a 20° y sólo el 5% en pendientes mayores a 21°. Por otro lado, el regosol prevalece en un 80% en pendientes entre 0° y 10°, en pendientes de 11° a 20° en un 13.4% y en pendientes mayor a 20° en un 6.6% (*Gráfica 8*). Este tipo de suelo es inmaduro, somero, de material no consolidado y de fertilidad variable, por lo tanto, son suelos erodables. A pesar de que el feozem y regosol son suelos susceptibles a la erosión en zonas con pendientes pronunciadas, es claro que en el caso de la subcuenca de estudio ambos suelos en pendientes mayores a 20° representan sólo el 4.17% del total de la subcuenca y el 11.59 en este tipo de pendientes.





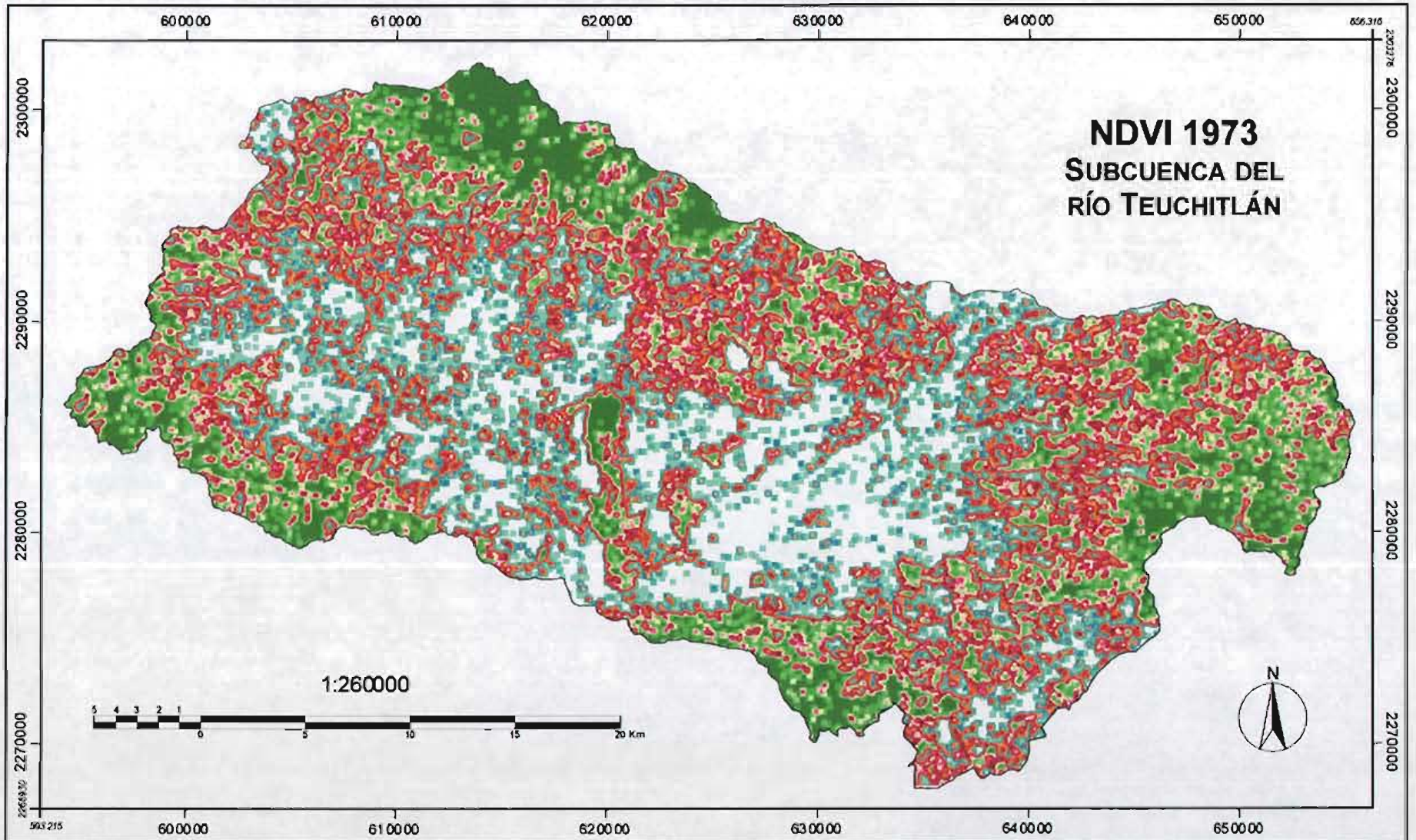
Gráfica 8. Tipos de suelo en diferentes pendientes de la subcuenca del río Teuchitlán.

#### 5.1.4. Cambio de la densidad de vegetación

El Índice Normalizado de Vegetación (*NDVI*) se obtuvo a partir de la imagen de satélite Landsat TM del año 1973 y la imagen del sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) del satélite Landsat 7 del 22 de enero de 2000. El *NDVI* se evaluó a partir de la combinación de las bandas 3 y 4 de las imágenes de satélite con el programa *TM\_index* (Parrot, 2003). Posteriormente, con el programa *Homo2* (Parrot, 2003) se hizo una homogenización de cada una de las imágenes binarias. Se clasificó la imagen de homogeneidad con 5 rangos de densidad de la vegetación y el valor 0 son los cuerpos de agua y zonas con sombra. La densidad de vegetación se refiere al porcentaje de píxeles que llenan una ventana móvil, es decir si el porcentaje es 0 significa que dentro de la ventana móvil no se encontraba ningún píxel, si por el contrario la densidad de vegetación es 100, entonces todos los píxeles llenan la ventana móvil. Las zonas sin vegetación (erosionadas) corresponden a una densidad de vegetación entre el 1% y 27%, las zonas con vegetación escasa se encuentran entre el 28% a 51% de densidad de vegetación, el 52% a 75% de densidad de vegetación son áreas con vegetación poco densa, densidades de vegetación del 76% a 99% son áreas con vegetación densa y 100% de densidad de vegetación son zonas con vegetación muy densa.

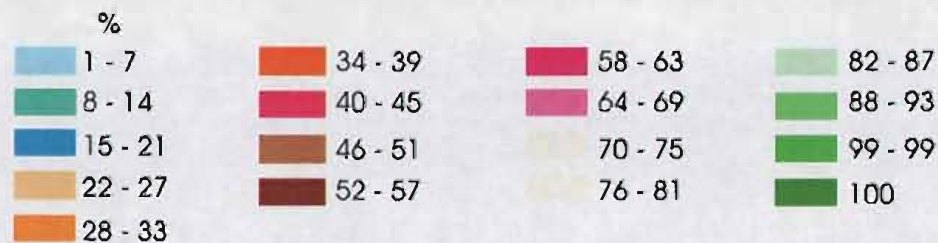
En la imagen de 1973 se determinaron 5 categorías de densidad de la vegetación en la subcuenca. Las zonas erosionadas sin vegetación, con vegetación escasa, con vegetación poco densa, con vegetación densa y zonas con vegetación muy densa. En 1973 se encontró que el 38.23% (401.22 km<sup>2</sup>) del área total de la subcuenca correspondía a zonas erosionadas sin vegetación, el 16.20% (169.97 km<sup>2</sup>) a zonas con vegetación escasa, el 16.38% (171.89 km<sup>2</sup>) tenía vegetación poco densa, el 19.89% (208.70 km<sup>2</sup>) presentó vegetación densa y sólo el 7.64% (80.16 km<sup>2</sup>) tenía vegetación muy densa (*Mapa 15*).





**Simbología**

Densidad de  
vegetación



Elaboró: Itzia Callixto Albarrán

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

Instituto de  
Ecología

Instituto de  
Geografía

Marzo, 2005

Mapa 15. Densidad de vegetación aplicando el NDVI de 1973 en la subcuenca del río Teuchitlán

De 2000 se determinaron el mismo número de categorías y se observó que predominaban las áreas erosionadas sin vegetación con 663.44 km<sup>2</sup> que corresponde al 63.22% del área total de la subcuenca. La segunda y tercera categoría de importancia son las zonas con vegetación densa y con vegetación escasa que abarcaban ahora un área de 108.24 y 104.91 km<sup>2</sup>, respectivamente. Las zonas con vegetación poco densa ocuparon el 8.03% del área total de la subcuenca (84.23 km<sup>2</sup>). La zona con menor área fue la de vegetación muy densa con sólo 6.77% que equivale a 71.09 km<sup>2</sup> (*Mapa 16*).

Comparando los dos años podemos decir que hacia 2000 resalta la disminución de la vegetación muy densa, la cual se extendía de manera discontinua y se distribuyó en forma de grandes parches en las zonas altas de la subcuenca. La vegetación muy densa en 1973 era de 80.16 km<sup>2</sup> y disminuyó en un 11.31%, teniendo para 2000 un área de 71.09 km<sup>2</sup>. La vegetación poco densa decreció en casi un 50%, en 1973 se tenían 171.89 km<sup>2</sup>, mientras que en el 2000 ocupaba 84.23 km<sup>2</sup>. La vegetación densa en 2000 fue menor en un 48.14% que en 1973. Por el contrario, las áreas perturbadas se han ido ampliando, ocupan ya más de 663.44 km<sup>2</sup>, principalmente en torno a poblados y principales vías de comunicación y zonas agrícolas. De hecho hubo un incremento del 65.36% con respecto a 1973 (*Tabla 15*).

**Tabla 15.** Superficies de NDVI en 1973 y 2000 en la subcuenca del río Teuchitlán (1970).

Categoría	1973		2000		1973-2000	
	Superficie km2	% Superficie	Superficie km2	% Superficie	Cambio km2	% Cambio
Sin vegetación	401.22	38.23	663.44	63.22	262.22	65.36
Vegetación escasa	169.97	16.20	104.91	10.00	-65.07	-38.28
Vegetación poco densa	171.89	16.38	84.23	8.03	-87.66	-51.00
Vegetación densa	208.70	19.89	108.24	10.31	-100.45	-48.14
Vegetación muy densa	80.16	7.64	71.09	6.77	-9.07	-11.31
Cuerpos de agua	17.48	1.67	17.48	1.67	0	0
Total	1049.42	100.00	1049.42	100.00	-0.02	-83.37

Para calcular los cambios que se han generado en la cubierta vegetal se compararon las dos imágenes. Se tomaron en cuenta 2 categorías, las zonas con vegetación muy densa y densa, y al correlacionar las dos imágenes se aprecia que la superficie de vegetación conservada se redujo de 288.85 km<sup>2</sup> a 179.33 km<sup>2</sup>, lo que equivale a un porcentaje de cambio de 37.92% al 2000; la tasa de deforestación anual fue de 1.40, calculada según la fórmula propuesta por Mass *et al*, 1996.

$$D = (F_1 - F_2) / (F_1 * N) \times 100$$

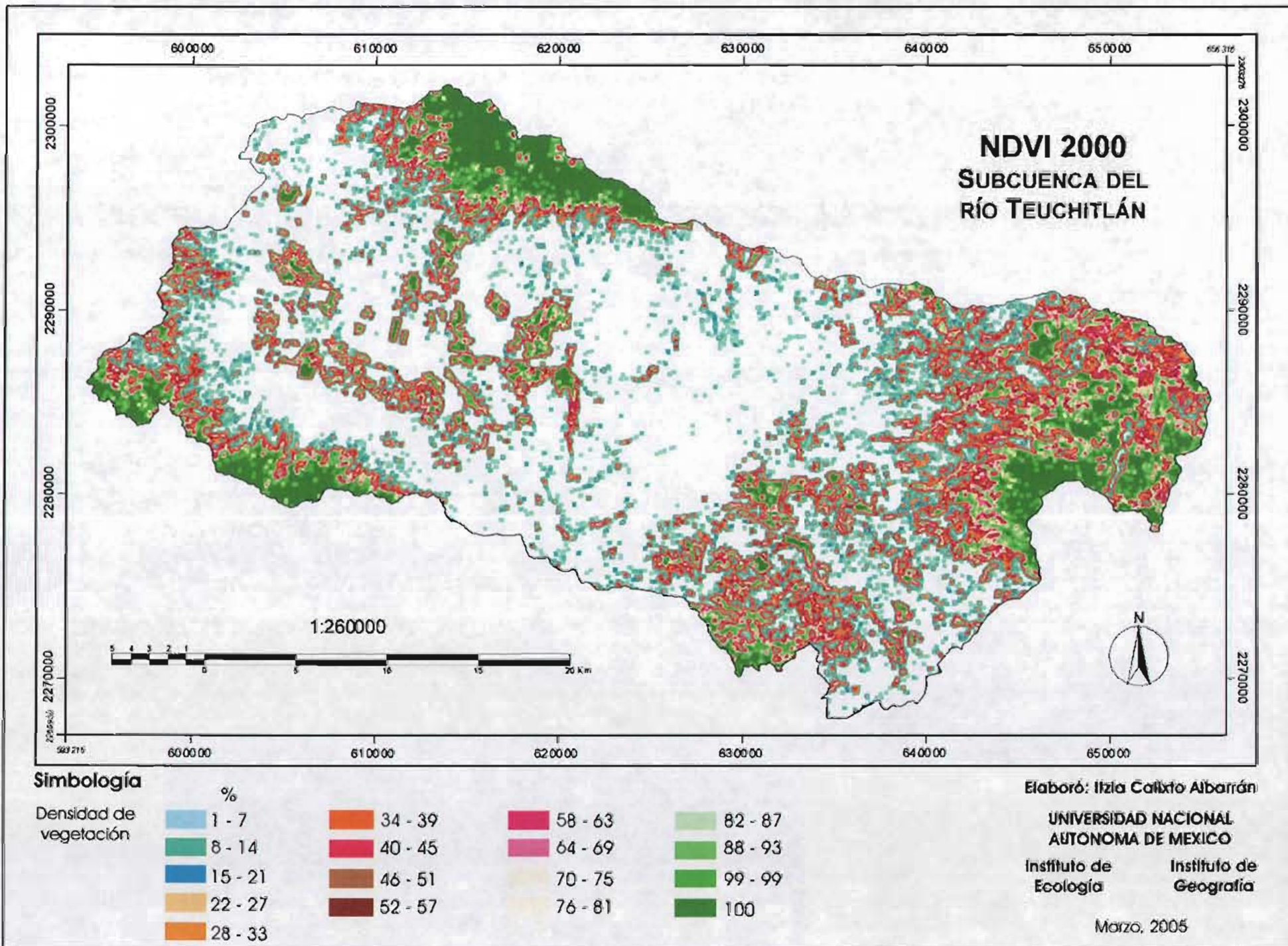
D= Tasa de deforestación (porcentaje anual promedio)

F1= Área forestal al principio del periodo

F2= Área forestal al final del periodo

N= Número de años en el periodo





Mapa 16. Densidad de vegetación aplicando el NDVI de 2000 en la subcuenca del río Teuchitlán



Para calcular la tasa de deforestación también se tomaron en cuenta las dos categorías mencionadas anteriormente y se utilizó la fórmula propuesta por Dirzo y García (1992):

$$r = 1 - \left[ 1 - \frac{A_i - A_f}{A_i} \right]^{1/t}$$

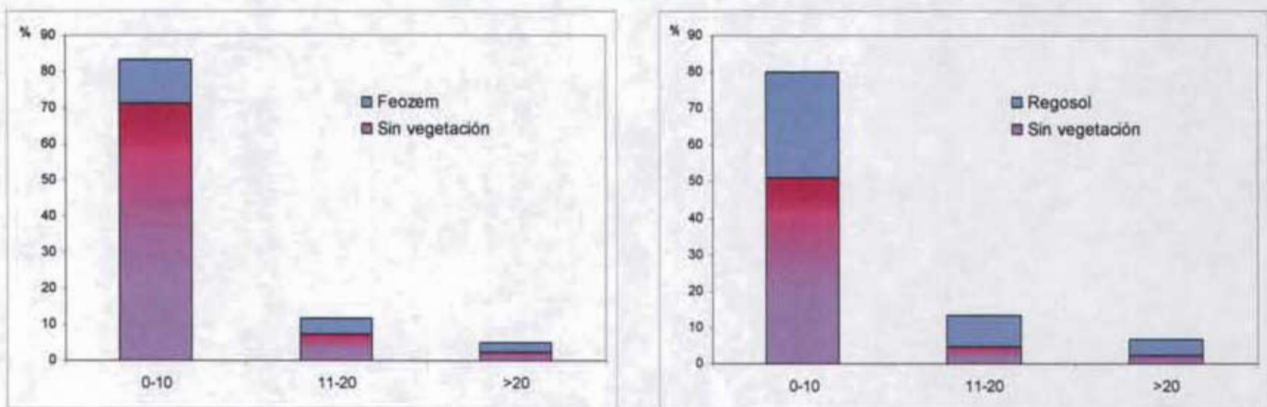
Donde  $A_i$  y  $A_f$  son áreas con bosque (vegetación muy densa) al principio y al final del período evaluado, y  $t$  es el número de años dentro de este período

La superficie de vegetación conservada se redujo de 288.85 km<sup>2</sup> a 179.33 km<sup>2</sup>, la tasa de deforestación anual de acuerdo a Dirzo y García (1992) fue de 0.0175.

### 5.1.5. Relación de la densidad de vegetación, suelo y pendiente

Para conocer la relación que existe entre el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), el tipo de suelo y la pendiente, se cruzaron las imágenes correspondientes con estos 3 temas en el programa *Multidim\_class* (Parrot 2003). En el caso de tipo de suelo sólo se utilizaron los dos suelos más importantes regosol y feozem, ya que ocupan el 73.9% de la subcuenca. El límite de la densidad de vegetación se fijó en 47% y las pendientes entre 0 y 10 grados, 11 y 20 grados y mayor a 20 grados.

En el caso del feozem en pendientes de 0 a 10° se encontró que el 71.3% carece de vegetación, en pendientes de 11° a 20° no hay vegetación en un 7.3% y en pendientes mayores a 20° grados, el 2.4% no presenta vegetación (*Gráfica 9a*). En el regosol, se encontró que el 51.3% de este tipo de suelos carece de vegetación en pendientes de 0° a 10°, mientras que en pendientes de 11 a 20 y mayores de 20°, los regosoles no tienen vegetación en 4.7% y 2.2%, respectivamente (*Gráfica 9b*). Es evidente que aunque la erosión está estrechamente relacionada con la carencia de cobertura vegetal, la pendiente y el tipo de suelo, en el caso de la subcuenca se encontró que el feozem y el regosol están en muy poca proporción en las zonas con pendientes pronunciadas, y aunque existe pérdida de la cobertura forestal en este tipo de pendientes, esta también es poco significativa, no excede el 2.4% para los dos tipos de suelo predominantes.

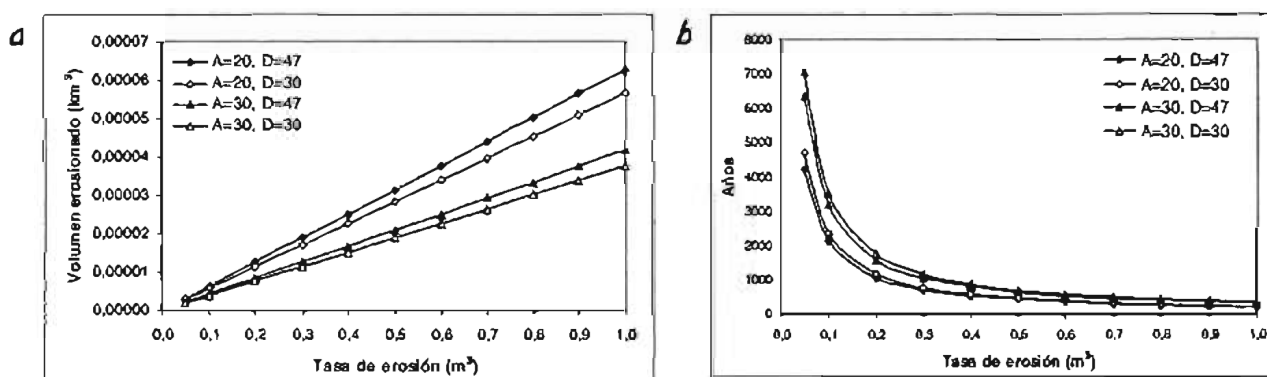


*Gráfica 9a. Porcentaje de feozem sin cobertura vegetal en diferentes pendientes. 9b. Porcentaje de regosol sin cobertura vegetal en diferentes pendientes en la subcuenca del río Teuchitlán.*

## 5.2. Integración de los factores involucrados en el análisis de la subcuenca

En la reconstrucción digital de la presa de La Vega se encontró que el volumen total de ésta es  $0.013372 \text{ km}^3$ , lo que corresponde a una presa pequeña, mientras que la superficie es de  $14.360 \text{ km}^2$  y las altitudes mínimas y máximas encontradas fueron 1 249.90 y 1255 metros, respectivamente.

Se obtuvieron diferentes volúmenes anuales de sedimento proporcionado por el área de captura de la subcuenca que fue usado para simular el relleno de la presa. Estos volúmenes dependen de la tasa de erosión anual del suelo desnudo, del ángulo de la pendiente así como de la estimación de la erosión cuando existe cubierta vegetal. Se han reportado un rango amplio de tasas de erosión que fluctúan entre 5 y  $1\,700 \text{ m}^3/\text{km}^2$ . En una primera aproximación, las diferentes pruebas en computadora que se realizaron mostraron que las tasas de erosión bajas corresponden a las características morfológicas de la zona de estudio (*Gráfica 10*).

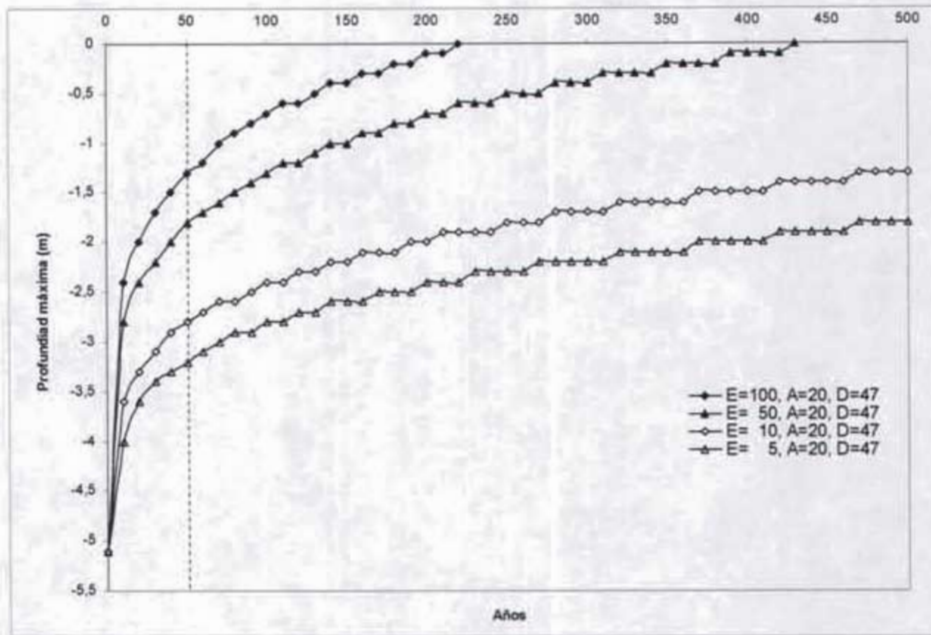


*Gráfica 10. Volumen erosionado de acuerdo a las diferentes tasas de erosión y condiciones de pérdida de suelo. A) Volumen global. B) Relleno total de la presa en años de acuerdo a las diferentes tasas de erosión y diferentes condiciones. Parámetros: A= Pendiente, D= densidad de vegetación*

En la *Gráfica 11* se ilustra la relación que existe entre las diferentes tasas de erosión y el tiempo de relleno de la presa, el cual fluctúa entre 213 años para una tasa de erosión de  $100 \text{ m}^3/\text{km}^2$  anual hasta 4258 años para una tasa de erosión de  $5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ . El tiempo de relleno está en función de los diferentes parámetros de densidad de vegetación y ángulo de la pendiente. El límite de la densidad de vegetación se ha fijado entre 30 y 47% (Thomes, 1990). De esta manera, y utilizando la fórmula descrita en el capítulo anterior, se obtuvieron toda una serie de datos sobre la relación existente entre la profundidad máxima anual y el volumen erosionado de acuerdo con diferentes tasas de erosión.

Las observaciones de campo mostraron que la profundidad actual de la presa es de 3.20 metros, mientras que en la reconstrucción de la presa se obtuvo una profundidad de 5.1 metros para el mismo punto, lo que significa que durante 47 años el asolve ha sido de 1.90 metros. Es decir, hay una tasa anual de erosión de  $5 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$  que corresponde a las condiciones climáticas del área de estudio. En el ejemplo reportado en la *figura 15*, se muestra el fenómeno de relleno con la tasa anterior.





Gráfica 11. Cambio de la profundidad máxima del agua de acuerdo al volumen erosionado producido en el subcuenca del río Teuchitlán.

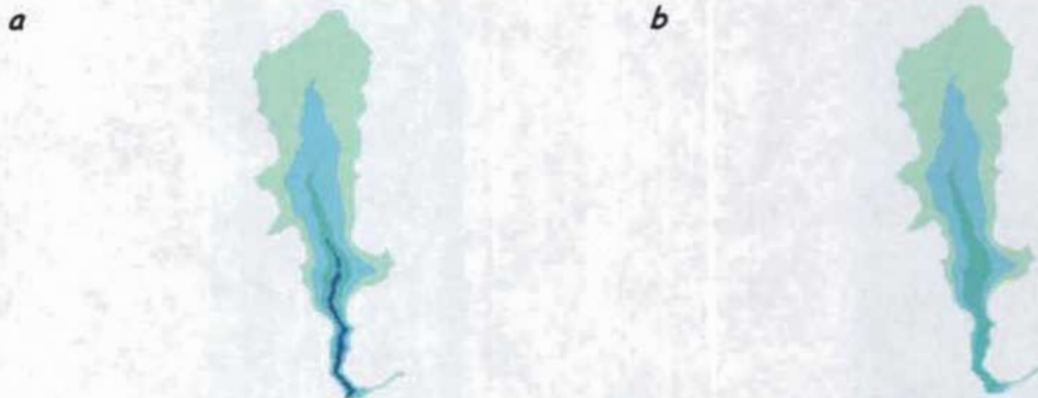
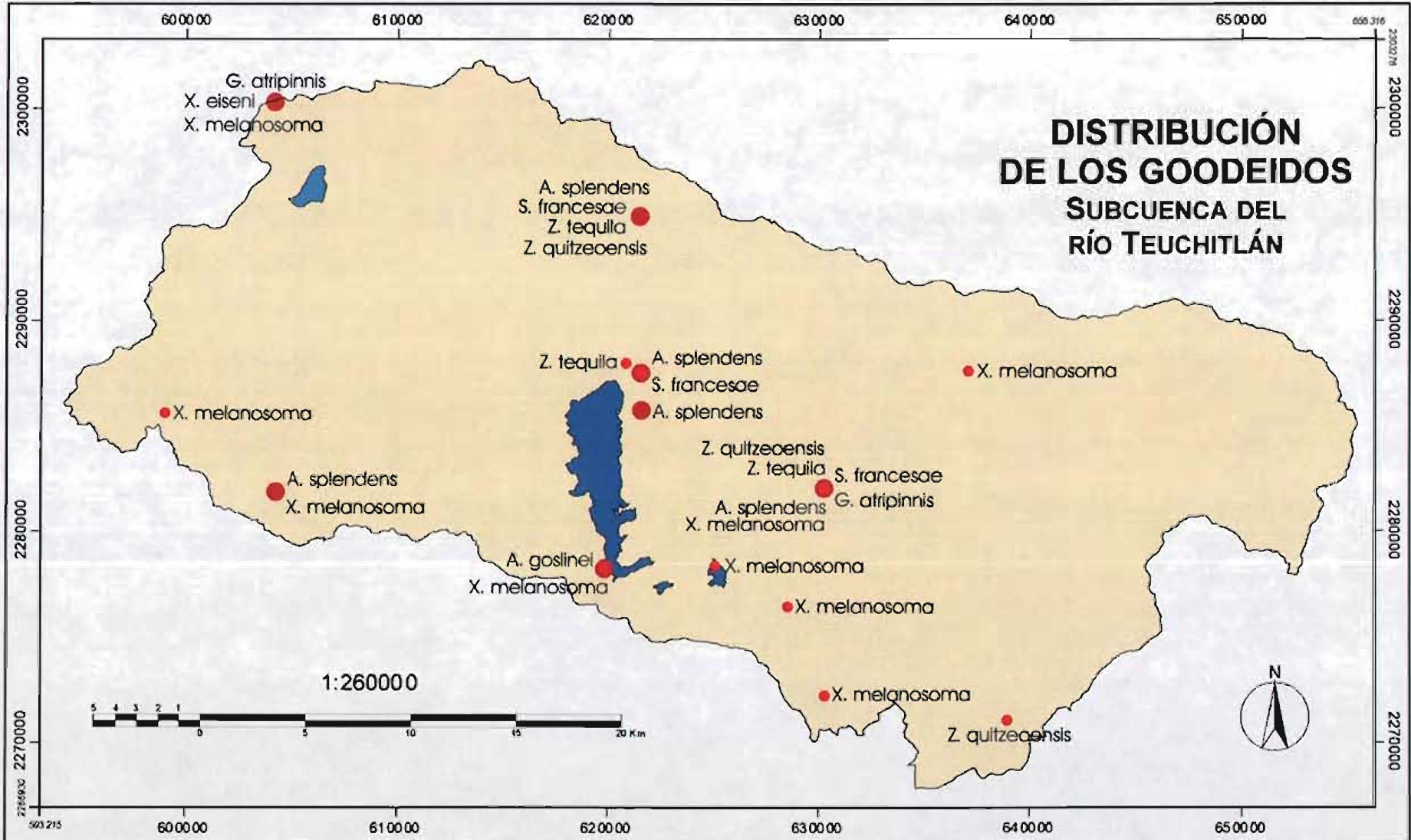


Figura 15. Profundidad de la presa (capas de 1 metro). a) Estado inicial. b) Rellenado después de 240 años y un volumen erosionado de  $0.00000314 \text{ km}^3/\text{km}^2$  usando una tasa de erosión de  $5 \text{ m}^3/\text{km}^2$

### 5.3. Evaluación de estatus histórico de la subfamilia Goodeinae

Las medidas taxonómicas distintivas de la subfamilia Goodeinae que se cuantificaron en la subcuenca de estudio fueron el peso de la raíz y la diversidad filogenética. En 1970 se encontró que el ensamble de esta familia se conformaba por 8 especies (*Allotoca goslinei*, *Ameca splendens*, *Goodea atripinnis*, *Skiffia francesae*, *Xenotoca eiseni*, *X. melanosoma*, *Zoogotenicus quitzensis* y *Z. tequila*). El peso de la raíz promedio, que se basa en el número de nodos o conexiones de rama desde la especie hasta la base del árbol fue de siete nodos y 15 ramas. La diversidad filogenética (PD), medida como la longitud total de la trayectoria que constituye el árbol filogenético completo, fue de 195 (Tabla 19, Mapa 17).



**Simbología**

-  Presa La Vega
-  Laguna Colorada
-  Goodeinae +1970
-  Goodeinae -1970

Elaboró: Itzia Calixto Albarrán

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Instituto de Ecología Instituto de Geografía

Marzo, 2004

Mapa 17. Distribución de la subfamilia Goodeinae en la subcuenca del río Teuchitlán



El ensamblaje de esta familia treinta años después (2001) sólo conservaba las especies *Ameca splendens*, *X. melanosoma*, *Zoogoneticus quitzeoensis* y *Z. tequila* (4 especies). Es decir, se perdió el 50% de las especies. El peso de la raíz promedio que se encontró fue también de 7 nodos y 15 ramas, sin embargo, la diversidad filogenética (PD) fue de 86.20 esto es, menor en un 55.8% (*Tabla 19, Mapa 17*).

*Tabla 19. Medidas taxonómicas distintivas de la subfamilia Goodeinae en la subcuenca del río Teuchitlán para 1970 y 2000.*

		Peso de la raíz No. nodos	Peso de la raíz No. de ramas	PD
ANTES DE 1970				
<i>Allotoca</i>	<i>goslinei</i>	8	17	29.5
<i>Ameca</i>	<i>splendens</i>	8	17	22.2
<i>Goodea</i>	<i>atripinnis</i>	4	9	13.1
<i>Skiffia</i>	<i>francesae</i>	8	17	40.8
<i>Xenotoca</i>	<i>eiseni</i>	8	17	25.4
<i>Xenotoca</i>	<i>melanosoma</i>	8	17	25.4
<i>Zoogoneticus</i>	<i>quitzeoensis</i>	6	13	19.3
<i>Zoogoneticus</i>	<i>tequila</i>	6	13	19.3
Promedio		7	15	195.0
DESPUES DE 1970				
<i>Ameca</i>	<i>splendens</i>	8	17	22.2
<i>Xenotoca</i>	<i>melanosoma</i>	8	17	25.4
<i>Zoogoneticus</i>	<i>quitzeoensis</i>	6	13	19.3
<i>Zoogoneticus</i>	<i>tequila</i>	6	13	19.3
Promedio		7	15	86.20

En la subcuenca del río Teuchitlán se cuantificaron las medidas de distinción taxonómica, diversidad taxonómica promedio y distinción taxonómica promedio. Estos índices tienen la propiedad de medir las características de toda la dispersión taxonómica. En la subcuenca de estudio se ha perdido el 12 % de la diversidad filogenética promedio, ya que antes de 1970 se tenía una diversidad filogenética promedio de 21.55, mientras que para el 2000 de 24.38. Es de notar que algunas de las especies que han desaparecido en Teuchitlán persisten en otras cuencas (*Figura 16*).

El caso de la distinción taxonómica promedio es aún más drástico, pues se ha perdido el 58% de ésta. En la subcuenca antes de 1970 se tenía una distinción taxonómica de 45.64 y en la actualidad sólo se cuenta con 19.20, es decir, se ha perdido lo que hace especial la biota de la región (en peces). Esto resalta la importancia de la región en términos de biodiversidad (*Figura 16*).

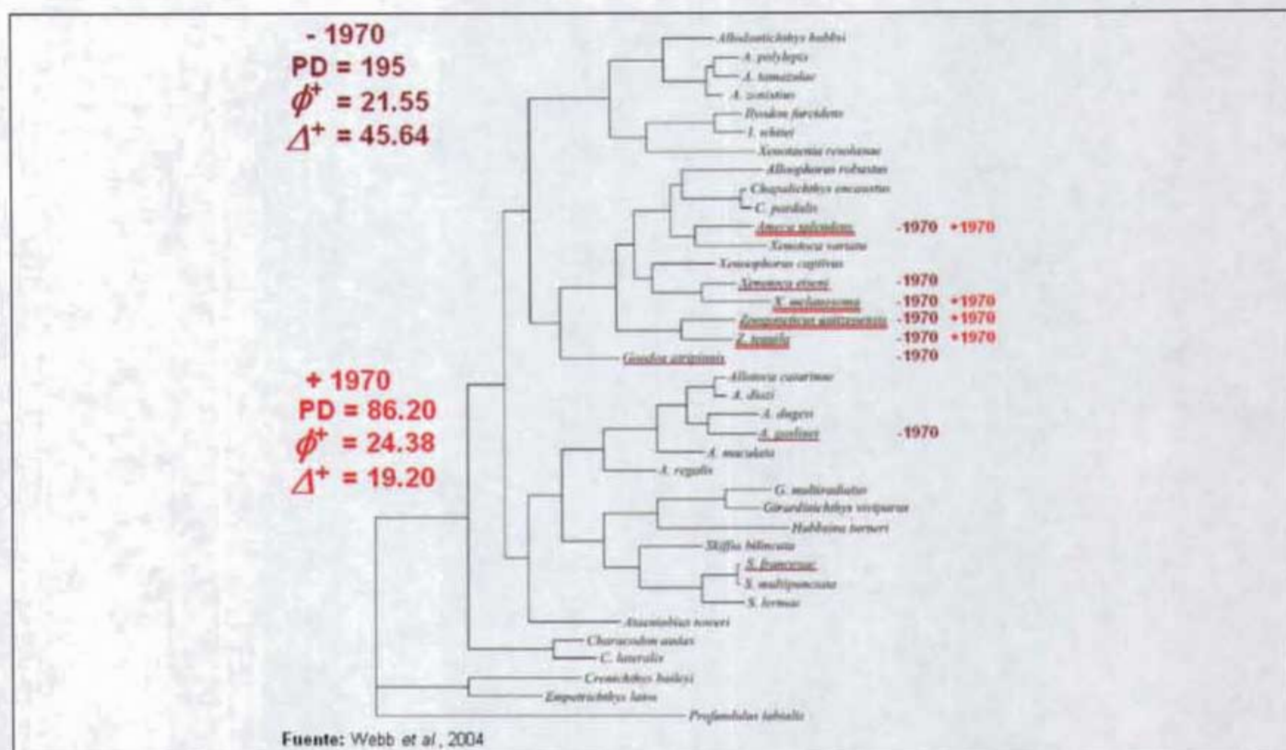


Figura 16. Índices de biodiversidad de los Goodeidos antes y después de 1970 en la subcuenca del río Teuchitlán y otras cuencas de México (Filogenia a partir de Webb et al., 2004).

La presencia de especies introducidas puede ser un factor de riesgo de extinción de algunos goodeidos. Aunque no se ha evaluado la causalidad existe un claro aumento en el número y densidad de especies de este tipo y una disminución y pérdida de goodeidos. De hecho, antes de 1970 no se reportó ninguna especie introducida, sin embargo, a partir de esta fecha existió una introducción gradual de especies exóticas. En el río Teuchitlán después de 1970 se han encontrado seis especies introducidas (*Xiphophorus maculata*, *Tilapia aurea*, *Lepomis macrochirus*, *Cyprinus carpio*, *Poecilia sphenops* y *P. reticulata*, *Tabla 20*).

Tabla 20. Ensamblaje de especies introducidas de la subcuenca del río Teuchitlán, 1955-2001

Peces exóticos	1955 - 1966 <sup>1</sup>	1976 <sup>2</sup>	1978-1985 <sup>3</sup>	1992 <sup>4</sup>	2000-2001 <sup>5</sup>	Referencia
<i>Poecilia sphenops</i>			x	x	x	<sup>1</sup> Miller y Fitzsimons, 1971
<i>Tilapia aurea</i>			x	x	x	<sup>2</sup> Kingston, 1978
<i>Xiphophorus maculatus</i>		x	x	x		<sup>3</sup> Webb y Millar, 1998
<i>Lepomis macrochirus</i>			x	x	x	<sup>4</sup> Webb y Millar, 1998
<i>Cyprinus carpio</i>		x		x		<sup>5</sup> De la Vega-Salazar, 2003
<i>Poecilia reticulata</i>					x	
Total	0	2	4	5	4	

## VI. DISCUSIÓN

En este trabajo se ha abordado una de las causas que puede haber influido en la reducción de los tamaños poblacionales y la extinción de especies de peces dulceacuícolas como *Skiffia francesae*, *Zoogoneticus tequila* y *Ameca splendens* (Miller y Fitzimons, 1971; Kingston, 1978; Webb y Miller, 1998) endémicas del altiplano mexicano. Concretamente, me he centrado en los cambios en la densidad de la cobertura vegetal y la tasa de erosión calculadas a partir de imágenes de satélite (*Landsat MSS* del año 1973 y *Landsat 7 ETM+* del 2000). En esta evaluación ha sido de gran utilidad las aplicaciones que se derivan del uso de Sistemas de Información Geográfica, en particular para estudios del medio ambiente. En este sentido, en esta investigación se pudo realizar una reconstrucción de la hidrografía del espacio actualmente ocupado por la presa de La Vega, se calculó la densidad de la cobertura vegetal, la tasa de erosión de la subcuenca, y el grado de azolvamiento del citado embalse.

Por regla general, suele atribuirse a la influencia directa del hombre la causa principal de las extinciones determinísticas. La introducción de especies, la fragmentación y destrucción del hábitat a través de diversas actividades como son la agricultura, el pastoreo sobre zonas frágiles, la expansión de la mancha urbana con sus desechos industriales y domésticos (Groombridge 1982) son algunas de las que han conducido a ese preocupante panorama respecto a la conservación de espacios emblemáticos de México.

En el caso específico de los peces, y sobre todo de las especies de agua dulce, su extinción se asocia a la pérdida o modificación del hábitat, a la introducción de especies, a la contaminación del medio acuático y a la sobreexplotación (Miller *et al.*, 1989; Frissel, 1993; Angermeier, 1995). Respecto a las especies de la subfamilia Goodeinae, los factores próximos de riesgo de extinción son la pérdida del hábitat, la introducción de especies exóticas de peces, la restricción del ámbito geográfico, el elevado grado de especialización ecológica de las especies estudiadas y su nivel trófico (De la Vega, 2003). En este estudio de la subcuenca del río Teuchitlán se ha querido ver si en relación con el paisaje, los cambios debidos a la actividad humana han podido tener relación con la desaparición de especies de esta subfamilia o a su confinamiento en pequeños manantiales.

Esta subcuenca ha sido sometida a diversos deterioros derivados de cambios en el uso del suelo, el principal de los cuales ha sido la construcción en 1955 del embalse de La Vega, reservorio de agua para el riego de los carrizos próximos a las poblaciones de la subcuenca. La aparición de este embalse significó un cambio profundo en la distribución de los hábitats dulceacuícolas. El embalse cubrió permanentemente una extensión importante de terrenos que sólo se inundaban durante la época de lluvias, y que eran alimentados por las surgencias de los manantiales que abundaban en la zona. A



juzgar por la distribución actual de *A. splendens* y *Z. tequila*, y dado lo que sabemos de la ecología de *Skiffia multipunctata* (especie hermana de la extirpada *S. francesae*, endémica de Teuchitlán) estos manantiales, ahora bajo el embalse, debieron constituir el hábitat de las especies endémicas de goodeidos. Se trataba de afloramientos de agua fresca, bajos en sales, procedente de los escurrimientos del volcán Tequila. De hecho, el río Teuchitlán se formaba a partir de dos de los principales manantiales todavía existentes, el del Rincón, que aportaba la corriente principal del Teuchitlán y el de Tanque, próximo al casco de la antigua hacienda de Labor de Ribera.

La construcción del embalse ha supuesto:

- La pérdida de los ciclos anuales de inundación y sequía en el cauce de los ríos que conformaban el Teuchitlán; unos cauces divagantes formados sobre un terreno extremadamente llano, y con numerosos brazos con funcionamiento estacional o periódico, según la precipitación y el volumen de agua de los manantiales (Brambila, 1928; Rodríguez, 1928)
- Un cambio en la calidad del agua, mucho más turbia, y actualmente con un grave problema de eutrofización debido a los escurrimientos de aguas residuales procedentes de las poblaciones aledañas y de los fertilizantes empleados en los campos vecinos
- Ha favorecido políticas de introducción de especies exóticas con el aparente fin de enriquecer la dieta proteica de las poblaciones vecinas (Zambrano et al. 1999)
- Y, en el plano social, el orillamiento de los pobladores de Teuchitlán a abandonar la actividad agrícola y pecuaria que realizaban en los fértiles terrenos próximos y buscar alternativas económicas en poblaciones vecinas o, por ejemplo, actualmente en los balnearios que hoy abren sus puertas al turismo local del Estado.

Otro cambio negativo ha sido la deforestación que ha ocupado una parte significativa de esta investigación. De hecho, las principales diferencias entre la subcuenca antes y después de la construcción del embalse ocurren a nivel de la cobertura vegetal. Hemos encontrado para el conjunto de la subcuenca una disminución de la vegetación “muy densa” (11.31%) y “densa” (48.14%). De manera correspondiente, las áreas perturbadas se incrementaron en un 65.36%. Estos cambios, en general, asociados a pendientes elevadas y suelos frágiles, se deberían reflejar en un incremento de la erosión, del azolve y, por lo tanto, de las características físicas y químicas de las aguas del embalse. Tales cambios traerían consigo un decremento en la capacidad del hábitat para sostener poblaciones viables de los peces endémicos (que evolucionaron en hábitats cristalinos), que ha sido la parte central de esta investigación. Sin embargo, los datos obtenidos sugieren que el panorama no parece tan desolador en este aspecto. La mayor parte de los cambios en la cobertura vegetal de la subcuenca ocurrieron en

áreas con pendientes elevadas ( $>21^\circ$ ), en las que no predominan los suelos más comunes de la subcuenca (feozem y regosol) que son los más susceptibles a la erosión. Ello explica que hayamos encontrado una baja tasa global de erosión ( $5 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ ).

Estos resultados no obstan la realización de investigaciones que debieran emprenderse para definir mejor las causas de la extinción y reducción del hábitat de las especies estudiadas. La primera de ellas tiene que ver con el volumen y calidad del agua actual en los manantiales y con el número de manantiales situados a pie del volcán Tequila y que otrora abundaban (Brambila, 1928, Rodríguez, 1928). En este sentido, la disminución de la densidad de vegetación en el grado que hemos calculado puede influir en una menor infiltración de la precipitación y de la condensación interna y externa de la humedad atmosférica y tener su reflejo en la disminución e incluso la desaparición de las surgencias de agua y, por lo tanto, en una reducción sensible del hábitat ocupado por *A. splendens*, *Z. tequila*, y de *Skiffia multipunctata*. Una revisión documental de los archivos relacionados con la construcción del embalse de La Vega puede ser de gran utilidad.

Ligado a esto, en segundo lugar, debiera estudiarse la manera como ha influido el desarrollo de las poblaciones situadas en la ladera sur del Tequila, por ejemplo, en el entubamiento del agua de los manantiales para suministro público del agua, en el creciente número de balnearios y en el deterioro de la calidad de las aguas superficiales por efluentes urbanos.

En tercer lugar, debieran evaluarse las características físicas, químicas y de la flora y fauna planctónica de las aguas del embalse de La Vega. Los estudios realizados del medio ocupado por las especies citadas en esta investigación, apuntan a la necesidad de una buena calidad del agua (baja salinidad, elevada oxigenación y transparencia) para el desarrollo de estas especies. En la actualidad, las aguas del embalse parecen carecer de tales condiciones. El aspecto visual dista mucho del idóneo: suelen ser aguas turbias, con baja transparencia y en una avanzada fase de eutrofización patente en la abundante presencia de macrófitas (SARH, 1986). Probablemente, los escurrimientos de las zonas agrícolas que circundan La Vega y los efluentes urbanos contribuyen a este sensible deterioro del hábitat. Esto puede ser preocupante para la fauna nativa, aunque no necesariamente para la fauna exótica. Las especies de peces introducidas normalmente (como la carpa *Cyprinus carpio* y la tilapia *Oreochromis aureus*) son seleccionadas por su resistencia a condiciones pobres en términos de calidad del agua y rico estado trófico. El debate respecto a la relación causal entre introducción de especies exóticas y extinción de especies nativas no se ha resuelto, pero incluso si no hay una relación causal, el deterioro del hábitat sólo puede hacer cada vez más difícil para las especies nativas subsistir en ambientes dominados por especies introducidas. En el largo plazo, este proceso sólo puede conducir a la pérdida de riqueza filogenética en la mayoría de nuestros ecosistemas, como lo muestran los datos que hemos recabado en este estudio (*Tabla 19*).

## VII. LITERATURA CITADA

- Alstrom, K. y A. Bergman-Akerman, 1992.** Contemporary soil erosion rates in arable land in southern Sweden. *Geografiska Annaler* 74(2-3): 101-108.
- Angermeier, P. L. 1995.** Ecological attributes of extinction-prone species: Loss of freshwater fishes of Virginia. *Conservation Biology* 9: 143-158.
- Barbour, C. D. 1973.** A biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): A species flock from Mexican plateau. *Copeia*: 533-556.
- Barrett, E. C. y L. F. Curtis. 1995.** *Introduction to environmental Remote Sensing*. London. Chapman and Hall.
- Bartsch, K. P., H Van Miegroet, J. Buettinger y J. P. Dobrowski. 2002.** Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at cap Willians, Utah. *Journal of Soil and Water Conservation* 57 (1): 29-37.
- Bird, A. C. 1991.** *Principles of Remote Sensing: Interaction of Electromagnetic Radiation with the atmosphere and the Earth*. En: Belward, A. S. y C. R. Valenzuela (eds). 1-16 p.p.
- Bollinne, A. 1982.** *Etude et prevision de l'erosion des sols limoneux cultivés en Moyenne Belgique*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Cocteur en Sciences Geographiques. Université de Liege.
- Boon, P. J. 1992.** Essential Elements in the case for river conservation. En: Boon, P. J., P. Calow y G. E. Petts (eds.). *River Conservation and Management*. 11-34 p.p. John Wiley & Sons.
- Bosque, S. J. 1992.** *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp. Madrid, España.
- Bosque, S. J. 1994.** *Sistemas de Información Geográfica. Prácticas con PC ARC/INFO E IDRISI*. RA – MA. Madrid, España. 478 p.
- Bradford, M. J. y J. R. Irvine. 2000.** Landuse, fishing, climate change and the decline of Thompson River, British Columbia, coho salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57:13-16.
- Brambila, José R. 1928.** Informe de la inspección. Inconformidad por obras hidráulicas que se están construyendo. [Archivo Histórico del Agua. Fondo Aprovechamientos superficiales, Caja, 29. Exp. 6236. Fojas, 42]
- Brown, L. R. 2000.** Fish communities and their associations with environmental variables, lower San Joaquin River drainage, California. *Environmental Biology of Fishes* 57: 251-269.
- Burrough, P. A. 1986.** *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford. Claredon Press.
- Cadieux, L. C. 1991.** Some endangered fishes En: Cadieux, L. C. (ed.). *Wildlife extinction*. Washington, D. C. Stone Wall Press Inc. 119-124.
- Castro-Aguirre, J. L. y E. F. Balart. 1993.** La ictiofauna de México: pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* XLIV: 327-343.
- Cebrián de Miguel, J. A. y D. Mark. 1986a.** *Modelos topográficos digitales en métodos cuantitativos en Geografía: enseñanza, investigación y planeamiento*. Editorial AGE. Madrid, España. 334 p.p.
- Cerda, A. y H. Lavee. 1999.** Escorrentia y erosión a lo largo de un gradiente climático altitudinal afectado por el pastoreo en el desierto de Judea. *Cuadernos Geográficos* 29: 27-50. Universidad de Granada, España.
- CETENAL. 1977.** *Modificaciones al sistema de clasificación FAO-UNESCO. Una opción ante el problema de la clasificación de suelos para México*. CETENAL, Secretaria de Programación y Presupuesto, México
- Channell, R. y M. L. Lomolino. 2000.** Trajectories to extinction: spatial dynamics of the contraction of geographical ranges. *Journal of Biogeography* 27: 169-179
- Chuvienco, E. 1996.** *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp. Madrid, España. 568 p.p.
- Clarke, K. R. y Warwick, R. M. 1998a.** Quantifying structural redundancy in ecological communities. *Oecologia* 113: 278–289.
- Clarke, K. R. y Warwick, R. M. 1998b.** A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology* 35: 523–531.



- Colombo, J. C., C. Bilos, L. M. Remes, D. Coalutti, D. Landoni y P. Brochu 2000. Detritivorous fish contamination in the Río de la Plata estuary: a critical accumulation pathway in the cycle of anthropogenic compounds. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57: 1139-1150.
- Conabio, 1998. *La diversidad biológica de México: Estudio de país*. Conabio, México.
- Conanp. 2000. *Programa de Manejo: Área de protección de flora y fauna La Primavera*. Conanp-SEMARNAT, México 133 p.p.
- Contreras-B., S. y M. Lozano-V. 1994. Water, endangered fishes, and development perspectives in arid lands of Mexico. *Conservation Biology* 8: 379-387.
- Cowen, D. J. 1988. GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(11): 1551-1555.
- Curran, P. J. 1985. *Principles of remote sensing*. Longman. London, England. 282 p.p.
- De la Vega-Salazar M., T. L. Martínez y C. Macías-García. 1997. Bioaccumulation of methyl parathion and its toxicology in several species of the fresh water community in Ignacio Ramirez dam in Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 38: 53-62.
- De la Vega-Salazar, M. 2003. Factores limnológicos y ecológicos asociados a la extinción de las especies de peces *Skiffia francesae* y *Zoogoneticus tequila*. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México 123 p.p.
- De la Vega-Salazar, M., E. Avila-Luna, y C. Macías-García. 2003. Ecological evaluation of local extinction: the case of two genera of endemic Mexican fish, *Zoogoneticus* and *Skiffia*. *Journal Biodiversity and Conservation* 12: 2043-2056.
- Deacon, J. E., G. Kobetich, J. Williams y S. Contreras. 1979. Fishes of North America: Endangered, threatened or of special concern. *Fisheries* 4: 29 – 44.
- Diario Oficial de la Federación. 1994. Norma Oficial Mexicana. NOM-059-ECOL-1994. 16 de mayo de 1994, México. 54 p.p.
- Diario Oficial de la Federación. 2002. Norma Oficial Mexicana. NOM-059-ECOL-2002. 16 de mayo de 2002, México. 54 p.p.
- Dixit, A. S., R. I. Hall, P. R. Leavitt, R. Quinlan y J. P. Smol. 2000. Effects of sequential depositional basins on lake response to urban and agricultural pollution: a palaeoecological analysis of the Qu'Appelle Vally, Saskatchewan, Canada. *Freshwater Biology* 43: 319-337.
- Domagalski, J. L., N. M. Dubrofsky y C. R. Kratzer. 1997. Pesticides in the San Joaquin River, California: inputs from dormant sprayed orchards. *Journal Environmental Quality* 26: 454-465.
- Duecker, K. J. 1987. Geographic Information Systems and Computer-Aided Mapping. *Journal of American Planning Association* 383-390 p.p.
- Ehrlich, P. R. y A. H. Ehrlich. 1984. *Extinction*. Random House, Nueva York. 103-126 p. p.
- Ehrlich, A. H. y P. R. Ehrlich. 1992. Causes and consequences of the disappearance of biodiversity. En: Sarukhán, J. y R. Dirzo (comps.) *México ante los retos de la biodiversidad*. Conabio. México.
- Espinosa, H. 1993. Riqueza y diversidad de peces. En: Flores, O. y A. Navarro (comps.) *Biología y problemática de los vertebrados en México*. Ciencias, núm. Especial 7.
- Espinosa, H., M. T. Gaspar-Dillanes y P. Fuentes-Mata. 1993. *Listados faunísticos de México. Los peces dulceacuícolas mexicanos*. Instituto de Biología, UNAM.
- Evans, R. 1995. Some methods of directly assessing water erosion of cultivated land- a comparison of measurements made on plots and in fields. *Progress in Physical Geography* 19 (1):115-129.
- Faith, D. P. 1992. Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biol. Conserv.* 61: 1–10.
- Faith, D. P. 1994. Genetic diversity and taxonomic priorities for conservation. *Biol. Conserv.* 68: 69–74.
- Flessa, K. W. y D. Jablonski. 1983. Extinction is here to stay. *Paleobiology* 9: 315-321.
- Flores, O. y P. Gerez. 1994. *Biodiversidad y conservación en México: vertebrados, vegetación y uso del suelo*. UNAM/Conabio. México.

- Frissell, C. 1993. Topology of extinction and endangerment of native fishes in the Pacific Northwest and California (USA). *Conservation Biology* 7: 342-354.
- Gao, Q, L. Ci y N. Yu. 2002. Modeling wind and water erosion in northern China under climate and land use changes. *Journal of Soil and Water Conservation* 57 (1): 47-55.
- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Gesundheit, M. P. 2004. Biogeografía evolutiva de la familia Goodeidae (Cyprinodontiformes). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 72 p.p.
- Gilbert, M. A., J. González-Piqueiras y J. García-Haro. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección* 8: 1-10 p.p.
- Govers, G. 1991. Rill erosion on arable land in central Belgium.: Rats, controls and predictability. *Catena* 18: 133-155.
- Grace III, J. M. 2004. Soil erosion following forest operations in the southern Piedmont of central Alabama. *Journal of Soil and Water Conservation* 59 (4): 160-166.
- Groombridge, B. 1982. *Global Biodiversity. Status of the Earth's living resources*. World Conservation Monitoring Centre. Chapman and Hall, Londres, Reino Unido, 192-247.
- Guerra, P. F. 1980. Fotogeología. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Harper, J. L. y Hawksworth, D. L. 1995. *Biodiversity: measurement and estimation*. Preface: The Royal Society. Chapman & Hall, Londres, Reino Unido, 345: 5-12 p.p.
- Hedrick, P. W., R. C. Lacy, F. W. Allendorf y M. E. Soulé. 1996. Direction in conservation biology: comments on Caughley. *Conservation Biology* 10: 1312 – 1320.
- Hill, J. 1991. Remote Sensing Systems: Sensors and plataformas. En: Belward, A. S y C. R. Valenzuela (eds.). *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resources Management in Developing Countries*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. 55 – 70 p.p.
- Humphrey, S. R. 1985. How species become vulnerable to extinction and how we can meet the crises. En: Hoage, R. J. (ed.). *Animal extinctions: what everyone should of know*. Washington. D. C. Smithsonian Institution. 9-29 p.p.
- Humphries, C. J., Williams, P. H. y Vane-Wright, R. I. 1995. Measuring biodiversity value for conservation. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 26: 93–111.
- Igarzabal de Nistal, M. A. 1989. Los sistemas de información territorial en la planificación urbana y regional. *Estudios geográficos* 194: 157-165.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1974. Carta del Uso del Suelo 1: 50 000. Ameca F13D63. Jalisco. 1ª edición 1974,. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1974. Carta del Uso del Suelo 1: 50 000. Guadalajara Oeste F13D65. Jalisco. 1ª edición 1974, INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1975. Carta del Uso del Suelo 1: 50 000. Tala F13D64. Jalisco. 1ª edición 1975, INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1974. Carta del Uso del Suelo 1: 50 000. Tequila F13D54. Jalisco. 1ª edición 1974, INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1974. Carta del Uso del Suelo 1: 50 000. Etzatlán F13D53. Jalisco y Nayarit. 1ª edición 1974, INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1989. Guías para la interpretación de cartografía: Edafología. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1992. Carta topográfica 1: 50 000. Ameca F13D63. Jalisco. 1ª edición 1973, 5ª reimpresión, 1992. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1996. Carta topográfica 1: 50 000. Guadalajara Oeste F13D65. Jalisco. 2ª edición 1995, 1ª reimpresión, 1996. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1997. Carta topográfica 1: 50 000. Tala F13D64. Jalisco. 2ª edición 1995, 1ª reimpresión, 1997. INEGI. México.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1998.** Carta topográfica 1: 50 000. Tequila F13D54. Jalisco. 3ª edición 1996, 1ª reimpresión, 1998. INEGI. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2001.** Carta topográfica 1: 50 000. Etzatlán F13D53. Jalisco y Nayarit. 2ª edición 2000, 1ª reimpresión, 2001. INEGI. México.
- Jones, J. A., F. J. Swanson, B. C. Wemple y K. U. Snyder. 2000.** Effects of roads on hydrology, geomorphology and disturbance patches in stream networks. *Conservation Biology* **14**: 76-35.
- Jonsson, M., B. Malmqvist, y P. Hoffsten. 2001.** Leaf litter breakdown rates in boreal streams: does shredder species richness matter? *Freshwater Biology* **46**: 161 – 172.
- Kingston, D. Y. 1978.** *Skiffia francesae*, a new species of goodeids fish from western Mexico. *Copeia* **3**: 503-508.
- Köeppen, W. 1948.** Climatología. Fondo de Cultura Económica. México
- Lee, J. J., D. L. Phillips y V. W. Benson. 1999.** Soil erosion and climate change: Assessing potential impacts and adaptation practices. *Journal of Soil and Water Conservation* **54** (3): 473-476.
- Lillesand, T. y R. Kiefer. 1994.** *Remote Sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons. Inc. USA. 750 p.p.
- Liu, G., M. J. Lindstrom, X. Zhang, Y. Li y J. Zhang. 2001.** Conservation management effects on soil erosion reduction in the Sicuani Basin, China. *Journal of Soil and Water Conservation* **56** (2): 144-147.
- Ludwing, B. J., J. Chadoeuf y A. V. Auzer. 1995.** Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* **25**: 227-252.
- Lugo, H. J. 1988.** Elementos de Geomorfología Aplicada: Métodos Cartográficos. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Magurran, A. E. 1988.** *Ecological diversity and its measurement*. Chapman & Hall. London, U.K.
- Magurran, A. E. 2004.** *Measuring Biological Diversity*. Oxford: Blackwell Science. U.K.
- Malmqvist, B. y S. Rundle. 2002.** Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation* **29**: 134-153.
- Mason, C. F. 1991.** *Biology of freshwater pollution*. Longman Scientific & Technical. John Wiley & Sons, Inc. New York, E.U.A.
- Mass, J. F., V. Sorani y R. Álvarez. 1996.** Elaboración de un Modelo de Simulación del Proceso de Deforestación. Investigaciones Geográficas. Boletín Número especial 5. Instituto de Geografía, UNAM. México. 43-57 p.p.
- May, R. M. 1990.** Taxonomy as destiny. *Nature* **347**: 129–130.
- Meffe, G. K. y C. R. Carroll. 1997.** *Principles of conservation biology*. Sinauer Associates, Inc. Publ.
- Miller, R. R. 1961.** Man and the changing fish fauna of the American Southwest. *Papers of the Michigan Academy of Sciences* **46**: 365–404
- Miller, R. R. 1986.** Composition and derivation of the freshwater fish fauna of Mexico. *Ann. Es. Nac. Cienc. Biol. Mex.* **30**: 121 – 153.
- Miller, R. R. y J. M. Fitzsimons, 1971.** *Ameca splendens*, a new genus and species of goodeid fish from western Mexico, with remarks on the classification of the Goodeidae. *Copeia* **1**: 1 -13.
- Miller, R. R. y M. L. Smith. 1986.** Origin and geography of the fishes of Central Mexico. En: C. H. Hocutt y E. O. Wiley (eds.). *The Zoogeography of North American Freshwater Fishes* 487- 517 p.p. New York: Wiley Interscience Publication.
- Miller, R. R. y J. Humphries. 1996.** *Lista de trabajo de peces nativos de agua dulce de México*. Museo de la Universidad de Michigan. EUA.
- Miller, R. R., J. D. Williams y J. E. Williams. 1989.** Extinction of North American fishes during the past century. *Fisheries* **14**: 22-38
- Mittermeier, R. y C. Goettsch. 1992.** La importancia de la diversidad biológica de México. En: Sarukhán, J. y R. Dirzo (comps.) *México ante los retos de la biodiversidad*. Conabio. México.
- Morgan, R. P., R. E. Jacobson, S.B. Weisley, L. A. McDowell y T. T. Wilson. 1991.** Effects of flow alteration on benthic macroinvertebrate communities below the Brighton hydroelectric dam. *Journal of Fresh Water Ecology* **6**: 419-429.



- Moss, B. 1992.** *Ecology of fresh waters. Man and medium.* Blackwell Scientific Publications.
- Moyaho, M. A. C. 2002.** La elección de pareja en los goodeidos: Diferencias dentro y entre especies. Tesis de Doctorado. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. 117 p.p.
- Moyle, P. B. y R. D. Nichols. 1973.** Ecology of some native and introduced fishes of the Sierra Nevada foothills in Central California. *Copeia* 978-990.
- Moyle, P. B. y J. E. Williams. 1990.** Biodiversity loss in the temperate zone: Decline of the native fish fauna of California. *Conservation Biology* 4: 275-284.
- Nee, S. y R. M. May. 1997.** Extinction and the loss of evolutionary history. *Science* 278: 692-694.
- Nelson, E. M. 1984.** The comparative morphology of the weberian apparatus of the Catostomidae and its significance in systematics. *Jour. Morphol.* 83: 225 – 251.
- Newson, M. 1994.** *Hydrology and the river environment.* Oxford. Clarendon Press.
- Neyra, G. L. y M. S. Durand, 1998.** Amenazas a la biodiversidad. En: *La diversidad biológica de México: Estudio de país.* Conabio. México. 157-181 p.p.
- Ochoa-Tejeda, V., J. F. Parrot y J. H. Lugo. 2002.** Influencia de la pendiente en la medida de la longitud de las redes fluviales. III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra (Puerto Vallarta), GEOS, *Bol. Inform. Ep. II.* 22(2): 230-231.
- O’Gorman, L. 1990.** k X k Thinning. CVGIP, Vol 51: 195 – 215.
- Omoto, J.P., L. A. Martinelli, M. V. Ballester, A. Gessner, A. V. Krusdne, R. L. Victoria y M. Williams. 2000.** Effects of Inaduse on water chemistry and macroinvertebrates in two streams of the Piracicaba River basin, south-est Brazil. *Freshwater Biology* 44:327-337.
- Parrot, J. F. 1997 – 2004.** Programas utilizados (**Anexo IV**)
- Parrot, J. F. , V. Ochoa-Tejeda. 2004.** Manual para generar MDT. Serie Varia. Instituto de Geografía. UNAM México.
- Parrot, J. F. y V. Ochoa-Tejeda y J. Lugo. 2005.** Drainage network length measurements in a 3D space. Comparison with drainage network length measurements from topographic maps. *Zeitchrift für Geomorphologie* (en revision).
- Peucker, T. K. y N. Chrisman. 1975.** Cartographic data structures. *The American Cartographer* 2(1):55-69
- Pimental, D. C., P. Resosudarma, K. Sinckir, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri y R. Blair. 1995.** Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267: 1117-1123.
- Richter, G. 1983.** Aspects and problems of soil erosion hazard in the EEC countries. In: Prendergast, A. (ed.). *Soil Erosion.* Direction General Agriculture Commission of the European Communities. 917 p.p.
- Rodríguez, J. S. 1928.** Queja presentada por la Comunidad agraria de Teuchitlán, en contra de la Hacienda de Labor de Rivera. Archivo Histórico del Agua, Fondo Aprovechamientos superficiales, Caja 259. Exp. 6236. Fojas, 35- 48]
- Rouse, J. W. Jr., R. H. Haas, J. A. Schell y J. C. Harlan. 1974.** Monotoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt, MD. 371 p.p.
- Seckely, A. C., D. J. Mulla y D. W. Bauer. 2002.** Streambank xumping and its contribution to the phosphorus and suspended sediment loads of the Blue Earth River, Minnesota. *Journal of Soil and Water Conservation* 57 (5): 243-250.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1986.** Oficio informando sobre la contaminación por lirio acuático que tiene la presa. [Archivo Histórico del Agua. Fondo Aprovechamientos superficiales. Caja 609, Exp. 17583. Fojas 7]
- Simberloff, D. 1974.** Equilibrium theory of island biogeography and ecology. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 5: 161-180.
- Simberloff, D. 1986.** The proximate cause of extinction. En: D. M. Raup y D. Jablonski (eds.) *Patterns and processes in the history of Life.* Springer-Verlag, Berlín. 259-276 p.p.
- Singh, V. P. 1995.** *Environmental Hydrology.* Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Sisk, T. D., A. E. Launer, D. R. Switky y P. R. Ehrlich. 1994.** Identifying extinction threats: global analyses of the distribution of biodiversity and expansion of the human enterprise. *BioScience* 44: 592-604.
- Soto-Galera, E., J. Paulo-Maya, E. López-López, J. A. Serna-Hernández y J. Lyons. 1999.** Change in fish fauna as indication of aquatic ecosystem condition in Río Grande de Morelia-Lago de Cuitzeo Basin, Mexico. *Environmental Management* 24: 133 -140.

- Soulé, M. E. 1985. What is conservation biology? *BioScience* 35: 727-734
- Soulé, M. E. 1986. *Conservation biology: The science of scarcity and diversity*. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.
- Terborgh, J. y B. Winter, 1980. Some causes of extinctions. En: Soulé, M. E. Y B. A. Wilcox. *Conservation biology: An evolutionary-ecological perspective*. Sunderland, Mass. Sinauer Associates, 119-133 p.p.
- Thomas, C. D. 1990. What do real population dynamics tell us about minimum viable population sizes? *Conservation Biology* 4: 324-327.
- Thomas, C. D. 1994. Extinction, colonization, and metapopulations: Environmental tracking by rare species. *Conservation Biology* 8(2): 373-378.
- Thornes, J. B. 1990. *The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes*. En: Thornes, J. B. (ed.). *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons. Chichester, England. 41 – 53. p.p.
- Tiscareño-López, M, A. D. Báez-González, M, Velásquez-Valle, K. N. Potter, J. J. Stone, H. Tapia-Vargas y R. Claveran-Alonso. 1999. Agricultural research for watershed restoration in Central Mexico. *Journal of Soil and Water Conservation* 54 (4): 686-692.
- Trombulak, S. C. y G. A. Frissell. 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology* 14: 18-30.
- United International Conservation Nature. 1996. *IUCN Red list of threatened animals*. Gland, Suiza.
- Van-Wright, R. I., Humphries, C. J. y Williams, P. H. 1991. What to Project: systematic and the agony of choice. *Biol. Conserv.* 55: 235–254.
- Vermeij, G. J. 1986. Survival during biotic crises: The properties and evolutionary significance of refuges. En: Elliot, D. R. (ed.). *Dynamics of extinction*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 231-246.
- Vermeij, G. J. 1988. The biology of human-caused extinction. En: Norton, B. G. (ed.). *The preservation of species: The value of biological diversity*. Princeton University Press. New Jersey. 28-49.
- Warwick, R. M. y Clark, K. R. 1995. New "biodiversity" measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. *Marine Ecology Progress Series* 129: 301–305.
- Warwick, R. M. y Clark, K. R. 2001. Practical measures of marine biodiversity based on relatedness of species. *Oceanography and Marine Biology*, 39: 207–231.
- Watson, A. y R. Evans. 1991. A comparison of estimates of soil erosion made in the field and from photographs. *Soil and Tillage Research* 19: 1727-1735.
- WCMC. 1992. *Global biodiversity. Status o the Earth´s living resources*. Chapman and Hall. Londres.
- Webb, S. A. y R. R. Miller. 1998. *Zoogoneticus tequila* a new goodeid fish (Cyprinodontiformes) from the Ameca Drainage of Mexico, and rediagnosis of the genus. *Occasional Papers of the Museum of Zoology the University of Michigan* 725: 1-23.
- Webb, S. A., Graves, J. A., Macias-García, C., Magurran, A. E, Ofoighil, D. y Ritchie, M. E. 2004. Molecular Phylogeny of the live-bearing Goodeidae (Cyprinodontiformes). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 30 (3): 527-544.
- Wilcox, B. A. 1980. Insular ecology and conservation. En: Soulé, M. E. Y B. A. Wilcox. *Conservation biology: An evolutionary-ecological perspective*. Sunderland, Mass. Sinauer Associates, 95-117 p.p.
- Wilkinson, G. G. 1991. The processing and interpretation of remotely-sensed satellite imagery: A current view. En: Belward, A. S. y C. R. Valenzuela (eds.). 71-96 p.p.
- Wilkinson, D. M. 1999. The disturbing history of intermediate disturbance. *Oikos* 84: 145–147.
- Williams, P. H. y C. J. Humphries. 1994. Biodiversity, taxonomic relatedness, and endemism in conservation. *See Ref.* 31: 269–287.
- Williams, P. H., C. J. Humphries y R. I. Vane-Wright. 1991. Measuring biodiversity: taxonomic relatedness for conservation priorities. *Aust. J. Syst. Bot.* 4: 665–679.
- Zambrano, L. M., Perrow, M. R., Macias-Garcia, C. y Aguirre-Hidalgo V. 1999. Impact off introduced carp (*Cyprinus carpio*) in subtropical shallow ponds in Central Mexico. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery* 6: 281-288.

# ***VIII. ANEXOS***

*Anexo I. Definición de "diversidad biológica" y "biodiversidad" (Gaston, 1996).*

<p>"La diversidad biológica se refiere a la variedad y variabilidad entre organismos vivos y los complejos ecológicos en los que se desenvuelven. La diversidad puede ser definida como el número de diferentes ítems y sus frecuencias relativas. Para la diversidad biológica, estos ítems son organizados en muchos niveles, desde ecosistemas complejos a estructura químicas que son la base molecular de la herencia. Entonces, el término abarca diferentes ecosistemas, especies, genes, y su abundancia relativa" (OTAN, 1987).</p>
<p>"La biodiversidad es la variedad de organismos en el mundo, incluyendo la diversidad genética y los ensamblajes que ellos forman. La amplitud del concepto refleja las interrelaciones de genes, especies y ecosistemas" (Reid y Miller, 1989).</p>
<p>"La diversidad biológica incluye a todas las especies de plantas, animales y microorganismos y los ecosistemas y procesos ecológicos de los cuales forman parte. Es decir, una gran variedad natural, incluyendo el número y frecuencia de ecosistemas, especies o genes en un ensamblaje dado" (McNeely <i>et al.</i> 1990).</p>
<p>"Biodiversidad es la variedad genética, taxonómica y de ecosistemas en organismos vivos de un área, ambiente, ecosistema o todo el planeta determinado" (McAllister, 1991).</p>
<p>"Biodiversidad es la variedad total de la vida en la tierra. Esto incluye todos los genes, especies y ecosistemas y procesos ecológicos de los cuales ellos forman parte" (ICBP, 1992)</p>
<p>"Diversidad biológica (= Biodiversidad). Rango completo de variedad y variabilidad dentro y entre los organismos vivos, sus asociaciones y complejos ecológicos. Término que abarca a ecosistemas, especies y paisajes así como niveles de diversidad intraespecífica (Fiedler y Jain, 1992).</p>
<p>"Biodiversidad es la variedad de organismos considerando todos los niveles, desde variaciones genéticas que pertenecen a las mismas especies a través de un orden de especies a géneros, familias, y hasta niveles taxonómicos superiores; incluyendo la variedad de ecosistemas, las cuales comprenden a las comunidades de organismos dentro de hábitats particulares y condiciones físicas bajo las cuales viven" (Wilson, 1992)</p>
<p>"Diversidad biológica significa la variabilidad entre los organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otras cosas, los ecosistemas terrestres y marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie (genética), entre las especies y de los ecosistemas" (WCMC, 1992).</p>
<p>"...biodiversidad – variedad estructural y funcional de las formas de vida de los niveles genético, poblaciones, especies, comunidades y ecosistemas..." (Sandlund <i>et al.</i> 1993).</p>
<p>"La biodiversidad o diversidad biológica es el grado de variación entre los organismos vivos y los complejos ecológicos en los que ocurren. El concepto de diversidad hace referencia al número de diferentes categorías que estos complejos expresan a múltiples niveles; desde la heterogeneidad de las estructuras químicas que son la base molecular de la herencia, hasta la variación en los ecosistemas" (Conabio, 2000).</p>



## Anexo II. Conceptos generales sobre Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica,

### Percepción Remota

La Percepción Remota (PR) es la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, un área o un fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos a cierta distancia, sin tener contacto con los elementos de la superficie terrestre (Lillesand y Kiefer, 1994). Una manera de obtener esta información es a través de la radiación solar, la cual incide sobre una superficie y es reflejada en proporciones que son determinadas por las características físicas y estructurales de ésta y, es captada por un sensor. En este sentido, la percepción remota se puede definir como la técnica de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la tierra (Chuvieco, 1996).

Los sensores remotos se definen como aquellos instrumentos capaces de captar las características de un objeto desde la distancia (Bird, 1991). En un sentido amplio se refiere a todos aquellos aparatos que pueden servir para medir y captar información sobre campos de fuerza (gravedad, magnetismo), energía acústica emitida por un cuerpo o reflejada por él y, energía electromagnética (Barrett y Curtis, 1995).

La base física del funcionamiento de los sensores remotos es que todo cuerpo cuya temperatura esté por encima del cero absoluto ( $0^{\circ}\text{K}$ ) presenta ciertas oscilaciones y movimientos en su estructura atómica o molecular que conllevan desplazamiento de electrones de un nivel energético a otro. Cuando un electrón pasa de un nivel orbital de mayor energía a uno inferior emite energía que es, radiación electromagnética (REM). La información que es captada por los sensores pertenece a una parte o a todo el espectro electromagnético.

Las diferentes bandas que lo conforman se definen por la amplitud de la onda ( $\lambda$ ) o bien por la frecuencia ( $\nu$ ). De esta manera, el espectro electromagnético oscila entre longitudes de onda menores a 0.3 nanómetros (nm) – que corresponde a la región de los rayos cósmicos y gamma -, y longitudes mayores a 100 m, correspondientes a la banda de las ondas de radio (Figura 17, Tabla 19).

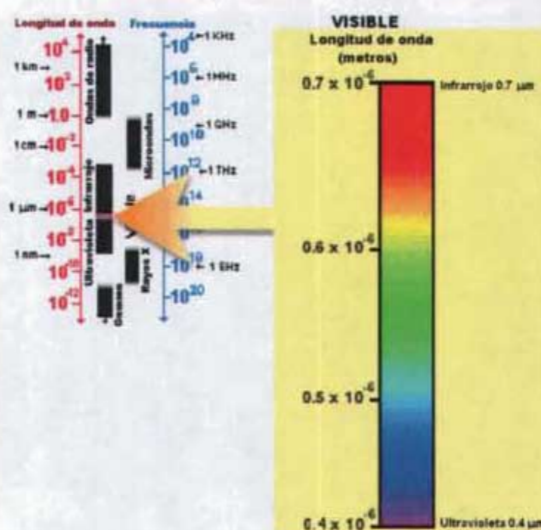


Figura 17. Espectro electromagnético. Modificación a partir de Lillesand y Kiefer, 1987.

Tabla 21. Bandas espectrales más frecuentemente utilizadas en la PR (Chuvienco, 1996).

Bandas espectrales	Características
Ultravioleta (0.1 a 0.4 $\mu\text{m}$ )	Se encuentra entre los rayos X y el espectro visible. El Sol es la fuente natural de los rayos UV. En la percepción remota se utiliza el intervalo del UV cercano
Espectro visible (0.4 a 0.7 $\mu\text{m}$ )	Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, la cual coincide con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Se distinguen tres segmentos, la banda azul (0.4 a 0.5 $\mu\text{m}$ ); la banda verde (0.5 a 0.6 $\mu\text{m}$ ); y la banda roja (0.6 a 0.7 $\mu\text{m}$ )
Infrarrojo (0.7 a 1000 $\mu\text{m}$ )	Infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 $\mu\text{m}$ ). Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
	Infrarrojo medio (1.3 a 8 $\mu\text{m}$ ). Es en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Es idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de puntos de calor
	Infrarrojo térmico (3 a 14 $\mu\text{m}$ ) Después de los 3 $\mu\text{m}$ la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre se capta en forma de calor. La mayor parte de ésta es absorbida por la atmósfera, pero existe un espacio de transmisión entre los 8 y los 14 $\mu\text{m}$ , que es en donde los sensores de los satélites pueden captarla.
Microondas (a partir de 1 mm)	Se encuentra entre el infrarrojo y la banda de radio, que corresponden a las longitudes de onda de mayor magnitud utilizadas en percepción remota. Se caracteriza por ser un tipo de energía al que la cubierta nubosa resulta bastante transparente
Radar	La región de las microondas comienza con las longitudes de onda milimétricas, a las que la atmósfera no hace ninguna interferencia. Los sensores que reciben este tipo de radiación son conocidos como radares.

Es importante resaltar que la cantidad de energía disponible no es la misma en todas las longitudes de onda, debido a la absorción selectiva de energía electromagnética por las sustancias existentes en la atmósfera, como es el caso del vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono. Se dice entonces, que la atmósfera es opaca en esas partes de la radiación (Chuvienco, 1996).

*Oxígeno ( $O_2$ )*. Filtra las radiaciones UV por debajo de 0.1  $\mu\text{m}$ , así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las microondas.

*Ozono ( $O_3$ )*. Es el responsable de la eliminación de la energía UV, filtra radiaciones inferiores a 0.3  $\mu\text{m}$ , así como un sector de las microondas (alrededor de los 27 mm).

*Vapor de agua*. Tiene una fuerte absorción en torno a 6  $\mu\text{m}$  y otras menores, entre 0.6 y 2  $\mu\text{m}$ .

*Dióxido de carbono ( $CO_2$ )*. Absorbe en el infrarrojo térmico (15  $\mu\text{m}$ ), con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2.5 y 4.5  $\mu\text{m}$ .

Como consecuencia de esta absorción, la percepción remota se reduce a determinadas bandas del espectro conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta y la REM se desplaza sin problemas (Figura 18).

Las principales ventanas atmosféricas son las del espectro visible e infrarrojo cercano, situado entre 0.3 y 1.35  $\mu\text{m}$ ; varias en el infrarrojo medio, de 1.5 a 1.8  $\mu\text{m}$ , 2.0 a 2.4  $\mu\text{m}$ , 2.9 a 4.2  $\mu\text{m}$  y 4.5 a 5.5  $\mu\text{m}$ ; en el infrarrojo térmico entre 8 y 14  $\mu\text{m}$ ; y en las microondas, por encima de 20 mm, en donde la atmósfera es prácticamente transparente (Chuvienco, 1996). Estas ventanas atmosféricas son idóneas para realizar procesos de percepción remota, por lo que el diseño de los sensores tiende a ajustarse a estas ventanas.



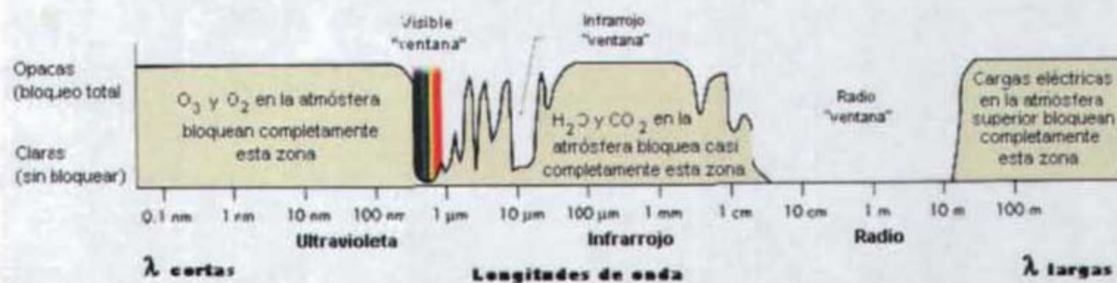


Figura 18. Ventanas atmosféricas. Modificación a partir de Lillesand y Kiefer, 1987.

Otros cambios se producen cuando la energía es reflejada o emitida desde la Tierra a través de la atmósfera. En el momento en que los diferentes objetos de la naturaleza reciben la radiación electromagnética procedente de una fuente externa o al emitir radiación ellos mismos en una o varias longitudes de onda, es posible derivar información sobre sus propiedades físicas y químicas. Por lo tanto, cada objeto en la superficie de la Tierra es reflejado en longitudes de onda específicas conocidas antes como firmas espectrales y ahora denominadas curvas espectrales (Figura 19), las cuales pueden ser captadas por los sensores que se encuentran en los satélites (Bird, 1991).

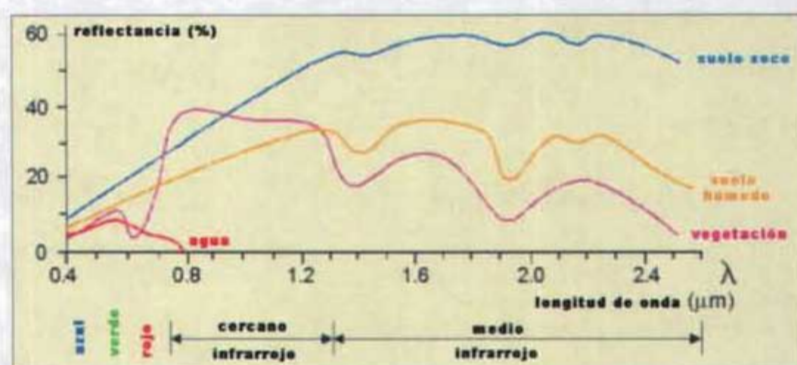


Figura 19. Firmas espectrales. Modificación a partir de Lillesand y Kiefer, 1987.

### Comportamiento espectral

A continuación se explica el comportamiento espectral teórico para el caso del suelo y la vegetación, ya que son los elementos del medio natural de interés en este trabajo.

**Suelo.** El comportamiento espectral de los suelos desnudos muestra una curva espectral ascendente y plana. Los factores que se tienen que tomar en cuenta son la composición química del suelo, estructura, textura y contenido de humedad. La composición química es la causa del color dominante con el que se percibe el suelo. Los de origen calcáreo tienden al color blanco que supone una alta reflectividad en el visible. Los suelos arcillosos tienen una mayor reflectividad en el rojo por el contenido en óxido de hierro. Un suelo de textura gruesa, apelmazada, seco y sin materia orgánica como los arenosos, presenta valores de reflectividad espectral elevados. Los suelos con alto contenido de humedad, fuerte estructura y fina textura como los arcillosos, darán una reflectividad baja en el infrarrojo medio (Chuvienco, 1996).

*Vegetación.* El comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo en la porción verde del espectro (0.55  $\mu\text{m}$ ). Respecto al infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose hacia el Infrarrojo medio (Chuvienco, 1996).

Estas características espectrales parecen estar relacionadas con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua almacenada en las hojas. La baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, especialmente, la clorofila, las xantofilas y los carotenos. Los dos últimos absorben en la banda del espectro cerca de los 0.445  $\mu\text{m}$ , mientras la clorofila presenta una banda de absorción en los 0.645  $\mu\text{m}$ . Entre ambas porciones del espectro parece haber una banda intermedia alrededor de los 0.55  $\mu\text{m}$ , en donde el efecto de absorción es menor. Por esta razón, aparece un pico de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que se percibe la vegetación vigorosa. Cuando la clorofila tiene menor influencia en la absorción existe una mayor reflectividad en la banda roja y, de ahí su color amarillento (Chuvienco, 1996).

La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano parece estar asociada con la estructura celular de la hoja, debido a las cavidades internas de la capa esponjosa del mesófilo, las cuales difunden y dispersan la mayor parte de la radiación incidente en esta banda del espectro. Por eso, la hoja sana tiene una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ) y una baja reflectividad en el espectro visible, especialmente en la banda roja (alrededor de los 0.645  $\mu\text{m}$ ). Es decir, cuanto mayor sea el contraste entre estas bandas, mayor será el vigor de la vegetación y más clara de su discriminación frente a otros tipos de cubierta (Chuvienco, 1996).

Por otro lado, a partir de los 1.4  $\mu\text{m}$ , el efecto absorbente del agua es muy claro y, la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. De hecho, en experimentos en el laboratorio se encontraron diferencias en esta región del espectro entre las hojas secas y las infiltradas con agua, especialmente en las longitudes de onda próximas a 1.4  $\mu\text{m}$ , 1.92  $\mu\text{m}$  y 2.7  $\mu\text{m}$  (Curran, 1985).

### **Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)**

El comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación (*IV*) que se basan – entre otros factores – en el contraste entre la banda roja del infrarrojo cercano del espectro. Los *IV* se construyen a partir de la combinación entre estas dos bandas (Banda 3 y Banda 4 de la imagen Landsat TM). Los *IV* son cocientes y efectúan una división píxel a píxel entre los niveles digitales en dos bandas de la misma imagen (Chuvienco, 1996). Estos índices son una medida de la proporción de cobertura vegetal en un área determinada y están diseñados para brindar una comparación de los cambios temporales y espaciales de la vegetación, al responder a la cantidad de vegetación fotosintéticamente activa en determinado píxel, al contenido de clorofila y óptica foliar, y a las características estructurales del dosel .



El *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) es uno de estos índices, y corresponde a una combinación matemática de las bandas espectrales, cuya función es realzar las características de la vegetación, en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros elementos (Rouse *et al.*, 1974). Este índice es la diferencia normalizada de la banda del rojo e infrarrojo cercano de la imagen Landsat TM, y cuyo rango de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1, que están correlacionados directamente con la biomasa (Gilibert *et al.*, 1997).

El contraste entre las respuestas del rojo y el infrarrojo es una medida sensible de la cantidad de vegetación, donde la máxima diferencia entre estas bandas corresponde a mayor densidad y actividad fotosintética, el mínimo contraste ocurre en áreas de poca vegetación y los valores negativos indican presencia de agua. Las áreas con alta densidad de vegetación tienen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano y una menor en el rojo, por lo tanto, presentan un mayor valor de *NDVI*.

El *NDVI* se define de acuerdo a la siguiente relación:

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

donde NIR y Rojo son las respectivas reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo.

En una imagen normalizada entre (0, 255), cuando la Banda 4 es igual a 255 y la Banda 3 igual a 0, el  $NDVI = \frac{255-0}{255+0} = 1$ ; cuando la Banda 4 es igual a 0 y la 3 es igual a 255, el  $NDVI = \frac{0-255}{0+255} = -1$ .

## Sensores Remotos

Un sensor puede estar ubicado en cualquier tipo de plataforma, como globos, barcos, submarinos, helicópteros, aviones, satélites, o bien ser ubicado en algún punto estratégico en tierra. Ni los satélites ni ningún tipo de plataforma provee información sin los sensores con los que van equipados (*Tabla 20*).

El Landsat 7 es el satélite operacional más reciente del programa Landsat, tiene un nuevo sensor denominado ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Una imagen Landsat 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. Las propiedades espectrales de las imágenes Landsat ETM+ son: un canal pancromático (0.52 - 0.90  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 15 m; tres bandas visibles (azul 0.45 - 0.515, verde 0.525 - 0.605 y rojo 0.63 - 0.690  $\mu\text{m}$ ); tres bandas en el infrarrojo (infrarrojo cercano 0.75 - 2.35, infrarrojo medio 1.55 - 1.75 e infrarrojo lejano 2.09 - 2.35  $\mu\text{m}$ ) con una resolución de 30 m y una banda del infrarrojo térmico (10.40 - 12.35  $\mu\text{m}$ ) de 60 m de resolución. En las bandas de las imágenes ETM+ la resolución temporal es de 16 días La resolución radiométrica es de 8 bits por píxel, lo que permite trabajar con paletas de 256 tonos de gris.

El Landsat 7 puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur y, en todas las longitudes. Una órbita del Landsat 7 es realizada en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por día, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente (norte a sur), el satélite cruza la línea del Ecuador entre las 10:00 y 10:15 (hora local) en cada pasaje y una imagen cubre igual área (185 x 185 km).

Tabla 22. Características de algunos de los satélites más conocidos y sus sensores.

Especificaciones técnicas	Landsat-TM	SPOT-HRV	NOAA-AVHRR	ETM+
Bandas espectrales ( $\mu\text{m}$ )	0.45 - 0.52 0.53 - 0.61 0.63 - 0.69 0.78 - 0.90 1.57 - 1.78 2.08 - 2.35 10.40 - 12.50	0.50 - 0.59 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89	0.58 - 0.68 0.72 - 1.10 3.55 - 3.93 10.30 - 11.30 11.50 - 12.50	0.45 - 0.515 0.525 - 0.605 0.630 - 0.690 0.750 - 2.350 1.550 - 1.750 2.090 - 2.350 0.520 - 0.900 Pancromática 10.40 - 12.35 Térmica
Tipo de órbita	Sincrónico-solar	Sincrónico-solar	Sincrónico-solar	Heliosincronizador
Inclinación	98.25°	98.7°	98.8°	98.2°
Período	98.9 min	101.4 min	101 - 102 min	99 min
Altitud nominal	705 km	832 km	853.7 km	705 km
Campo de visión	15°	4.1°	110.8°	110.8°
Ancho de la trayectoria	185 km	60 km	3,000 km	183 km
Resolución espacial	30 m X 30 m	20 m X 20 m	1.1 km X 1.1 km (1) 2.5 km X 6.9 km (2)	15 X 15 m Pancromática 60 X 60 m Térmica
Resolución radiométrica	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits
Notas: (1) Resolución en el nadir (2) Resolución fuera del campo del nadir				

Fuente: Reproducida a partir de Hill (1991).

## Imágenes de satélite

Los sensores multiespectrales son generadores de imágenes y existen dos principales sistemas: los de barrido o *scanner*, y los de pulsación (*push broom*). En ambos casos, se transforma una señal, la radiancia recibida en el sensor, en pulso eléctrico. Este pulso se cuantifica y genera un dígito que representa un elemento gráfico llamado píxel (*picture element*). Cuentan con un divisor de haz (*beam splitters*) que separa la radiancia en diferentes bandas del espectro (luz visible, infrarrojo próximo, infrarrojo cercano, infrarrojo térmico, etc.). Cada banda corresponde a un canal. A su vez, la energía de cada banda de radiancia genera una señal eléctrica que se digitaliza y se traduce en valores de canal para el píxel particular (Wilkinson, 1991).

En cada canal se produce un número binario (1 o 0) en ocho (1 byte) o diez bits. El conjunto de combinaciones da un total de 256 ( $2^8$ ) valores (o 1024 en el caso de 10 bits,  $2^{10}$ ). Son valores de carácter discreto, sólo puede adoptar alguno de los números enteros posibles, y positivos. El valor de cada píxel puede verse como un vector conformado por una sumatoria del valor de cada uno de los canales:  $X_p = (X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n)$ . El conjunto forma la imagen, que no deja de ser un conjunto de series numéricas (Figura 20).

En este sentido, una imagen digital debe entenderse como una malla fina formada por filas y columnas – una matriz de datos – que definen unas coordenadas espaciales en la que cada una de las tramas (píxeles) tiene un valor determinado. Es decir, una imagen digital es una sumatoria de píxeles (modelo de datos raster), cada uno de los cuales tiene un valor medio formado por la combinación de valores binarios de 8 o 10 bits ( $2^8$  o  $2^{10}$ ). A su vez, ese valor refleja la radiancia que cada canal ha captado de un área (Lillesand y Kiefer, 1987).

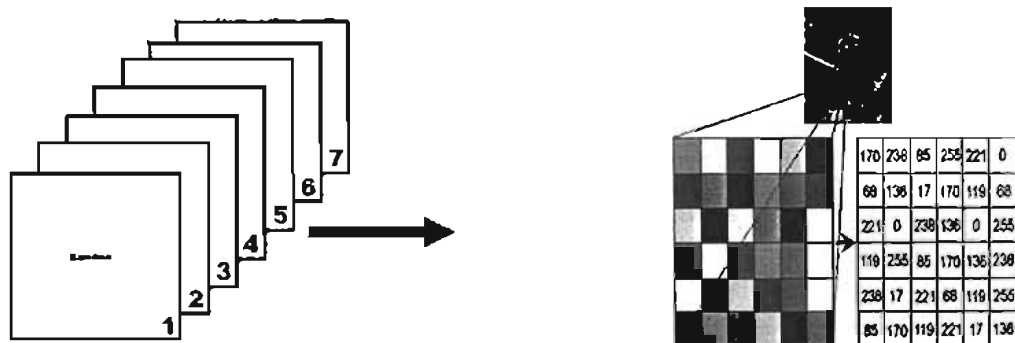


Figura 20. Imagen de satélite. Modificación a partir de Lillesand y Kiefer, 1987.

La organización de datos en una imagen digital es una matriz numérica en 3 dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. La orientación Norte-Sur se expresa a través de las filas de la matriz (líneas), mientras las columnas indican la disposición Oeste – Este (Chuvieco, 1996).

### Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) puede definirse como un programa informático para el procesamiento de datos que contienen referencias espaciales; de este modo, es posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas (Bosque, 1992). Pero sobre todo es un Sistema de Información. Un sistema de información es un conjunto de elementos organizados que permite dar respuesta a preguntas no necesariamente definidas de antemano (Igarzabal, 1989). Está conformado por una base de datos; una base de conocimiento (conjunto de procedimientos para el análisis y la manipulación de datos) y un sistema de interacción con el usuario.

En una definición más estricta, los *SIG* son un conjunto de herramientas para reunir, introducir (en la computadora), almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos (Burrough, 1986). Duecker (1987) y Cowen (1988) mencionaron que lo más característico de un *SIG* es su capacidad de análisis, de generar nueva información de un conjunto previo de datos mediante su manipulación y reelaboración.

El elemento fundamental en un *SIG* es el *dato*, el *hecho* medible u observable sobre una entidad de la realidad, este dato tiene un atributo de localización espacial (topológico), esto es, referenciable en un sistema de coordenadas. Los datos geográficos se caracterizan por:

- Su geometría (localización absoluta): ubicación en el espacio
- Su topología (relaciones cualitativas): proximidad, lejanía, dentro, fuera...
- Su atributo temático

Geometría y topología se refieren a las características espaciales del objeto; el atributo temático considera a las variables dependientes de ese objeto (densidad de población, habitantes, valor de la pendiente, temperaturas). Los *SIG* permiten relacionar los tres componentes del dato geográfico.

Existen dos modelos principales para la organización de la información: los modelos vectoriales, y los denominados raster. Un modelo de datos es un conjunto de directrices para la representación lógica de la información en una base de datos. Consiste en los nombres de las unidades lógicas de los datos y de las relaciones entre ellos (Peuquet, 1988 en Bosque, 1992).

*Representación vectorial.* Consiste en representar la forma topológica (puntos, líneas y polígonos) de los objetos del espacio mediante la codificación explícita de sus fronteras, esto es, delimitando el objeto del entorno. El elemento base es el vector (un segmento rectilíneo con un origen, un final y una flecha de sentido). De esta manera, un punto es un vector de dimensión "cero"; una curva sería una suma de segmentos rectilíneos o vectores, y un polígono es un conjunto de vectores con el origen y final en un mismo punto del espacio (Bosque, 1992). Este tipo de representación está unido a una geocodificación continua de las coordenadas espaciales, por lo tanto éstas pueden adoptar cualquier valor dentro de la escala de números reales.

*Representación raster.* La representación está vinculada a una codificación discreta de los puntos en el espacio, sólo pueden adoptar números enteros y positivos. En esta representación se superpone una malla sobre la que se identifican espacialmente los objetos (puntos, líneas o polígonos). La calidad de la representación depende del tamaño de la retícula, cuanto más fina, más detalle se podrá apreciar. La longitud de los lados de la cuadrícula base o píxel, en unidades del terreno, proporciona la escala del mapa raster generado. En la organización raster, el origen de las coordenadas (0,0) está en la parte superior izquierda del mapa (Bosque, 1992).

### **Modelos Digitales de Terreno (MDT)**

Los modelos digitales de terreno (*MDT*) también conocidos como modelos digitales de elevación se han definido como una representación digital de la variación continua del relieve en el espacio (Burrough, 1986; Cebrián y Mark, 1986a). Bosque (1994) lo definen como una representación de la topografía expresada como la elevación, la pendiente y la orientación de la misma del territorio, en formato digital. Un *MDT*, generalmente representa la topografía del terreno, es decir, la altura (s.n.m.) en cada punto (píxel) de un área. Los *MDT* se pueden representar mediante tres tipos de modelo de datos distintos (Peucker y Chrisman, 1975). Las diferencias entre ellos residen en cuáles son los elementos base utilizados: puntos, líneas y funciones matemáticas.

*Puntos.* En cada uno de ellos se tiene su posición geométrica (mediante  $X$ ,  $Y$ ) y la altura de la topografía. Existen dos modalidades según los puntos estén dispuestos regularmente sobre el espacio (matriz de altitudes) o distribuidos de modo irregular (*Red Irregular de Triángulos, TIN*).

*Líneas.* Se usa una línea para recoger la localización espacial y la altitud de los datos. Es posible utilizar las propias curvas de nivel tomadas de un mapa fuente como las líneas estructurales del relieve, ríos, línea de cumbres, máxima pendiente, etc.

*Funciones matemáticas,* que establecen la relación entre las dos coordenadas espaciales y la variable altura. Se divide la superficie del terreno en pequeños trozos y las alturas de los puntos de muestreo situados en cada uno de estos fragmentos se ajusta (en relación a dos variables independientes que son las coordenadas  $X$ ,  $Y$ ) mediante una función matemática continua, por ejemplo un polinomio:



$$Z = f(X, Y) = a + b \cdot X + c \cdot X^2 + d \cdot Y + e \cdot Y^2$$

Un *MDT* se puede representar, principalmente, mediante dos modelos de datos: las matrices de altitud (modelo raster) y la estructura *TIN*, que corresponde a un modelo vectorial.

*Red Irregular Triangulada (TIN)*. El nombre de *TIN* se deriva de las siglas en inglés *Triangulated Irregular Network*. Es la estructura de datos más utilizada, se compone de un conjunto de triángulos irregulares unidos, los cuales se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no lineales y se aproximan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve (Peucker y Chrisman, 1975).

La generación de una estructura *TIN* parte de datos tomados con puntos, donde se conoce sus tres coordenadas  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , y a partir de ellos se desarrolla su triangulación. Se forman triángulos uniendo con líneas puntos contiguos. En un conjunto de puntos en un plano se pueden definir una infinidad de triángulos, pero los más adecuados para esta estructura son los equiláteros, con ángulos iguales o próximos a  $60^\circ$  (Burrough, 1986).

*Matrices de altitud*. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula puede adoptar formas variadas pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas de igual tamaño. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el intervalo entre filas y columnas. Las matrices de altitud suelen ser generadas por interpolación a partir de un modelo previo de contornos o por métodos fotogramétricos (Burrough, 1986; Bosque, 1992).

Los SIGs han jugado un papel importante en la creación de los *MDT*, sin embargo, el uso de algoritmos también es una buena herramienta para elaborar estos modelos (Burrough, 1986; Bosque, 1992). Debido a que un *MDT raster* no permite describir directamente la superficie que representa, se utilizan interpolaciones. La interpolación es un proceso que se emplea en la reconstrucción de una señal a partir de sus muestras.

Existen varios métodos de interpolación para crear los *MDT* de tipo raster. El primero es el fotogramétrico que consiste en hacer una correlación automática entre dos imágenes aéreas o de satélite. El segundo utiliza las curvas de nivel o puntos acotados. La retícula resultante se obtiene con la ayuda de interpoladores como el bicúbico, curvatura mínima, vecino más cercano y triangulación de Delaunay.

El tipo de interpolación que se utilizó es multidireccional. El algoritmo *Newmiel* (Parrot 1993 y 2003) trabaja por capas comprendidas entre dos curvas de nivel, las cuales corresponden a zonas cerradas y delimitadas dentro de la imagen. Por cada píxel ubicado en la capa se mide el valor de la distancia mínima ( $d_i$ ) entre este punto y la curva inferior de altitud  $A_i$  y su distancia mínima ( $d_s$ ) con la curva superior de altitud  $A_s$ .

El valor de la altitud  $A_p$  del píxel  $P(i,j)$  es igual a:

$$A_p = A_i + [(A_s - A_i) \times (d_i / d)]$$

donde  $d = d_i + d_s$

*Anexo III. Programas utilizados.*

Fuente	Programa	Aplicación
Parrot, J. F. 1997.	Ombrage	Calcula la sombra en función de la posición del Sol
Parrot, J. F. 1997.	Binar3	Genera una imagen binarizada de un tema
Parrot, J. F. 2001	Nb_pixitem	Calcula el número y el porcentaje de píxeles de un tema
Parrot, J. F. 2002	Rio4	Extrae los talwegs
Parrot, J. F. 2003	Brod 4_mx	Genera imágenes de entrada para los programas de interpolación
Parrot, J. F. 2003	Miel4_mx_v2	Realiza la interpolación multidireccional de capas de altitud por capas de altitud
Parrot, J. F. 2003	Reduc_mnt	Reduce o aumenta el tamaño de los píxeles del MDT
Parrot, J. F. 2003	Versant	Calcula el ángulo y las pendientes
Parrot, J. F. 2003	Mean_dip	Calcula las pendientes medias
Parrot, J. F. 2003	Disec2	Mide la densidad de disección de la red fluvial
Parrot, J. F. 2003	Tm_index	Calcula seis índices de reflectancia con diferentes bandas
Parrot, J. F. 2003	Pins	Produce un "streaching" calculando el color de cada píxel en función del valor de sus vecinos (4 o 8)
Parrot, J. F. 2003	Homo2	Calcula la homogeneidad tomando una ventana móvil de observación y un rango de reflectancia
Parrot, J. F. 2003	Extra_courbes2	Extrae curvas de nivel o capas de altitud con un intervalo altimétrico definido por el usuario. Genera también una tabla de correspondencia entre los tonos de gris creados y la altitud de cada una de estas curvas
Parrot, J. F. 2003	Disec3	Mide dentro de una ventana móvil el porcentaje de píxeles encontrados en la red fluvial
Parrot, J. F. 2003	Extract	Corta una imagen de 8 bits en cualquier zona
Parrot, J. F. 2003	Pegaim	Pega dos imágenes en tonos de grises
Parrot, J. F. 2004	Materos	Calcula el volumen total erosionado del área de captura
Parrot, J. F. 2004	Multidim_class	Intersecta imágenes
Parrot, J. F. 2004	Lake_filling	Rellena una presa o lago con el volumen del material erosionado que entra en la cuenca de captura
Parrot, J. F. 2004	Lake_bottom	Reconstruye el fondo de una presa o lago cuando se desconoce su batimetría

Anexo IV. Clasificación compilada de configuraciones de drenaje, según Guerra (1980)

