

01059 1  
Zej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA  
LOCALIZACION Y EVALUACION PRELIMINAR DEL  
POTENCIAL GEOHIDROLOGICO DEL ESTADO  
DE MORELOS.

**T E S I S**

QUE PRESENTA

**JOSE ALBERTO BALANCAN SOBERANIS**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN GEOGRAFIA**

(EVALUACION Y CONSERVACION DE RECURSOS NATURALES)

CIUDAD UNIVERSITARIA 1998.



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## *Agradecimientos*

*Al INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, por su apoyo y facilidades otorgadas en la realización de este trabajo de tesis.*

*A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, por la formación profesional recibida.*

*A:     Dra. Laura Elena Maderey Rascón  
        Maestro. Victor Manuel Martínez Luna  
        Dr. Raúl Aguirre Gómez  
        Maestro. Alberto López Santoyo  
        Dr. Juan Carlos Gómez Rojas*

*por su valiosa asesoría.*

*Al Ing. Alfonso García Sesento, de la Gerencia Regional Balsas de la Comisión Nacional del Agua, por su inapreciable ayuda.*

*A todas aquellas personas que me brindaron su ayuda y estímulo.*

# USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA LOCALIZACIÓN Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOHIDROLÓGICO DEL ESTADO DE MORELOS

## ÍNDICE

### INTRODUCCIÓN

#### 1 PRINCIPIOS FÍSICOS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y ELEMENTOS DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

1.1 Definición de percepción remota .....	1
1.2 Espectro electromagnético .....	1
1.3 Interacción de la energía electromagnética con la materia .....	3
1.4 Elementos de un sistema de percepción remota .....	5
1.5 Plataformas de teledetección espacial .....	8
1.5.1 Landsat .....	8
1.5.2 Spot .....	11
1.6 Formación de una imagen .....	12
1.7 Análisis e interpretación de imágenes multiespectrales .....	13
1.7.1 Análisis de imágenes multiespectrales .....	13
1.7.2 Interpretación de imágenes multiespectrales .....	16

#### 2 ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica y vías de comunicación .....	19
2.2 Fisiografía.....	20
2.3 Uso del suelo y vegetación .....	22
2.4 Climatología.....	23
2.5 Datos generales de población.....	25
2.6 Geología regional. Generalidades .....	25
2.6.1 Estratigrafía .....	27
2.7 Hidrología superficial .....	28
2.7.1 Regiones hidrológicas, cuencas y subcuencas .....	28
2.7.2 Régimen y distribución de las corrientes .....	30
2.7.3 Uso del agua superficial .....	32
2.7.4 Recarga y descarga de acuíferos .....	33
2.8 Aguas subterráneas .....	34
2.8.1 Movimiento de las aguas subterráneas .....	36
2.8.2 Aprovechamiento de las aguas subterráneas .....	37

### 3 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOHIDROLÓGICO DEL ESTADO DE MORELOS POR MEDIO DEL ANÁLISIS DE LA IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT TM 26-47

3.1 Metodología .....	38
3.2 Reconocimiento e identificación de patrones espaciales .....	40
3.2.1 Patrones de relieve .....	40
3.2.2 Patrones de drenaje .....	43
3.2.3 Patrones de cobertura .....	46
3.2.4 Lineamientos .....	49
3.3 Interpretación geológica .....	51
3.3.1 Relaciones geomorfológicas .....	51
3.3.2 Correlaciones estratigráficas .....	62
3.4 Análisis e interpretación de lineamientos .....	64
3.5 Asociaciones estructurales .....	67
3.6 Interacciones geodinámicas .....	69
3.7 Interpretación geohidrológica .....	71

### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones .....	75
4.2 Recomendaciones .....	76

BIBLIOGRAFÍA .....	78
--------------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Espectro electromagnético. Bandas empleadas en percepción remota.....	3
1.2	Interacción de la energía con la materia a)transmisión, b)absorción, c)emisión d)dispersión y e)reflexión.....	5
1.3	Elementos de un sistema de percepción remota.....	6
1.4	Plataforma Landsat 1-2-3.....	9
1.5	Plataforma Landsat 4-5.....	10
1.6	Plataforma Spot.....	12
1.7	Captura y formación de una imagen multiespectral.....	13
1.8	Firmas espectrales de tres materiales comunes de la superficie de la tierra, 1)agua, 2)vegetación y 3)suelo.....	16
2.1	Vías de comunicación del Estado de Morelos.....	20
2.2	Provincias fisiográficas.....	21
2.3	Uso del suelo y vegetación del Estado de Morelos.....	22
2.4	Climas del Estado de Morelos.....	24
2.5	Municipios del Estado de Morelos.....	25
2.6	Columna estratigráfica del Estado de Morelos.....	28
2.7	Cuenca del Río Balsas y sus subcuencas.....	29
2.8	Ríos principales del Estado de Morelos.....	31
2.9	Subcuencas principales del Estado de Morelos.....	31
2.10	Movimiento de agua subterránea.....	36
3.1	Imagen de satélite Landsat TM 26-47, combinación de bandas espectrales 2, 3 y 4...39	39
3.2	Área de estudio. Sección de la imagen de satélite Landsat TM 26-47 .....	41
3.3	Patrones de relieve .....	42
3.4	Patrones de drenaje .....	45
3.5	Área de estudio. Sección de la imagen de satélite Landsat TM 26-47, combinación de bandas espectrales 2, 4 y 7.....	47
3.6	Patrones de cobertura .....	48
3.7	Lineamientos .....	50
3.8	Relaciones geomorfológicas .....	61
3.9	Correlaciones estratigráficas .....	63
3.10	Interpretación de lineamientos .....	66
3.11	Interacciones geodinámicas .....	70
3.12	Interpretación geohidrológica .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Llave de análisis.....	18
2.1	Aprovechamientos subterráneos por acuífero y volumen anual del Estado de Morelos.....	35
3.1	Patrones de cobertura.....	49
3.2	Interpretación de los materiales y procesos geológicos superficiales.....	54
3.3	Interpretación de la litología superficial y del subsuelo.....	62
3.4	Interpretación de la litología del subsuelo y asociaciones estructurales.....	68
3.5	Interpretación de la secuencia estructural y de movimiento relativo.....	69

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los recursos naturales, renovables y no renovables, que posee una región es fundamental para su desarrollo. Esta información constituye la base de los programas de planeación y de estrategias de crecimiento. El agua, en particular, es un elemento vital para la vida, de su existencia y abundancia depende en gran medida el desarrollo de los asentamientos humanos.

Nuestro país está formado en más del 50% por zonas áridas y semiáridas, donde la escasez de agua superficial obliga a emprender su búsqueda en el subsuelo implementando metodologías para la interpretación geológica-geohidrológica a través de las imágenes de satélite y de definir el marco conceptual hidrogeológico de los acuíferos.

La teledetección o percepción remota es la técnica de adquirir y analizar información de los objetos o fenómenos sin tener contacto físico con ellos (Universidad de Purdue, 1985). Esta tecnología se aprovecha con éxito en la investigación de los recursos naturales de la tierra en forma global o detallada.

La riqueza de información que posee una imagen de satélite es visualizada mejor por el intérprete, cuando ésta es manipulada en forma digital y se resaltan los rasgos de interés.

La utilización de los datos obtenidos por percepción remota en los procesos de exploración, se ha incrementado sustancialmente en los últimos años, principalmente en las siguientes áreas de aplicación: inventario forestal y de cuerpos de agua, ordenamiento territorial e impacto ambiental, producción de cartografía temática básica, geológica y de uso del suelo, prospección geohidrológica, etcétera.

El objetivo de este trabajo es localizar y evaluar el potencial geohidrológico del Estado de Morelos, aplicando la metodología " Exploración de Agua Subterránea" de la U.S. Geological Survey.

El trabajo está dirigido a los profesionales interesados en la Geohidrología y Percepción Remota, así como a todas aquellas personas relacionadas con la evaluación y conservación de los recursos naturales.

El Estado de Morelos se eligió por presentar diversos grados de explotación de acuíferos, con gran demanda de agua en los sectores urbano, agrícola e industrial, propiciado por el crecimiento acelerado de la población y principalmente por contar con la información necesaria y suficiente para llevar a cabo el estudio.

El trabajo está organizado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presentan los principios físicos de la Percepción Remota y los elementos de análisis e interpretación de imágenes multispectrales.

En el segundo capítulo se describe la zona de estudio resaltando las características geográficas, sociales y geohidrológicas más importantes.

En el tercer capítulo se desarrolla la metodología de la exploración geohidrológica a través de datos obtenidos por sensores remotos.

Por último se señalan las conclusiones y recomendaciones, así como la bibliografía consultada.

# **1 PRINCIPIOS FÍSICOS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y ELEMENTOS DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES**

## **1.1 Definición de percepción remota**

Con la aparición de la tecnología espacial, nace una nueva técnica, conocida como Percepción Remota Satelital que se define como " La ciencia de captar y coleccionar información de un objeto a través de medidas hechas a distancia, sin estar en contacto físico con él " (Universidad de Purdue, 1985).

La medición de la variación de la intensidad de los campos asociados a un objeto, permite deducir las características del cuerpo que los produce o altera. Algunos de los principales campos que se miden son: electromagnético, fuerzas, acústico, gravitacional, etcétera.

Actualmente el concepto está restringido a los métodos que emplean la energía electromagnética como medio de detección y medición de las características de un objeto.

Con base en lo anterior, se puede redefinir percepción remota como un "conjunto de actividades, que buscan la caracterización de las propiedades de los cuerpos naturales, a través de la detección, registro y análisis del flujo de energía radiante, por ellos reflejado o emitido" (Steffen et al, 1981).

La percepción remota conjunta varias técnicas (de fotografía aérea e infrarroja, radar y rayos x) para la detección, y de registro de la radiación electromagnética (en medios magnéticos como cintas, electrónicos como archivos digitales e impresiones o fotografías). Esto expande la visión humana hacia regiones del espectro electromagnético más allá del rango visible.

## **1.2 Espectro electromagnético**

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre si, uno eléctrico y otro magnético.

Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda y frecuencia. La primera hace referencia a la distancia entre dos picos o crestas sucesivas de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo.

La energía solar está compuesta por ondas que van desde las micras ( $\mu\text{m} = 10^{-6}$  metros) hasta los km registradas en diferentes anchos de banda. La organización de éstas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético (figura 1.1).

En dicho espectro a pesar de no existir fronteras bien definidas se distinguen las siguientes regiones: rayos gamma, rayos X, rayos ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio.

Para los fines de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual.

- Espectro visible (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar.

Suelen distinguirse tres bandas elementales: azul (0.4 a 0.5  $\mu\text{m}$ ); verde (0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$ ).

- Infrarrojo próximo (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  $\mu\text{m}$ ), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu\text{m}$ ), que incluye la porción emisiva de la superficie terrestre.
- Microondas (a partir de 1 mm), de gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

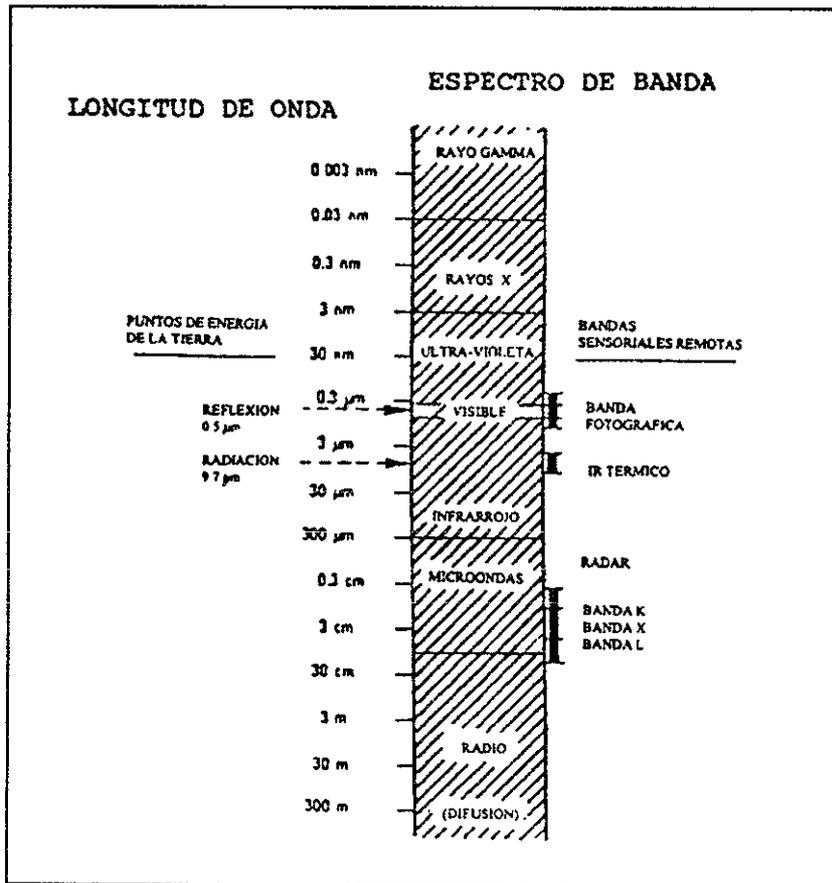


Figura 1.1 Espectro electromagnético. Bandas empleadas en percepción remota. (Sabin, 1978).

### 1.3 Interacción de la energía electromagnética con la materia

El sol tiene una temperatura superficial de casi 6,000 °K por lo cual irradia grandes cantidades de energía en todas las longitudes de onda. Esta radiación electromagnética, se transmite en el espacio y a través de la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre, sufriendo diferentes procesos de atenuación en forma selectiva (figura 1.2).

La radiación electromagnética puede ser transmitida, esto es, pasar a través de la sustancia. La velocidad de la radiación electromagnética cambia cuando ésta se transmite del aire o el vacío hacia el interior de otras sustancias.

La radiación electromagnética al propagarse por la atmósfera es absorbida selectivamente por sus componentes, tales como: vapor de agua, ozono, monóxido de carbono, etcétera.

Existen a lo largo de todo el espectro electromagnético regiones en donde la absorción electromagnética es relativamente pequeña. Estas regiones, llamadas ventanas atmosféricas, se caracterizan por tener una buena transmitancia de la radiación electromagnética.

Por otro lado, las porciones del espectro electromagnético donde la energía se absorbe casi en su totalidad son llamadas bandas de absorción.

La radiación puede ser emitida por una sustancia como una función de su estructura y su temperatura. Toda materia con temperatura arriba del cero absoluto ( $^{\circ}\text{K}$ ) emite energía.

La radiación puede dispersarse, esto es, desviarse en todas las direcciones y perderse finalmente por absorción o fuerte dispersión.

Dependiendo del tamaño de los elementos dispersores y de la longitud de onda de la radiación, se pueden distinguir dos tipos de dispersión: selectiva y no selectiva.

La dispersión selectiva incluye a su vez dos tipos: molecular o Rayleigh y dispersión Mie. La primera es producida esencialmente por las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera, esto es, por moléculas que son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación. Es la más conocida y de más influencia en la teledetección de recursos naturales, no marinos.

La dispersión Mie, es provocada cuando se trata de partículas de diámetro similar a la longitud de onda. Aerosoles y polvo atmosférico son los principales responsables de este tipo de dispersión.

La dispersión no selectiva la provocan el polvo, la niebla y nubes. Ocurre cuando los diámetros de las partículas son mayores, 10 veces en tamaño de la longitud de onda de la radiación.

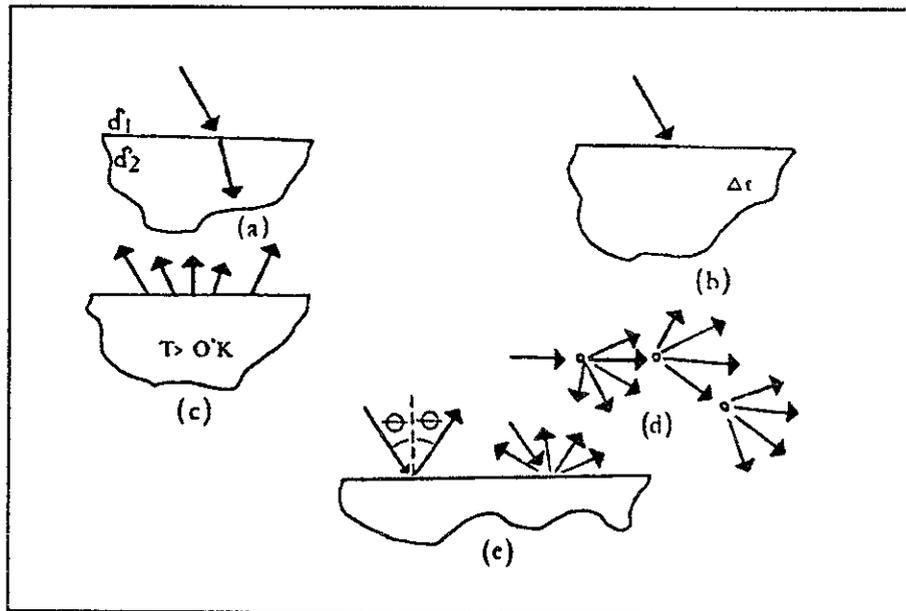


Figura 1.2 Interacción de la energía con la materia. a) transmisión, b) absorción, c) emisión, d) dispersión y e) reflexión.

en donde:

$\delta_1$	Densidad sustancia 1.	$\theta$	Ángulo de incidencia y/o reflexión.
$\delta_2$	Densidad sustancia 2.	$^{\circ}\text{K}$	Grados Kelvin.
T	Temperatura.	$\Delta t$	Incremento de temperatura.

La radiación puede ser reflejada, o sea, retornada desde la superficie de una sustancia. Este es uno de los procesos de mayor relevancia, ya que la mayor parte de la información se obtiene por medio del análisis de la energía reflejada por los objetos.

Con relación a la distribución espacial de la energía reflejada por una superficie se pueden considerar dos casos: reflexión especular, causada por superficies lisas; y reflexión difusa, provocada por superficies rugosas.

#### 1.4 Elementos de un sistema de percepción remota

El modelo más simple de adquisición de datos en percepción remota es el considerado por cuatro elementos básicos: fuente de iluminación, trayectoria y medio de propagación, escena u objeto a ser caracterizado y el sistema sensor, los cuales se describen mas adelante.

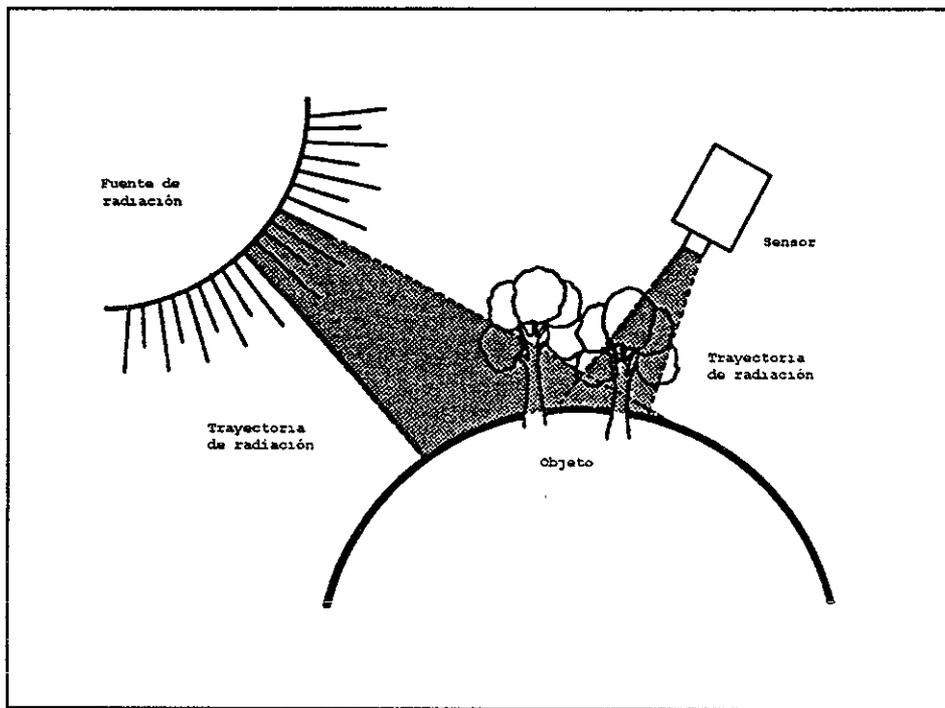


Figura 1.3 Elementos de un sistema de percepción remota.  
(Universidad de Purdue, 1985)

Como se puede observar en la figura 1.3 la fuente emite energía electromagnética la cual se propaga a través de la atmósfera, interactuando con ella y sufriendo modificaciones.

Al llegar a la superficie terrestre dicha energía es absorbida, reflejada, transmitida y dispersada por los objetos componentes de la escena, regresando parte de ella nuevamente a la atmósfera y volviendo a sufrir modificaciones.

Finalmente la energía alcanza al sistema sensor donde es medida, convertida en dato y registrada para su subsecuente procesamiento. Un sistema sensor, en su versión más simple, consta de uno o más sensores y un dispositivo de registro para la radiación electromagnética recibida.

A continuación se describen los elementos de un sistema de percepción remota.

- Fuente de energía, es todo cuerpo que irradia energía electromagnética. Esta fuente puede ser de dos tipos externa o natural y creada por el hombre o artificial.

Una fuente externa es aquella sobre la cual no se tiene control y sólo se puede hacer uso de las características de ésta, esperando en forma pasiva que la iluminación sea la adecuada para efectuar la observación. En la fuente creada por el hombre se tiene un control sobre las características de la energía irradiada.

- Trayectoria y medio de propagación, es el camino que sigue la energía electromagnética desde la fuente al objeto y del objeto al sistema sensor. El medio de propagación es la materia o ausencia de ella por la cual se transmite la radiación electromagnética desde la fuente hasta el sistema sensor.
- Escena u objeto, es todo aquello de lo cual se necesita recabar información, que interacciona con la radiación electromagnética, reflejándola o emitiéndola hacia el sistema sensor. El objeto puede ser cualquier cuerpo o rasgo presente en la superficie terrestre tales como ríos, colinas, vegetación, rocas, suelos, cultivos, ciudades, etcétera.
- Sistema sensor, es el instrumento que captura la radiación electromagnética, emitida o reflejada por una escena y la convierte en una señal eléctrica que es grabada en forma de dato numérico en un archivo digital. Los sistemas sensores más utilizados son las cámaras fotográficas y los barredores multiespectrales.

Existen cuatro aspectos importantes de un sensor en relación a su capacidad de resolución y son las siguientes:

- Resolución espacial, designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen.
- Resolución espectral, indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.
- Resolución radiométrica, sensibilidad del sensor, esto es, capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe (número máximo de niveles digitales de la imagen) y
- Resolución temporal, periodicidad con la que adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

## **1.5 Plataformas de teledetección espacial**

A los vehículos que transportan el sistema de sensores y lo coloca en una altura determinada se les da el nombre de plataformas, de éstas, las más usadas en percepción remota son los aviones y los satélites artificiales. A continuación se describen dos de las plataformas satelitales más utilizadas en la prospección de recursos naturales, Landsat y Spot.

### **1.5.1 Landsat**

Se origina con un programa denominado ERTS-1 (Earth Resource Technology Satellite) que más tarde tomó el nombre de LANDSAT al dividirse el programa en: Landsat y Seasat (López, 1990).

El primer lanzamiento se realizó el 23 de julio de 1972 contando a bordo con el sistema sensor de barrido multiespectral MSS (por sus siglas en inglés) diseñado para captar información en cuatro bandas del espectro electromagnético con una órbita cuasi polar y heliosíncrona, ésta permite tener una iluminación constante al paso del satélite a la misma hora por el mismo lugar, a una altura de 913 km y repetitiva cada 18 días. Su resolución espacial fue de 79 x 56 m.

Dos misiones posteriores fueron enviadas con el mismo tipo de barredor multiespectral (MSS) denominadas Landsat-2 y Landsat-3, donde cada escena cubre un área de 185 x 185 km aproximadamente, representados en 2,983 líneas de barrido con 3,548 píxeles (unidad mínima de área sensada) por línea para un total de 10.5 millones de píxeles por cada banda.

El satélite LANDSAT-3 contó con una quinta banda en la porción térmica del espectro que tenía una resolución de 120 m. La plataforma Landsat 1-2-3 se muestra en la figura 1.4.

La radiación que recibe el sensor MSS es descompuesta por medio de filtros, en las siguientes bandas:

- canal 4 de 0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$  (verde)
- canal 5 de 0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$  (rojo)
- canal 6 de 0.7 a 0.8  $\mu\text{m}$  (IR cercano)
- canal 7 de 0.8 a 1.1  $\mu\text{m}$  (IR cercano)
- canal 8 de 10.2 a 12.6  $\mu\text{m}$  (IR térmico, únicamente Landsat-3)

Los canales 1, 2 y 3 de esta plataforma (Landsat 1-2-3) corresponden al sensor RBV (Return Beam Vidicom, sistema de televisión de tres canales).

Una nueva generación de plataformas aparece en 1982 con el satélite LANDSAT-4 (figura 1.5) lanzado para orbitar a una altura de 705.3 km y pasar cada 16 días por el mismo lugar.

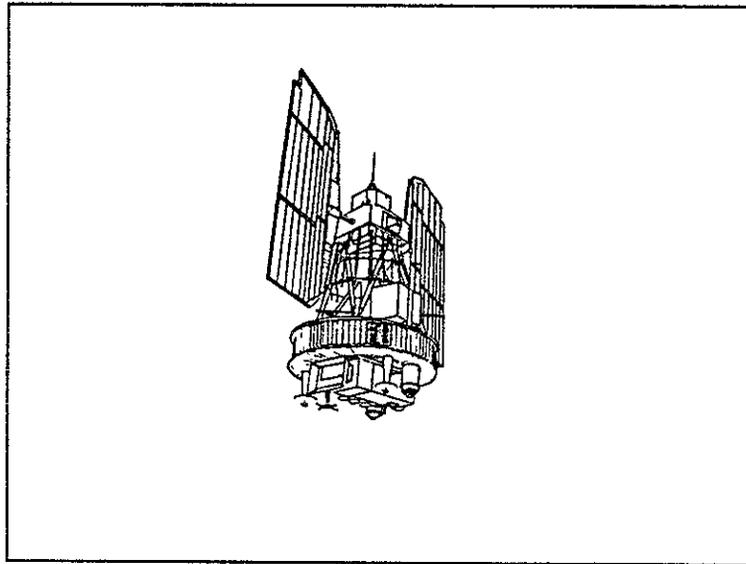


Figura 1.4 Plataforma Landsat 1-2-3.

Para este sensor cada pixel representa un área de 30 x 30 m, excepto en la banda 6 en cuyo caso la resolución espacial es de 120 x 120 m.

El sistema sensor Mapeador Temático ó TM (por sus siglas en inglés) montado en la plataforma Landsat 4-5, provee un mejoramiento en la resolución espacial y en la espectral con 7 bandas en lugar de 4 del MSS. Esta resolución adicional incrementa la cantidad de datos así, mientras una escena de Landsat MSS contiene cerca de 10.5 millones de pixeles, una de Landsat TM alcanza los 37 millones de pixeles.

En total las cuatro bandas del MSS contiene alrededor de 42 millones de valores de datos mientras que las siete bandas del TM contienen cerca de 250 millones de valores (López,1990).

Los datos del TM son capturados simultáneamente en las 7 bandas espectrales siguientes:

- Banda 1 de 0.45 a 0.52  $\mu\text{m}$  (azul)
- Banda 2 de 0.52 a 0.60  $\mu\text{m}$  (verde)
- Banda 3 de 0.63 a 0.69  $\mu\text{m}$  (rojo)
- Banda 4 de 0.76 a 0.90  $\mu\text{m}$  (IR cercano)
- Banda 5 de 1.55 a 1.75  $\mu\text{m}$  (IR medio)
- Banda 6 de 10.4 a 12.5  $\mu\text{m}$  (IR medio)
- Banda 7 de 2.08 a 2.35  $\mu\text{m}$  (IR térmico)

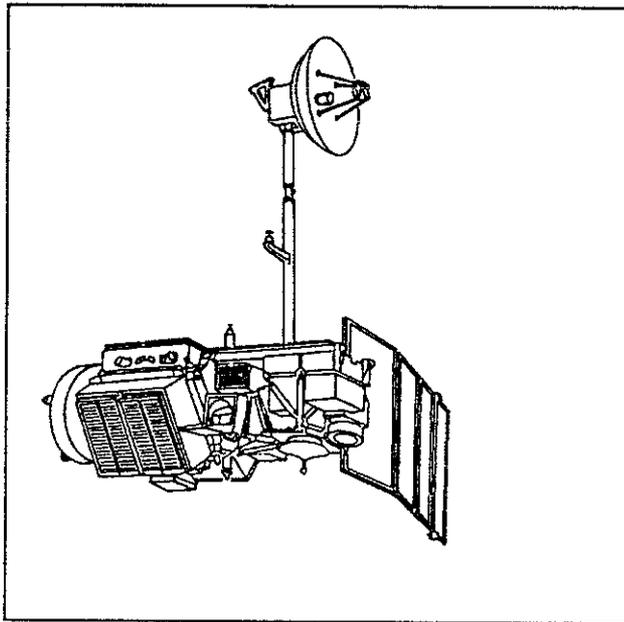


Figura 1.5 Plataforma Landsat 4-5.

### 1.5.2 Spot

El programa SPOT (System Pour L'Observation de la Terre) comenzó en Francia en 1978. El satélite Spot-1 (figura 1.6) fue lanzado en 1986 con dos barredores, HRV1 y HRV2 (High Resolution Visible) los cuales pueden operar en uno de dos modos:

Pancromático (PAN), una sola banda del visible es detectada y una imagen con pixeles de 10 x 10 m es producida.

Multiespectral (XS), consta de tres bandas con tamaño de pixel de 20 m x 20 m.

SPOT tiene una órbita heliosíncrona a una altura de 832 km y una resolución temporal de 26 días.

Cada uno de los sensores cubre una franja de 60 km sobre el terreno y de los cuales hay una ligera superposición del orden de cuatro km entre la franja observada por el HRV1 y el HRV2 con lo cual la cobertura total es una franja con una amplitud del orden de 116 km ó de 60 km según los requerimientos, ya que es posible operar simultáneamente ambos sistemas o bien uno solo. Sistema tipo "push-broom" que consta de CCD acoplado.

El espejo captador de radiación puede orientarse bien sea para observación vertical de la tierra o para visión oblicua, esta propiedad permite obtener imágenes con visión estereoscópica, las cuales se obtiene por observación de la misma franja desde dos órbitas diferentes con la limitante de que las imágenes sean de fechas distintas.

Las longitudes de onda para los diferentes modos son:

- Banda PAN de 0.51 a 0.73 m (blanco y negro)
- Banda XS1 de 0.50 a 0.59 m (verde)
- Banda XS2 de 0.61 a 0.68 m (rojo)
- Banda XS3 de 0.79 a 0.89 m (infrarrojo)

Dadas las características de las imágenes Spot, éstas han sido utilizadas principalmente en proyectos relacionados con la gestión de los recursos naturales, el aprovechamiento de los suelos e inventarios y la vigilancia de los cultivos.

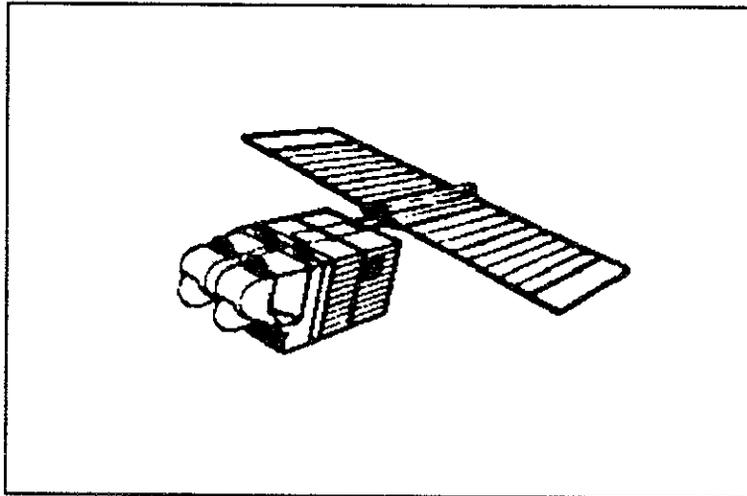


Figura 1.6 Plataforma Spot.

## 1.6 Formación de una imagen

Los barreadores multiespectrales generan una imagen a partir de un barrido de toda el área de la escena u objeto de estudio. La región de la escena que es visualizada por el sensor en un instante dado se llama campo instantáneo de visión (pixel) y constituye la porción mínima que el sensor puede captar y discriminar (Chuvieco,1990).

El barrido consiste en la división de la escena en pequeños elementos de imagen, pixel y en la captura y registro de energía reflejada o emitida por todos y cada uno de ellos (figura 1.7).

Esta señal puede provenir de una superficie homogénea, con una sola cobertura o heterogénea con varias. En el primer caso, el valor de pixel definirá correctamente a dicha cubierta, en el segundo resultará un promedio de las características espectrales de todas ellas.

En muchos equipos de exploración por barrido, la señal recibida se descompone a bordo en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detectores, sensibles a ese tipo de energía. En este caso se trata de exploradores de barrido multiespectral, pues se detecta la misma superficie del terreno en distintas bandas del espectro.

Una imagen digital multiespectral está formada por el arreglo matricial de valores de cada pixel, número que indica la intensidad de la energía proveniente del elemento en determinada longitud de onda, cada matriz corresponde a valores de una determinada longitud de onda.

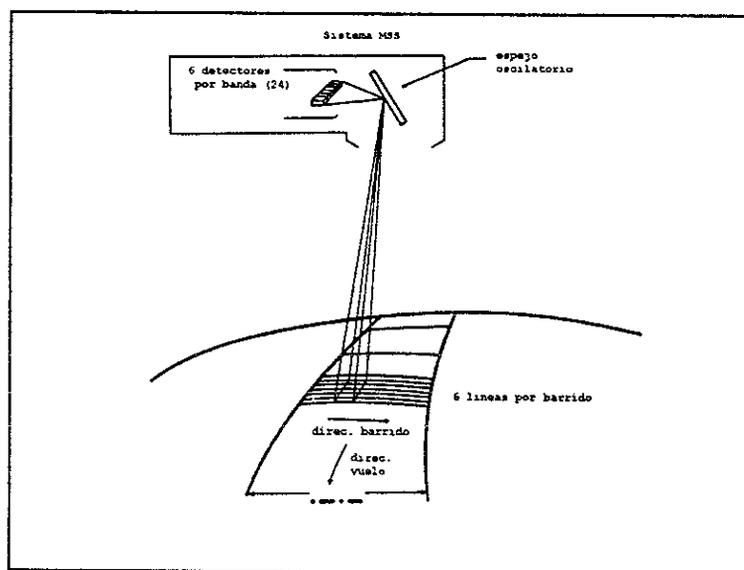


Figura 1.7 Captura y formación de una imagen multiespectral.  
(Purdue University 1985)

El sistema mundial de referencia (WRS por sus siglas en inglés) es la llave de localización global para las imágenes Landsat, está basado en un sistema de columnas y líneas (path y row) cuyos cruces determinan la localización nominal del centro de cada escena. Para este trabajo de tesis se utilizó la imagen Landsat TM 26-47 (path 26 y row 47).

## 1.7 Análisis e interpretación de imágenes multiespectrales

### 1.7.1 Análisis de imágenes multiespectrales

El análisis de una imagen se ha dividido en dos grandes ramas: el procesamiento de imágenes y el reconocimiento de patrones.

El procesamiento se entiende como un conjunto bien definido y clasificado de realces que preparan la imagen para poder efectuar una descripción de las regiones que la componen, resaltando rasgos que antes del proceso no se distinguen fácilmente (López, 1990).

El reconocimiento de patrones espaciales y espectrales implica la descripción de las regiones que forman una imagen. En otras palabras, reconocer un patrón primero requiere de su manifestación evidente por medio de un procesamiento bien definido a la imagen, seguido de una descripción cualitativa de sus propiedades morfológicas y estadísticas (López, 1990).

En la práctica existen dos modos de hacer análisis de imágenes, el primero denominado análisis manual, basado en la interpretación visual usando impresiones fotográficas de una imagen digital y el segundo llamado análisis asistido por computadora, el cual se fundamenta en el análisis cuantitativo de los datos almacenados en formato digital.

Tanto el análisis manual como el asistido por computadoras intentan detectar e identificar fenómenos importantes en una escena. Una vez identificados los fenómenos son interpretados y la información es utilizada en la solución de un problema (López, 1990).

Los elementos fundamentales en el análisis manual de imágenes incluyen: tono, color, tamaño, forma, textura, patrón, sombra, localización y contexto.

- Tono, representa el nivel de gris que un objeto, o grupo de objetos, es capaz de registrar en una película fotográfica en blanco y negro. La tonalidad para una imagen de satélite, está dada por la cantidad de energía reflejada y/o emitida por el objeto en una determinada banda espectral.
- Color, permite que los objetos sean identificados a través de variaciones en el color, la percepción del color es un elemento de nuestra conciencia sobre el medio ambiente.

El color y la tonalidad, de los objetos, son representativos del comportamiento espectral y están sujetos a variaciones en función de las condiciones ambientales y de la calidad y funcionamiento de los instrumentos de adquisición de datos.

- Tamaño, es uno de los factores más útiles para la identificación de un objeto. Para la evaluación de las dimensiones de un objeto, como elemento de identificación, se debe tomar en cuenta la escala de la imagen que está siendo analizada.
- Textura, es la menor superficie continua y homogénea distinguible en la imagen y posible de representación. Esto indica una forma y dimensiones definidas para este elemento y que la textura fotográfica sea un patrón de arreglos de elementos texturales.

Por medio de la textura es posible diferenciar dos regiones o dos áreas que presentan la misma tonalidad.

- Forma, indica la disposición espacial de los elementos texturales con propiedades comunes. El valor de la forma para el analista es que delimita la clase a la cual un objeto desconocido deba de pertenecer. Se define como clase a la selección de valores de píxeles de la imagen, que representa adecuadamente una categoría de interés como tipos de vegetación, suelo desnudo, cuerpos de agua, etcétera.

Con frecuencia la forma permite una identificación determinante y auxilia en el entendimiento del significado y función del objeto.

- Patrón, es definido como un arreglo espacial de los objetos de una escena, es una llave importante para descubrir el origen y/o función de un objeto.

Algunos patrones son básicamente culturales, otros naturales, aunque hay muchos que resultan de la interacción de factores naturales y culturales.

- Altura, ayuda al interprete a diferenciar dos regiones que poseen tonalidades similares. Cuando se disponen de pares estereoscópicos se puede tener una visión tridimensional del terreno y disponer de la altura de los objetos.
- Sombras en la superficie, son el resultado de la iluminación oblicua, por el sol, en la superficie del terreno en el instante de la toma de la imagen. En la vida cotidiana frecuentemente evaluamos el tamaño y la forma de los objetos, observando el largo o la amplitud de las sombras que ellos producen, en función del ángulo de elevación del sol en el horizonte según la hora del día.
- Localización, puede ser una llave de identificación de los objetos e informarnos su significado mediante la indicación de su uso. La localización de los objetos con relación a las características del terreno u otros objetos es frecuentemente un dato para determinar la identificación de su naturaleza.
- Contexto, algunos objetos pueden ser identificados por la cercanía y asociación de otros, la presencia de uno confirma la presencia de otros.

### 1.7.2 Interpretación de imágenes multispectrales

Para llevar a cabo la interpretación es necesario conocer el comportamiento espectral de los objetos a través de la firma espectral de los mismos, que se encuentran en la imagen (figura 1.8). Este conocimiento permitirá al especialista saber las tonalidades con las que se mostrarán los objetos.

Las características espectrales de los objetos son registradas con valores diferentes en cada una de las bandas que conforman una imagen multispectral, lo que posibilita la identificación de diferentes objetos por medio de la comparación entre bandas.

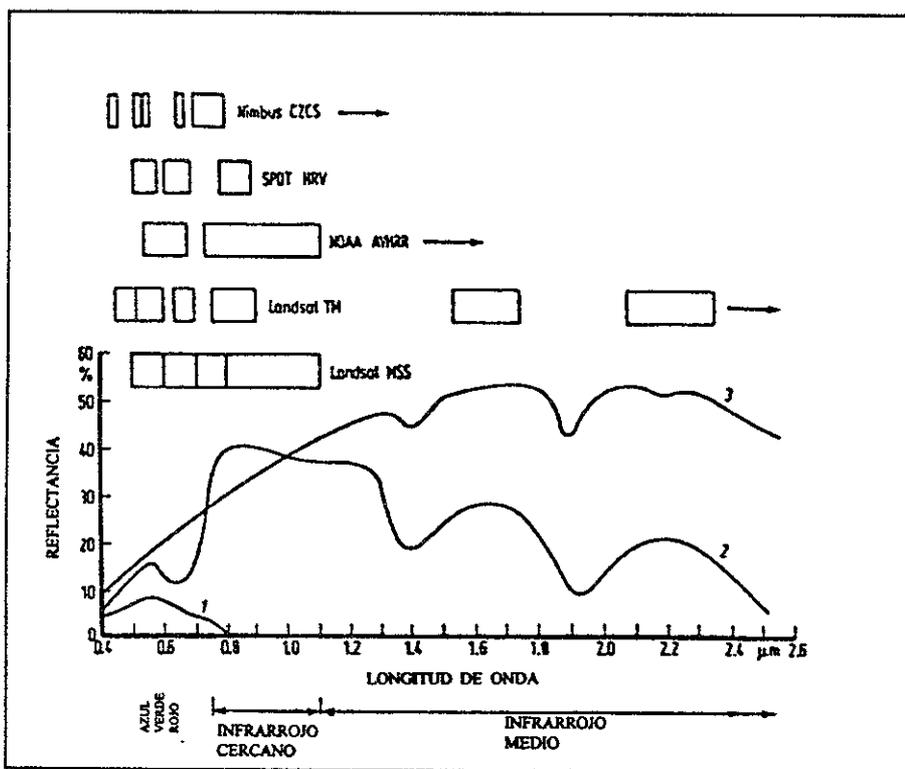


Figura 1.8 Firmas espectrales de tres materiales comunes de la superficie de la tierra. 1) agua, 2) vegetación y 3) suelo (Richards, 1986).

Por ejemplo, dos cosas distintas, como cuerpos profundos de agua y selva densa, presentan respuesta semejante en la banda 5 del sensor MSS, sin embargo pueden ser fácilmente discriminados cuando se analizan en la banda 7 del sensor TM, debido a que éste tiene una mayor resolución espectral.

El conocimiento previo de las características de los cuerpos en cada banda, auxilia en la selección de los canales adecuados para llevar a cabo la interpretación.

Para estudios geológicos, en general, los mejores canales son MSS5 - MSS7, TM3 - TM4 y SPOT2 - SPOT3. La banda MSS5 es útil debido a la asociación que existe entre la litología y la vegetación y en la banda MSS7 los aspectos estructurales son realizados. En la banda TM4 las unidades litológicas y geomorfológicas son bien definidas, en la banda SPOT3 se da el mismo comportamiento por estar casi en el mismo rango del espectro electromagnético de operación.

Los canales anteriores también se utilizan para levantamientos de red de drenaje, la banda MSS7 se emplea para el levantamiento de los ríos cuya anchura y posición topográfica permite la detección de la lámina de agua. Los ríos aparecen bien definidos en la banda MSS7, en particular cuando son generalmente anchos ya que poseen una lámina mayor de agua que permite mayor absorción de la energía electromagnética en la porción del infrarrojo, observándose tonos más oscuros en contraste con las zonas adyacentes.

Cuando se realiza la interpretación de una imagen es indispensable contar con llaves de análisis que permitan identificar los diferentes objetos que se encuentran en una escena. Una clave es integrada a partir de los elementos de análisis de una imagen. Por ejemplo una clave de análisis para la interpretación puede estar formada por solo tres elementos: tonalidad, comportamiento espectral y textura.

Las llaves de análisis describen todos los elementos que deben de poseer las clases. De esta forma la interpretación representa un proceso de identificación paso a paso, en que el especialista asigna el objeto a las clases probables y elimina paulatinamente las escogidas erróneamente.

La Tabla 1.1 muestra una llave de análisis con dos elementos Tonos de Gris y Textura, con los cuales se describen algunas de las principales clases. Con los elementos tonos de gris y textura, a partir de Landsat TM y correlacionadas a los sensores MSS y SPOT. C = claro, M = medio y O = Oscuro.

Tabla 1.1 Llaves de análisis.

CLASE	TONOS DE GRIS		TEXTURA
	TM 3 MSS 5 SPOT 2	TM 4 MSS 7 SPOT 3	
Vegetación natural	O	C	Gruesa
Agua limpia	O	O	Lisa
Agua sucia	M	O	Lisa
Suelo seco	C	C/O	Gruesa a lisa
Suelo húmedo	O	O	Mezclada
Vegetación quemada	M	O	
Área agrícola	M/O	C	Lisa
Caminos	C	O	Lineal
Pastos	C/M	M/C	Lisa lustrosa
Zona de reforestación	O	C/M	Lisa con sombra y límites demarcados
Arena (playas)	C	C	Lisa
Sombra	O	O	Lisa
Nube	C	C	
Área urbana	C	O	Indefinido con delimitación de calles
Área agrícola en desarrollo	M	O	Lisa
Cultivo seco	C	C	Lisa

## **2 ÁREA DE ESTUDIO**

### **2.1 Ubicación geográfica y vías de comunicación**

El Estado de Morelos se ubica en la porción central de la República Mexicana. Por su extensión territorial es una de las entidades más pequeñas del país. Se encuentra localizado entre las coordenadas geográficas: 18° 22' 30" y 19° 07' 10" de latitud norte, 98° 42' 22" y 99° 24' 13" de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

En relación con sus fronteras naturales limita al norte con: las Sierras de Zempoala, Chichinautzin y Nevada, específicamente con el Volcán Popocatepetl; al sur con los Ríos Amacuzac y Tepalcingo; al poniente con las Sierras de Ocuilan y Chalma; al oriente con la Sierra de Puebla y el Río Nexapa.

De acuerdo con la división política del país, el Estado de Morelos limita al norte con el Distrito Federal y el Estado de México, al este y sureste con el Estado de Puebla, al sur y suroeste con el Estado de Guerrero y al oeste con el Estado de México.

Ocupa una superficie de 4,941 Km<sup>2</sup> que representa el 0.25% del territorio nacional y cuenta con 33 municipios (INEGI, 1990).

El Estado de Morelos se encuentra bien comunicado interiormente y hacia las entidades vecinas, a través de autopistas de cuota, carreteras federales y estatales, vías ferroviarias, aeropuertos de mediano alcance y algunas aeropistas para aviones monomotores.

Morelos se comunica con el Distrito Federal a través de cuatro carreteras pavimentadas: autopista México-Cuernavaca, carretera federal México-Acapulco, carretera federal de cuota México-Cuautla, carretera federal 115 México-Cuautla (figura 2.1).

Actualmente las vías férreas alcanzan una longitud de 351 Km. Como eje principal está el que cubre el trayecto México-Estación Cuautla. Los factores que han favorecido su excelente red de comunicaciones son: su reducida extensión territorial, su colindancia con el Distrito Federal y su localización intermedia entre éste y el puerto de Acapulco.



La provincia del Eje Neovolcánico colinda al norte con la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte; al sur con la Sierra Madre del Sur; al oeste y este llega al Océano Pacífico y al Golfo de México, respectivamente. Abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Morelos, Hidalgo, Puebla, Veracruz y todo el estado de Tlaxcala. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos acumuladas en enormes episodios volcánicos, que se iniciaron a mediados del terciario y continuaron hasta el presente.

La provincia de la Sierra Madre del Sur limita al norte con el Eje Neovolcánico; al este con la Llanura del Golfo Sur, la provincia de las Sierras de Chiapas y la Llanura Costera Centroamericana del Pacífico y al sur con el Océano Pacífico. Abarca el estado de Guerrero y partes de los de Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Oaxaca y Veracruz. Esta gran región, considerada como la más compleja y menos conocida del país debe mucho de sus rasgos particulares a su relación con la Placa de Cocos.

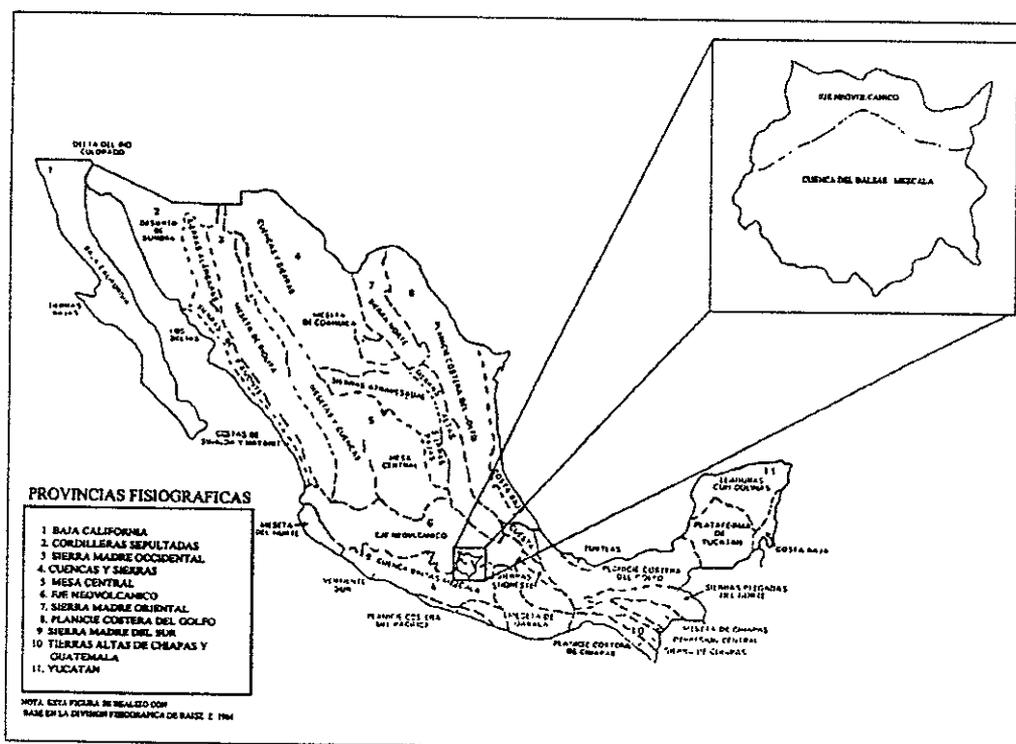


Figura 2.2 Provincias fisiográficas.

### 2.3 Uso del suelo y vegetación

El Estado de Morelos ocupa una superficie de 494,100 has. de las cuales: 188,041 has. se dedican para uso agrícola; de éstas 56,125 has. son de riego y 131,916 has. de temporal. El área que se destina a pastizales es de 71,552 has. las cuales se localizan principalmente en sierras pronunciadas y cerros abruptos.

El uso silvícola está constituido principalmente por bosques que se encuentran en la parte norte del estado y selva baja caducifolia que se localiza al sur, centro y oeste del estado. La superficie que se destina a este uso es de 178,986 has.

La superficie ocupada por cuerpos de agua es de 922 has. Entre los que destacan por su importancia para uso agrícola: Laguna del Rodeo, las presas, Los Carros, Cayehuacán y Coahuixtla. Para uso recreativo el Lago de Tequesquitengo y la Laguna de Coatetelco. Las áreas urbanas, caminos y carreteras ocupan una superficie de 54,599 has. las cuales se encuentran en todo el estado (figura 2.3).

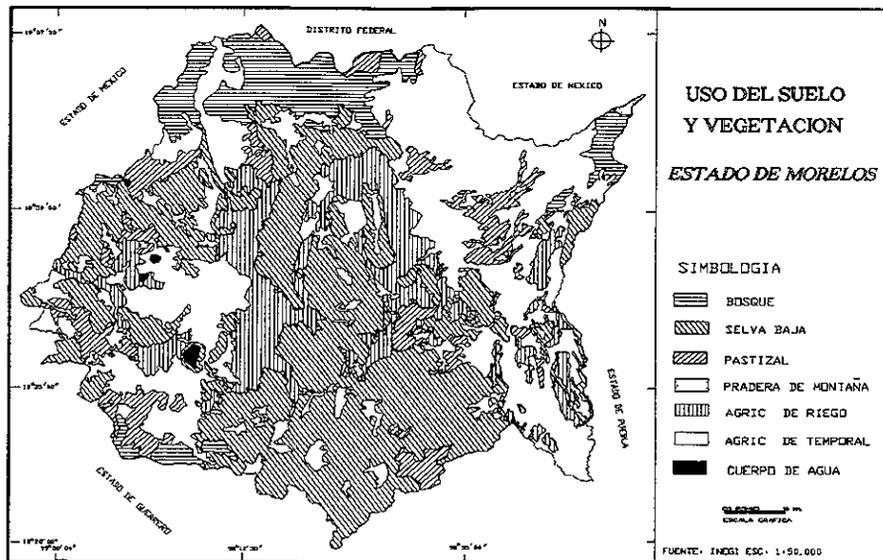


Figura 2.3 Uso del suelo y vegetación del Estado de Morelos.

## 2.4 Climatología

Los tipos de clima del Estado de Morelos están determinados por factores geográficos como son: la altitud del Eje Neovolcánico y la influencia de la Sierra Madre del Sur. El primero constituye una barrera orográfica que bloquea el paso de los vientos húmedos del Océano Pacífico y la segunda da lugar a la presencia de pequeños valles intermontanos. La variación de la temperatura es de norte a sur, siendo el norte la zona alta y fría, el sur la parte baja y de temperatura más alta.

Atendiendo a las características climáticas, el clima que predomina en el estado es el cálido-subhúmedo, que rige sobre todo en las partes bajas de los ríos Amacuzac y Nexapa, abarcando más de la mitad de la superficie del estado.

Según la clasificación de Köppen modificado por E. García, (1988) en el estado se tienen los siguientes climas: cálido subhúmedo  $Aw_1''(w)(i)g$ , templado subhúmedo  $C(w_2)(w)big$ , semicálido subhúmedo  $A(c)w_1''(w)ig$ , semifrío  $C(w_2)(w)(b)i$ , frío  $ETHw$  y muy frío  $EFHw$  (figura 2.4).

- Cálido subhúmedo con lluvia en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de la lluvia anual; temperatura media anual mayor de 22 °C y la precipitación media anual es de 700 a 900 milímetros. Se localiza en los municipios de Axochiapan, Cuautla, Jonacatepec, Tepalcingo, Tlaltizapan, Tlalquitenango, Jojutla, Puente de Ixtla, Amacuzac, Xochitepec, Tetecala, Miacatlán, Mazatepec, Temixco, y Emiliano Zapata.
- Templado subhúmedo, presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal mayor al 5% de la lluvia anual. La temperatura media varía entre 12 y 18 °C y la precipitación media anual es de 1,200 a 1,600 milímetros. Se localiza en la parte norte de los Valles de Cuernavaca, Yautepec y Cuautla.
- Semicálido subhúmedo, se presenta en menor grado en una franja que va de este a oeste, situada en la región norte, en la zona de transición entre la Sierra de Chichinautzin y los valles. Se caracteriza por ser intermedio en cuanto humedad con lluvia en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor al 5%, la temperatura media anual varía entre 18 y 22 °C y la precipitación media anual es de 900 a 1,200 milímetros. Se localiza en los municipios de Zacualpan, Ocuituco, Yecapixtla, Tlayacapan, Yautepec y Cuernavaca.

- Semifrío se reduce a pequeñas áreas en el extremo norte concentrándose en las partes altas de las Sierras de Chichinautzin y Nevada. Abarcando parte de los municipios de Huitzilac, Tlanepantla y Tetela del Volcán.
- Frío y muy frío se encuentran en las partes más altas del Volcán Popocatepetl, en el extremo NE del Estado de Morelos.

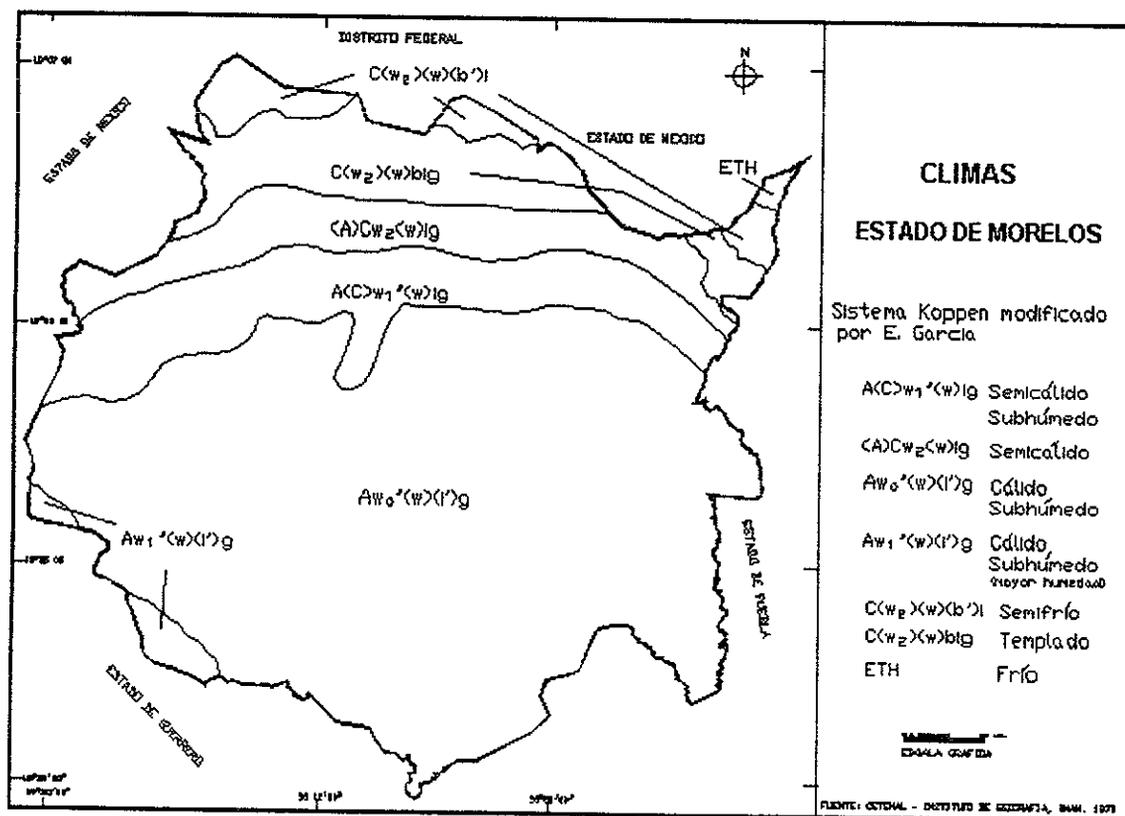


Figura 2.4 Climas del Estado de Morelos.

## 2.5 Datos generales de población

El estado tiene una población de 1,442,662 habitantes (Censo de población y vivienda 1995, INEGI) se encuentra dividido en 33 municipios con 721 localidades; de las cuales 80 localidades corresponden a zonas urbanas con una población de 1,239,328 habitantes que corresponden al 85.8% de la población total y el 14.4% la complementa la población rural con 1101 localidades y una población de 203,334 habitantes (figura 2.5).

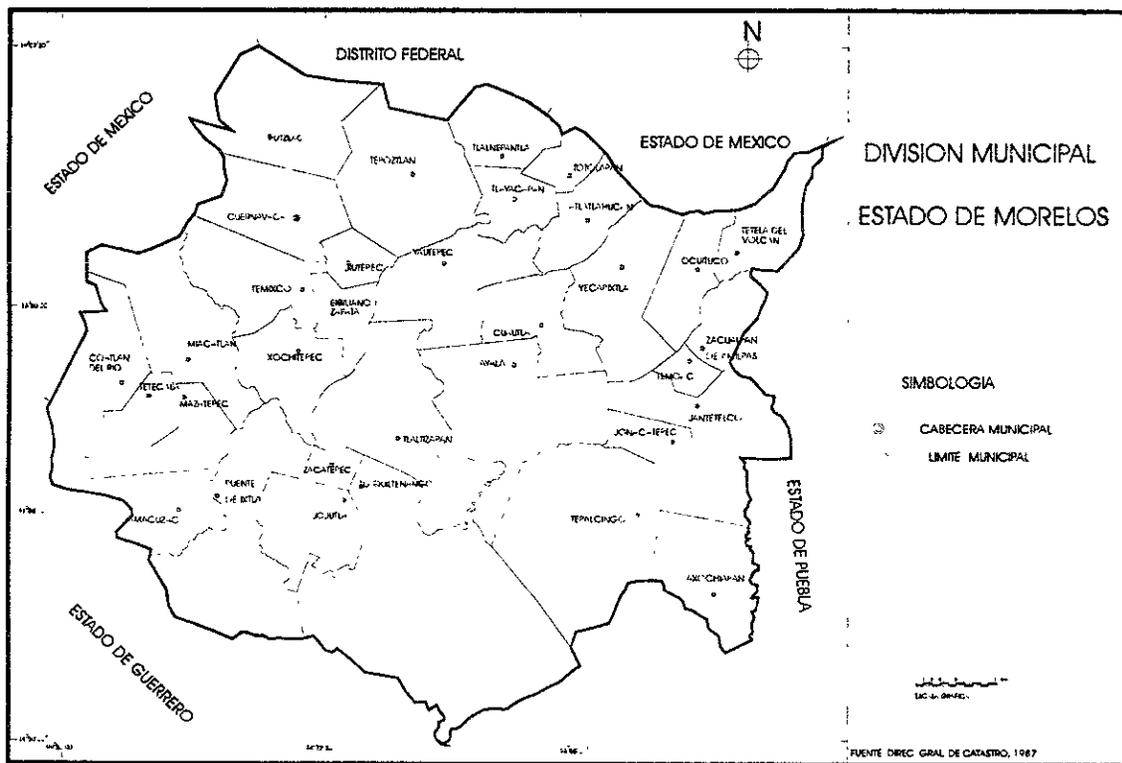


Figura 2.5 Municipios del Estado de Morelos.

## 2.6 Geología regional. Generalidades

La geología regional está expresada principalmente por grandes áreas cubiertas de rocas básicas y ácidas, propias de Eje Neovolcánico, así como la presencia en la porción centro y sur del estado, de materiales sedimentarios marinos y continentales, Mesozoicos y Terciarios, que constituyen la Sierra Madre del Sur.

La historia geológica de la entidad está determinada por rocas de composición y edad muy variadas, que fueron producto de una serie de eventos geológicos iniciados a principios de Cretácico, hace unos 110 millones de años (m.a.).

Las rocas más antiguas (Cretácico Inferior) están expuestas en la porción noroeste del estado: son una sucesión de capas de calizas de espesor delgado a medio, su color varía de gris a negro según sea el contenido carbonoso con nódulos y pequeñas capas de pedernal intercaladas, que afloran en las inmediaciones de la zona arqueológica de Xochicalco.

Rocas de origen marino del Cretácico Medio y Superior constituidas por calizas y dolomitas interestratificadas con anhidritas, presentes localmente en la parte sur del estado; calizas masivas de color gris claro a oscuro con nódulos y lentes de pedernal con abundantes fósiles silicificados.

Lutitas, areniscas y calizas arcillosas de origen marino, que cubren parcialmente a las rocas antes descritas, cuyos afloramientos se encuentran en la parte central del estado en estructuras sinclinales y anticlinales.

Cubriendo parcialmente a la secuencia antes descrita, se encuentran las rocas originadas durante los períodos Terciario y Cuaternario:

Conglomerados calizos de edad Terciaria (50 m.a.) localizados principalmente en la porción media y al sur del estado; ignimbritas y tobas riolíticas que datan del Oligoceno al Mioceno (40-10 m.a.).

Arcillas y depósitos evaporíticos (Mioceno) aflorando en la porción suroeste del estado; andesitas y piroclásticos asociados del Plioceno (10 m.a.) expuestas en la zona de Zempoala; conglomerados volcánicos,

Areniscas, yesos, travertinos y depósitos lacustres del Plio-Pleistoceno;

Basaltos y Piroclásticos del Cuaternario (menos de 1 m.a.) localizados principalmente en la Sierra de Chichinautzin y por último los materiales aluviales Cuaternarios: gravas, arenas, limos y arcillas que forman la parte superior del relleno y la superficie de los valles del estado (Fries, 1961).

Las estructuras geológicas son producto de una sucesión de acontecimientos naturales que modelaron la corteza terrestre, entre los que destacan:

La intensa actividad tectónica acaecida durante la Revolución Laramide, desde fines del Cretácico Superior hasta principio del Terciario, generada por los esfuerzos compresivos que plegaron y dislocaron a las rocas sedimentarias marinas, dando lugar a la formación de cadenas montañosas;

Un nuevo episodio tectónico, de carácter distensivo, generó un sistema de fracturas y fallas, el cual está caracterizado por una intensa actividad volcánica, ocurrido durante el Terciario (Oligoceno, Plioceno), período en que fueron formadas las rocas ígneas que configuraron los rasgos estructurales típicos del Eje Neovolcánico.

El Eje Neovolcánico constituye una amplia franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza transversalmente a la República Mexicana a la altura del paralelo 20°. Su origen se relaciona con la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Americana, que a nivel de la astenósfera sufre fusión parcial y origina los magmas del eje (Fries, 1961).

### **2.6.1 Estratigrafía**

La columna estratigráfica que aflora en el Estado de Morelos está representada por 17 formaciones, las cuales abarcan desde el Cretácico Inferior hasta el Reciente. Dentro de la columna estratigráfica se observan rocas ígneas intrusivas y extrusivas, rocas sedimentarias marinas y continentales.

A continuación se presenta las unidades de roca en el orden acostumbrado: Formación Xochicalco, Formación Morelos, Formación Cuautla, Formación Mexcala, Grupo Balsas; Riolita Tilzapotla, Formación Tlayca, Formación Tepoztlán, Formación Zempoala, Grupo Ixtlilco y No-diferenciado, Formación Cuayuca, Troncos Ígneos de Chalcatzingo, Granito Colotepec, Formación Tlayecac, Riodacita Popocatépetl, Formación Cuernavaca, Formación Chichinautzin, Depósitos Clásticos Continentales y Aluvión (figura 2.6).

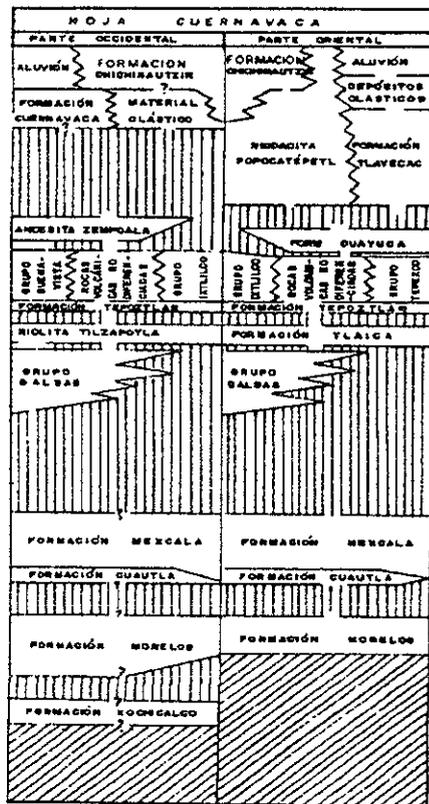


Figura 2.6 Columna estratigráfica del Estado de Morelos. (Fries,1961)

## 2.7 Hidrología superficial

### 2.7.1 Regiones hidrológicas, cuencas y subcuencas

Morelos se ubica en la Región Hidrológica Número 18, según la división hidrográfica del INEGI,1970, denominada Río Balsas, parcial (Cuenca Río Grande el Amacuzac).

Esta región colinda al norte con la Región Hidrológica No. 26 (INEGI,1970) Río Moctezuma en la zona que corresponde a la cuenca del Lago de Texcoco y Zumpango. Por el noreste colinda con la Región Hidrológica No. 12 (INEGI,1970) Río Lerma Santiago.

Por el sureste y sur está rodeada por las cuencas de los ríos Iguala y Tepecoacuilco; hacia oriente y sureste se localiza la cuenca del Río Atoyac, en la subcuenca del Río Nexapa, (figura 2.7).

El Estado de Morelos dispone de cierta abundancia de agua superficial y subterránea, sin embargo su distribución no responde a las necesidades de los diferentes sectores, agrícola, urbano e industrial, ya que la porción septentrional (zona alta) es la que cuenta con mayor precipitación, pero carece de las condiciones geológicas y topográficas para retener los volúmenes precipitados.

La poca infraestructura existente carece de mantenimiento, así mismo la porción meridional (zona baja) tiene disponibilidad de infraestructura hidráulica, pero existen también problemas de mantenimiento preventivo.

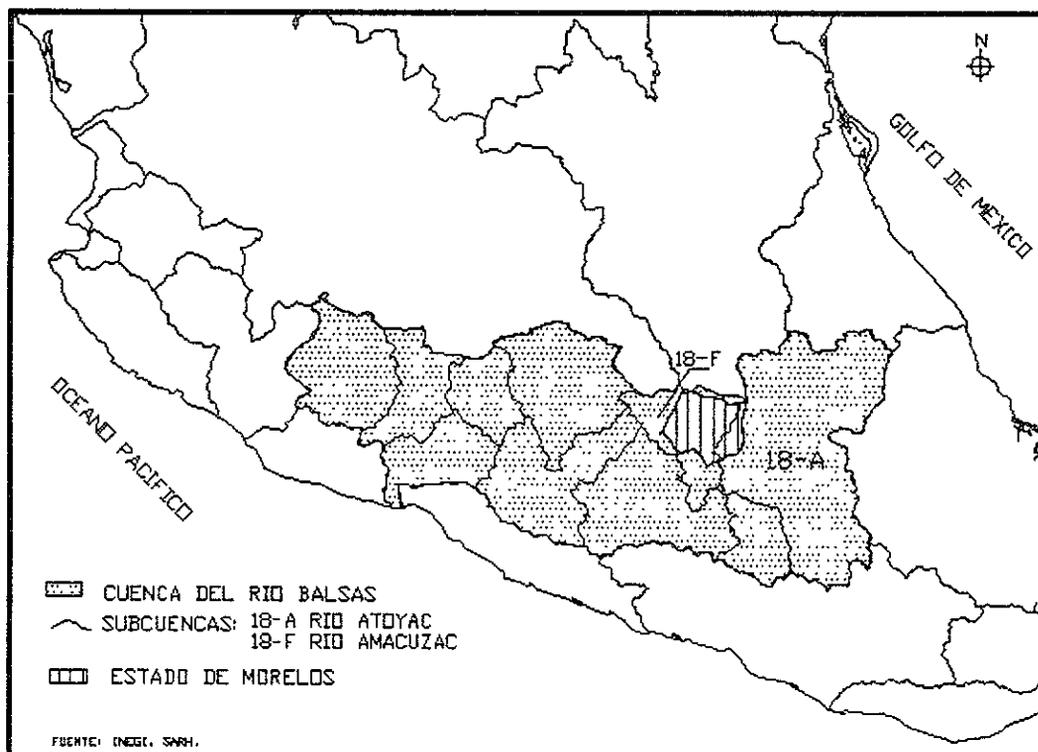


Figura 2.7 Cuenca del Río Balsas y sus subcuencas.

Como consecuencia de lo anterior, la Comisión Nacional del Agua ha tenido que implementar una estricta reglamentación de los recursos hidráulicos, de tal manera que actualmente se encuentran concesionadas todas las corrientes superficiales de la entidad, así como un estricto seguimiento de los aprovechamientos subterráneos.

### **2.7.2 Régimen y distribución de las corrientes**

El Estado de Morelos se ubica en la cuenca del Río Amacuzac, la cual está formada por dos subcuencas: la del Río Amacuzac y la del Río Nexapa. La subcuenca del Río Amacuzac cubre una superficie de 4,392 Km<sup>2</sup> en el estado y sus principales afluentes son los ríos: Amacuzac, Cuautla, Yautepec, Apatlaco, Chalma y otros de menor importancia.

La subcuenca del Río Nexapa ocupa una superficie de 549 km<sup>2</sup> y la corriente principal es el Río Nexapa, teniendo como afluentes el Río Tepalcingo y las Barrancas, Del Amatzinac y De los Santos (figura 2.8).

La lluvia en el Estado es un factor del clima bastante uniforme, ya que registra una precipitación media de 1,100 mm en la subcuenca del Río Amacuzac, lo que genera un escurrimiento medio anual del orden de 4,831 millones de m<sup>3</sup>.

En la subcuenca del Río Nexapa se tiene una lluvia media anual de 900 mm lo que nos da un volumen de 494 millones de m<sup>3</sup>, generándose un volumen precipitado de 5,325 millones de m<sup>3</sup> de los cuales 1,600 millones de m<sup>3</sup> escurren libremente, 700 millones de m<sup>3</sup> se infiltran y el resto se evapora (figura 2.9).

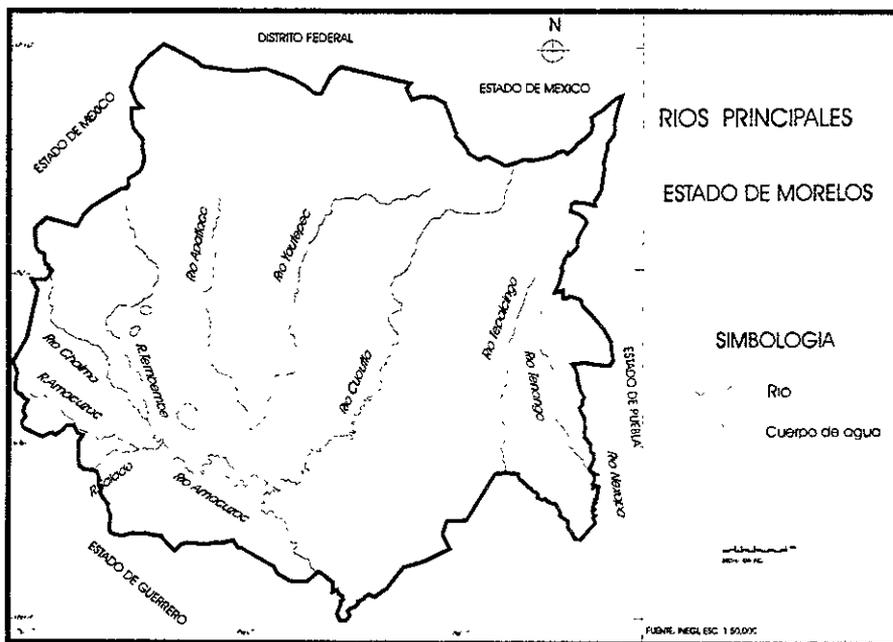


Figura 2.8 Ríos principales del Estado de Morelos.

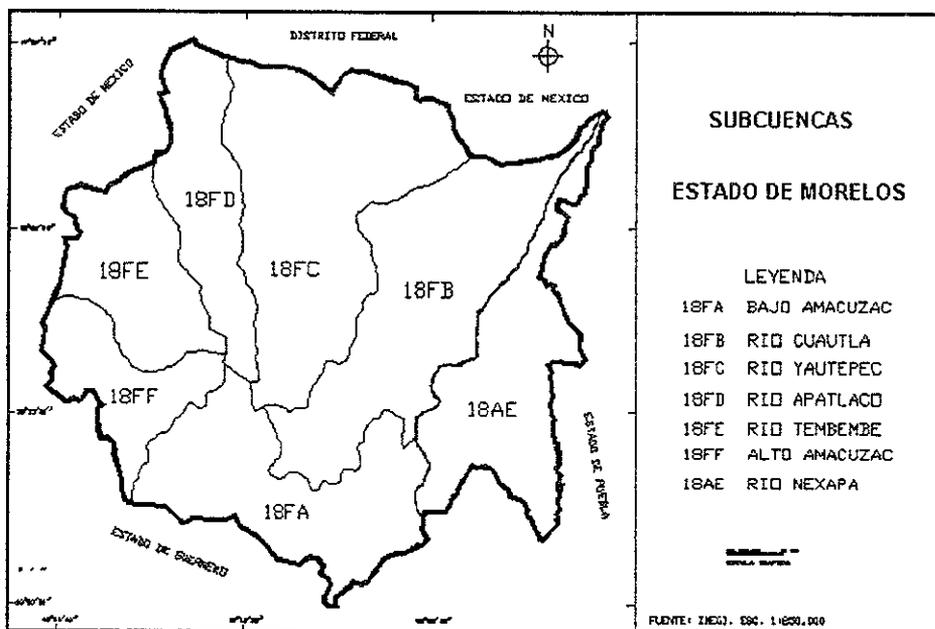


Figura 2.9 Subcuencas principales del Estado de Morelos.

### 2.7.3 Uso del agua superficial

Los escurrimientos superficiales existentes, son aprovechados básicamente como almacenamientos transitorios estacionales para riego y las corrientes principales son utilizadas parcialmente como drenajes de aguas residuales municipales de las poblaciones aledañas, así como industriales, contaminándola con desperdicios industriales y materia orgánica.

Para el manejo y aprovechamiento del recurso hidráulico superficial existe una infraestructura hidráulica constituida por: 10 presas de almacenamiento con capacidad de 47 millones de m<sup>3</sup>, 63 presas derivadoras, 55 plantas de bombeo, 56 derivaciones, el vaso de almacenamiento "El Rodeo" con capacidad útil de 16.5 millones de m<sup>3</sup>, 50 manantiales y 150 bordos pecuarios que en un conjunto tienen capacidad útil de 0.3 millones de m<sup>3</sup>.

El volumen de los aprovechamientos superficiales es de 858 millones de m<sup>3</sup>, 10 de ellos con capacidad mayor de 0.5 millones de m<sup>3</sup>. Los más importantes son las presas de almacenamiento: Cayehuacán, Los Carros, El Rodeo, Emiliano Zapata, Coahuixtla, Chinameca, Plan de Ayala, Quilamula, Cruz Pintada y La Parota. Las primeras dos emplazadas en la subcuenca del Río Nexapa y las restantes en la subcuenca del Río Amacuzac.

Para uso agropecuario se utilizan 835.1 millones de m<sup>3</sup> y en la agricultura 834.8 millones de m<sup>3</sup> por año, volumen destinado al riego de unas 56,125 Ha a través del distrito de riego número 16 y unidades de riego del Distrito de Desarrollo Rural Número 1.

Las superficies con irrigación son heterogéneas y están dispersas a lo largo de los ríos o corrientes principales como son: Río Chalma, Tembembe, Tetlama, Apatlaco, Yautepec y Cuautla, se dispone de 29 manantiales además de otros, algunos constituyen balnearios de agua de tipo termal y sulfurosa.

Para uso pecuario se cuenta con 150 abrevaderos, clasificados como tanques de almacenamiento, estimándose una extracción anual de 0.3 millones de m<sup>3</sup>. La estructura que se utiliza para agua potable es de 606 pozos, 27 manantiales y 450 tanques de almacenamiento, el volumen extraído es de 143 millones de m<sup>3</sup>, de éstos 16 millones de m<sup>3</sup> provienen de fuentes superficiales.

Adicionalmente se utilizan en la agricultura alrededor de 14.8 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales, generadas por centros urbanos y desarrollos industriales.

La acuicultura en Morelos constituye otra de las actividades del sector primario, que se ha venido practicando en forma intensiva, la infraestructura está formada por 28 unidades piscícolas, con 609 estanques los cuales se abastecen de 9 pozos, 5 manantiales y 14 sistemas de agua potable, con una extracción de 1.5 millones de m<sup>3</sup> anuales de éstos 0.5 millones de m<sup>3</sup> provienen de fuentes superficiales.

Otro uso del agua que genera importantes ingresos en la entidad, es el turismo, ya que cuenta con manantiales y un lago que se utilizan para uso recreativo, uno de los más importantes es el Lago de Tequesquitengo. Los principales manantiales de atracción turística son: El Almeal, Las Estacas, Oaxtepec, Tehuixtla y Agua Hedionda. El manantial de aguas termales de Atotonilco.

En la ciudad de Cuernavaca existe una gran cantidad de albercas, con un promedio de 50 m<sup>3</sup> cada una, lo cual implica un incremento considerable en la dotación de agua a dicha ciudad.

Para uso recreativo se estima un volumen anual de 70.3 millones de m<sup>3</sup> los cuales son utilizados después con fines agrícolas. Sin considerar el Lago de Tequesquitengo y la Laguna de Coatetelco, que tienen una capacidad en conjunto de 150 millones de m<sup>3</sup>.

#### **2.7.4 Recarga y descarga de acuíferos**

La precipitación pluvial que incide sobre las rocas volcánicas fracturadas, ampliamente expuestas en la parte alta de las cuencas (Eje Neovolcánico) y los escurrimientos superficiales que se infiltran tanto en el piedemonte, como en los cauces, es la fuente de recarga natural que alimenta a los acuíferos.

En el transcurso de las últimas cuatro o cinco décadas, la recarga de los acuíferos ha sido modificada a causa de la creciente influencia de las obras y actividades humanas:

La construcción de presas y bordos ha alterado el escurrimiento natural de las corrientes superficiales y en consecuencia la infiltración a lo largo de los cauces. El desarrollo agrícola ha generado recarga por infiltración en vasos, canales y terrenos de cultivos.

La extracción de agua mediante pozos, también favoreció a la recarga, al abatir los niveles freáticos e inducir con ello el incremento de la infiltración originada en los depósitos y cursos de agua superficial.

Otros componentes de recarga de menor magnitud son las originadas por el agua residual de núcleos de población e instalaciones industriales y por las fugas en las redes hidráulicas subterráneas de abastecimiento, fuentes que contribuyen a la renovación de los mantos acuíferos, a costa del deterioro de su calidad.

En condiciones naturales, la descarga de los acuíferos en la entidad ha sido por el afloramiento de las aguas subterráneas a través de manantiales, localizados especialmente en la zona de transición entre la sierra (Eje Neovolcánico) y los valles entre los que destacan:

El Túnel, Chapultepec, Las Fuentes, Oaxtepec, El Bosque, Itzamatitlán, Michate, Ahuilican, Las Estacas, El Almeal, Agua Hedionda, Las Tazas; por transpiración de la vegetación que abunda en las partes bajas de las cuencas; por evaporación de agua fréatica, que afloraba o se encontraba muy somera en algunas áreas de Cuernavaca, Yautepec y Cuautla; por infiltración a lo largo de cauces, constituidos por materiales granulares o fracturados.

## **2.8 Aguas subterráneas**

El aprovechamiento de las aguas subterráneas en Morelos ha tenido un desarrollo acelerado en las últimas décadas, tanto por que cumple casi siempre con normas de calidad para cualquier uso, como por el avance de la técnica de perforación de pozos profundos que ha facilitado su explotación.

Este acelerado desarrollo ha provocado contrastes muy grandes en la situación de los aprovechamientos de las aguas subterráneas o acuíferos. En aquellas regiones donde existía una gran escasez producida por el aumento en la demanda por crecimiento de actividades económicas y la falta de fuentes de aguas superficiales.

Los acuíferos han sido sobre explotados, algunos con consecuencias graves (Tepalcingo, Axochiapan) en otras regiones en cambio, existe potencialidad aun no explotada que podría propiciar el desarrollo económico, como es el caso de la zona de Jojutla-Zacatepec.

Para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en el Estado de Morelos, se han definido cuatro acuíferos, los cuales se dan a conocer como valles: Valle de Cuernavaca, Valle de Zacatepec, Valle de Cuautla-Yautepec y Valle de Tepalcingo-Axochiapan. Estos acuíferos abastecen a los desarrollos urbanos, agrícolas e industriales del estado.

Tales condiciones de descarga permanecieron casi inalteradas hasta mediados de la década de los años cuarenta, época en que se inició la explotación intensiva de los acuíferos estatales. A partir de entonces la creciente extracción de agua del subsuelo provocó el abatimiento de los niveles freáticos, con la consecuente disminución de la descarga natural en las áreas de bombeo.

Numerosos manantiales de bajo gasto se agotaron y la transpiración fue drásticamente reducida a causa de la eliminación directa o indirecta de la vegetación, ahora la evaporación se realiza directamente desde el suelo húmedo.

En la actualidad los principales acuíferos son descargados de manera natural, le siguen las descargas artificiales mediante captaciones. Hasta fines de la década de los años treinta los acuíferos se explotaban de manera natural por medio de captaciones de manantiales. La construcción de pozos se inició en la década de los años cuarenta y alcanzó su mayor intensidad en los años ochenta y sigue con ritmo creciente hasta la fecha. La tabla 2.1 muestra el tipo de aprovechamiento y el volumen total de extracción de los principales acuíferos en el Estado de Morelos

Tabla 2.1 Aprovechamientos subterráneos por acuífero y volumen anual del Estado de Morelos.

ACUÍFERO	TIPO DE APROVECHAMIENTO						TOTAL	
	POZO		NORIA		MANANTIAL		No.	VOL
	No.*	VOL**	No.	VOL	No.	VOL		
CUERNAVACA	469	118.5	316	1.1	61	231.2	840	350.8
CUAUTLA - YAUTEPEC	416	88.7	845	1.1	98	334.6	1351	424.4
ZACATEPEC	219	55.6	355	0.5	26	289.2	600	345.3
TEPALCINGO - AXOCHIAPAN	155	50.5	27	0.03	3	0.5	185	51.03
TOTAL	1259	313.3	1543	273	188	855.5	2990	1171.6

\* Número de aprovechamientos.

\*\* Volumen de extracción en millones de metros cúbicos.

Fuente: Gerencia Regional Balsas de la CNA. Morelos.

### 2.8.1 Movimiento de las aguas subterráneas

En las cuencas hidrográficas en su estado natural, el agua circula de las áreas de recarga a las áreas de descarga, controlada por la estructura geológica, la distribución espacial de la recarga y la posición de los niveles base de descarga.

En el subsuelo de las regiones hidrológicas el agua fluye de las sierras y lomeríos hacia las partes bajas, donde una fracción del volumen de agua ingresa a los acuíferos a lo largo de los cauces o sale por evapotranspiración, mientras el resto continúa su curso subterráneo hacia aguas abajo a lo largo de los valles.

Paulatinamente, la explotación de los acuíferos fue modificando las características del flujo subterráneo; al abatirse los niveles del agua en las áreas de bombeo, fue aumentado el caudal que migraba hacia ellas, a costa del que originalmente se dirigía hacia los vertedores naturales, así se fueron desarrollando depresiones piezométricas en la zona de Tepalcingo-Axochiapan, dando como resultado que ahora en esa zona los niveles de bombeo bajen cada año.

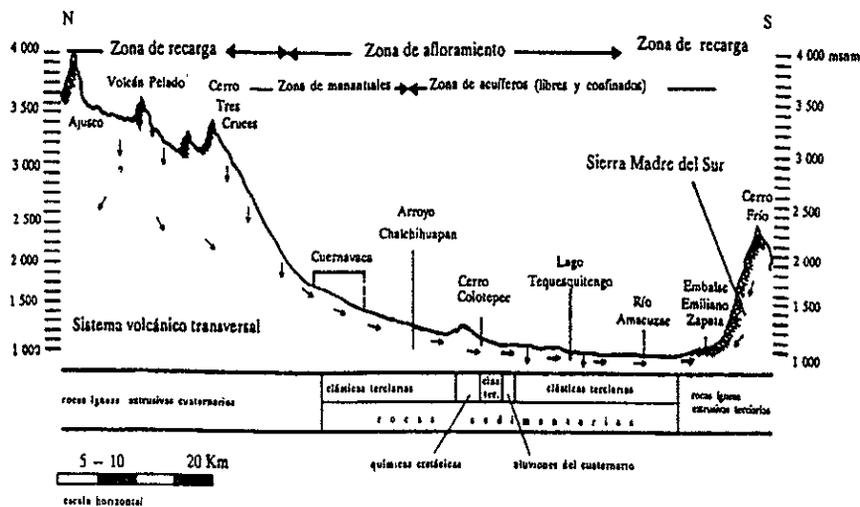


Figura 2.10 Movimiento de agua subterránea. (Silva, et al, IMTA 1988)

## **2.8.2 Aprovechamiento de las aguas subterráneas**

Se tienen actualmente en el Estado de Morelos, 2,315 captaciones de las cuales 949 son pozos profundos, 1,314 norias, 50 manantiales, dos galerías filtrantes. 292 pozos y 29 manantiales se utilizan en la agricultura, 46 abastecen a los desarrollos industriales. Para suministro de agua potable a las ciudades se utilizan 606 pozos, 27 manantiales y 450 tanques de almacenamiento, el volumen extraído es de 134 millones de m<sup>3</sup> de estos 15.99 millones de m<sup>3</sup> provienen de fuentes superficiales y 118.01 millones de m<sup>3</sup> de fuentes subterráneas.

En cuanto a su distribución espacial, la concentración de pozos se localiza en las zonas de Cuernavaca -Temixco- Jiutepec, Tepoztlán, Yautepec, Cuautla y Tepalcingo-Axochiapan.

Las extracciones se efectúan por medio de pozos y las norias construidas exprofeso alcanzan diferentes profundidades. Las norias que se utilizan para actividades pecuarias y de uso doméstico tienen una profundidad entre 3 y 10 m se considera que aprovechan el acuífero libre de los rellenos aluviales del Terciario, presentan un espesor de 15 m.

La profundidad de los pozos varía entre unas decenas de metros, alcanzando algunos hasta los 800 m. Los más someros, operados con fines domésticos, recreativos y de abrevadero están localizados en toda la entidad. Los de uso agrícola municipal e industrial se encuentran en el rango de 100 a 250 m localizados particularmente en las partes bajas y planicies, en las inmediaciones de las poblaciones, áreas agrícolas y zonas industriales.

El caudal de extracción de los pozos varía de 2 a 100 litros por segundos (l.p.s.) con promedio de 50 l.p.s., su rendimiento depende de las características locales del acuífero, del sistema y capacidad del equipo de bombeo.

### **3 EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOHIDROLÓGICO DEL ESTADO DE MORELOS, POR MEDIO DEL ANÁLISIS DE LA IMAGEN DE SATÉLITE LANDSAT TM 26-47**

Para la realización del trabajo de interpretación concerniente a esta tesis, se utilizó una sección de la imagen de satélite Landsat TM 26-47 del mes de febrero de 1990 (fig 3.1) y sus compuestos en falso color con la combinación de las bandas espectrales 2, 3 y 4 (figura 3.2) y 2, 4 y 7 (fig. 3.5), dicha sección cubre al Estado de Morelos y zonas aledañas.

El objetivo de este ejercicio es aplicar la metodología de prospección geohidrológica mediante imágenes de satélite, éstas han demostrado su gran utilidad dentro el campo de la exploración geohidrológica, ya que su amplia cobertura sinóptica permite una visión integral de las zonas en estudio.

#### **3.1 Metodología**

La metodología consiste en la extracción de los rasgos geológicos, geomorfológicos y de cobertura que presenta la imagen a través de la interpretación visual principalmente y su posterior manejo, análisis e integración para generar mapas de potencial geohidrológico. Con el fin de evaluar estos rasgos se aplican los siguientes pasos:

- Interpretación de los patrones de relieve.
- Interpretación de los patrones de drenaje.
- Interpretación de los patrones de cobertura.
- Identificación o análisis de lineamientos.
- Interpretación de las relaciones geomorfológicas.
- Correlación estratigráfica.
- Interpretación de lineamientos (análisis estructural).
- Interpretación geohidrológica.

Cuando se analiza visualmente una imagen de satélite lo primero que observamos, son los diferentes matices que presenta. Estos cambios de tonalidades pueden deberse a los siguientes factores:

- La presencia de los diferentes tipos de vegetación.
- Desigual concentración de humedad de los suelos.
- Influencia de las pendientes topográficas.
- Errores en el proceso de revelado o impresión de la imagen.

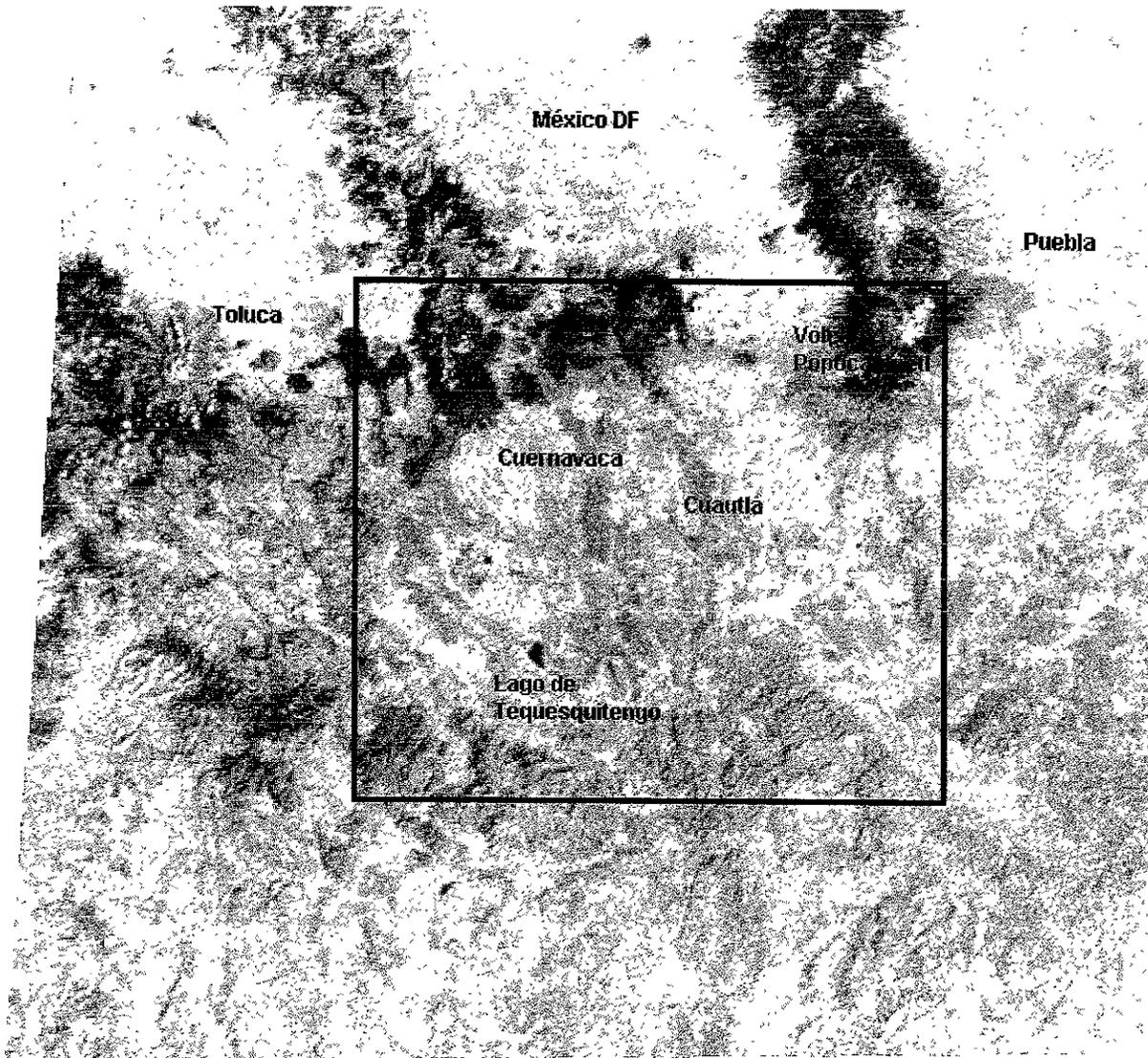


Figura 3. 1 Imagen de satélite Landsat TM 26-47, combinación de bandas espectrales 2, 3 y 4.

En general la interpretación de cada uno de los temas anteriores se realizó en papel acetato a la escala 1:250,000 obteniendo un mapa de interpretación del tema respectivo, utilizando un color diferente para cada uno de ellos.

El objetivo de manejar diferente color es para evitar confusiones al iniciar la interpretación geohidrológica que resulta de la superposición de todos los temas antes mencionados y que consiste en:

- Colocar uno sobre otro, los acetatos de la interpretación de los temas mencionados.
- Colocar un acetato sobre todos los anteriores.
- Marcar sobre el acetato únicamente las corrientes principales, así como dirección del flujo superficial y flujo subterráneo inferido.
- Marcar las zonas de textura gruesa y media en los aluviones.
- Observar el conjunto de datos interpretados para únicamente encerrar en un círculo discontinuo la vegetación que se encuentre relacionada con los cuerpos de agua subterráneos cercanos a la superficie.
- Encerrar en un círculo con línea continua las zonas de intersección de fallas y/o fracturas que se encuentren relacionadas con zonas de textura media y gruesa en materiales granulares.
- Se seleccionan las zonas que presenten el mayor conjunto de características hidrogeológicas como resultado de la interpretación.

### **3.2 Reconocimiento e identificación de patrones espaciales**

#### **3.2.1 Patrones de relieve**

Son las características del terreno relacionadas con las condiciones orográficas y como puntos de apoyo se toman los cambios abruptos en la pendiente.

La clasificación del relieve se determina con base en las geoformas del área de estudio (Fig. 3.2) así como el tipo de cobertura que presenta, se determinaron cuatro tipos de relieve: relieve alto, laderas, lomeríos y partes planas.

- El relieve alto corresponde a todas las elevaciones (sierras y cerros) se localiza principalmente en la parte norte y sur, se presenta también en la parte centro de la imagen.
- Ladera, se localiza en el talud o pie de monte de la sierra con el valle, se ubica principalmente en la parte norte de la entidad.
- Lomeríos, esta topografía se presenta en los valles, se caracteriza por su poca elevación, con una moderada pendiente, se destinan principalmente a la agricultura de temporal y a la ganadería.
- Las partes planas se localizan, casi siempre, en las porciones bajas de los valles y como su nombre lo indica, están caracterizadas por presentar un relieve de plano a casi plano con suelos profundos, destinados a la agricultura de riego.

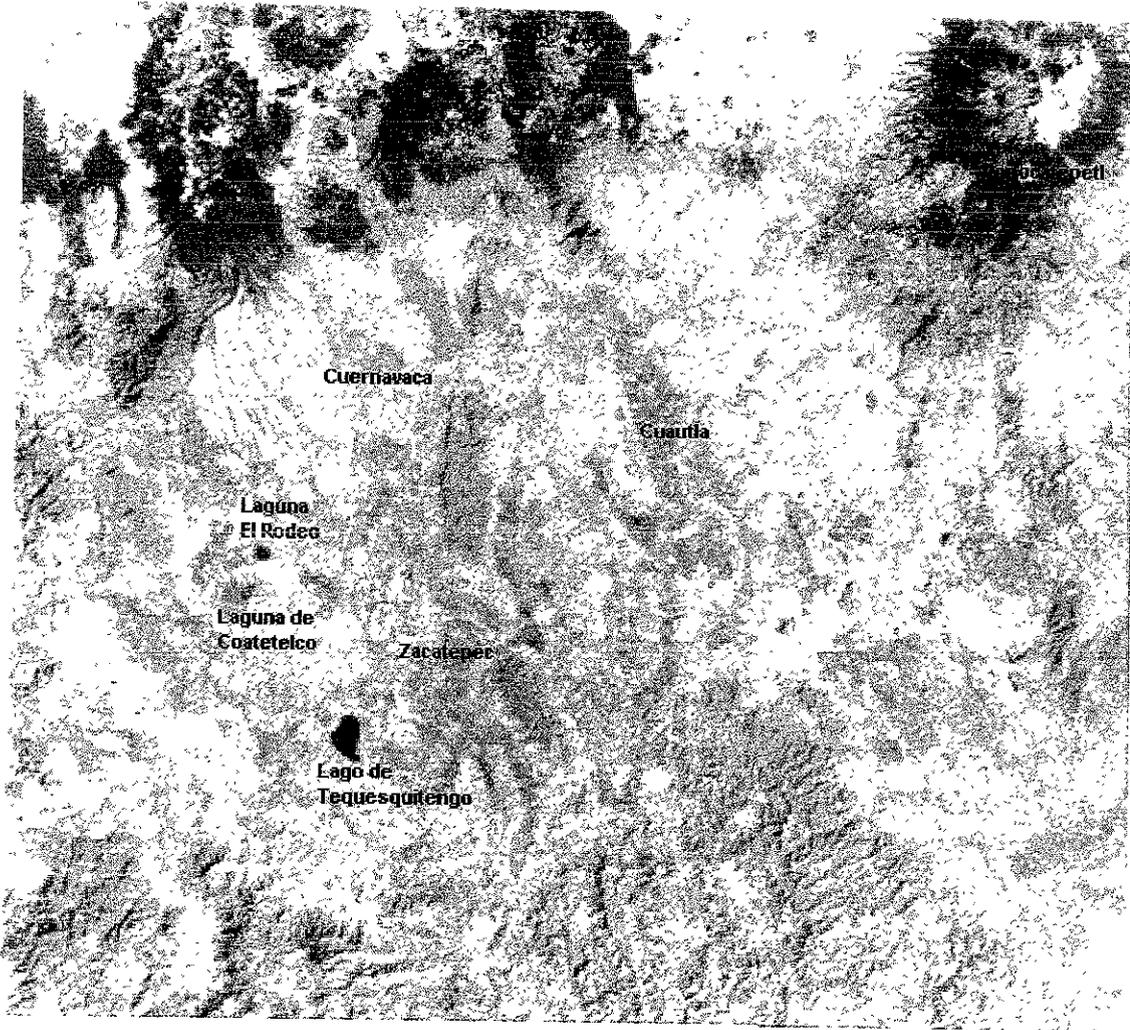


Figura 3.2 Área de estudio. Sección de la imagen de satélite Landsat TM 26-47.

El mapa de resultado de la interpretación de los patrones de relieve se muestra en la figura 3.3.

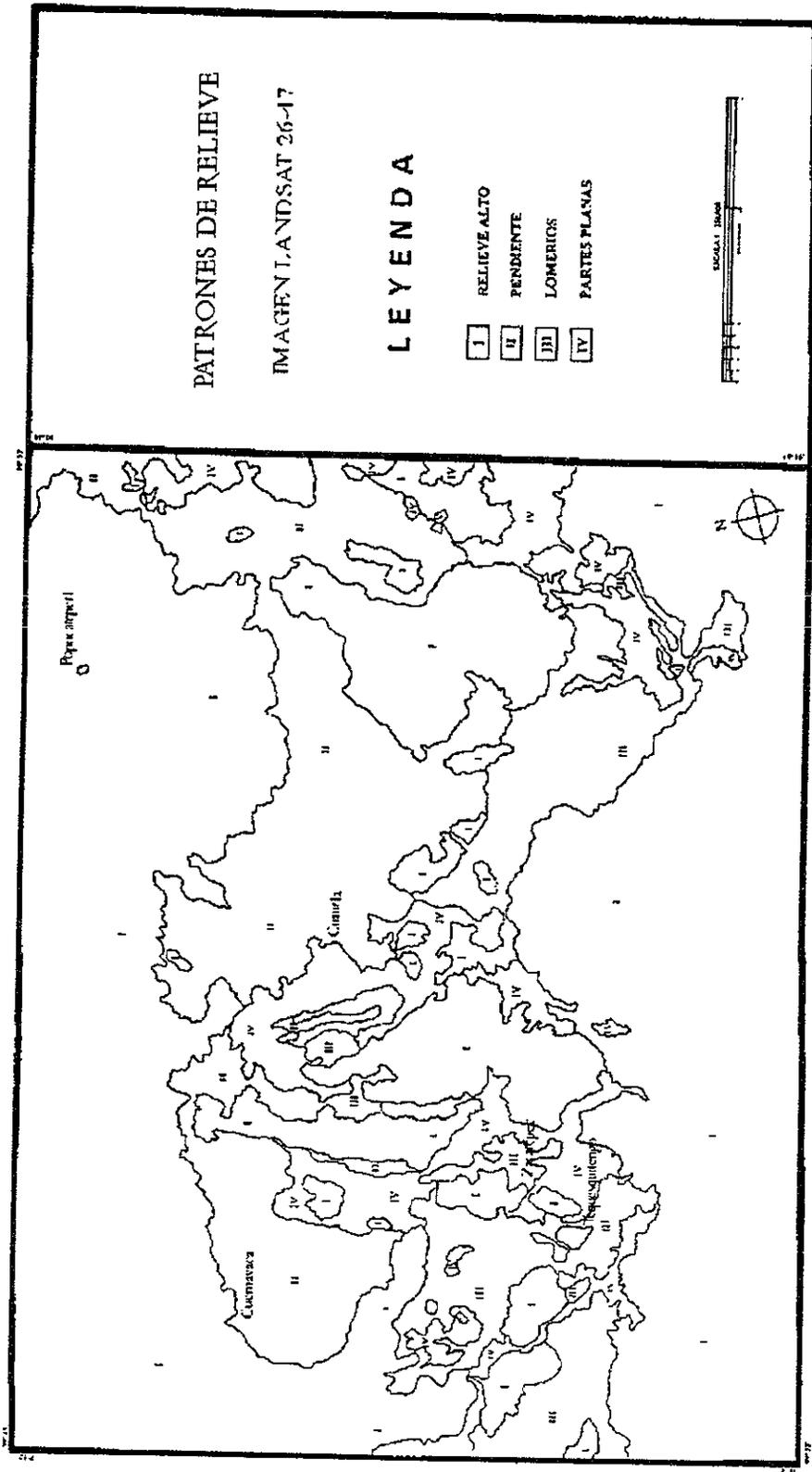


Figura 3.3 Patrones de relieve

### 3.2.2 Patrones de drenaje

El drenaje es sumamente importante en el análisis e interpretación de una imagen de satélite, ya que está directamente relacionado con el relieve, es también la representación de los sistemas de cauces que sigue el escurrimiento, de una manera definida, las aguas en la superficie y se puede decir que es el resultado de un factor climatológico. Es decir, que una misma roca presentará un tipo de drenaje diferente según el clima que lo afecte.

En los patrones de drenaje se estudia: densidad de la red hidrográfica, forma de drenaje y la uniformidad de drenaje. Estos tres puntos dan información sobre la litología y las estructuras presentes, es decir el arreglo espacial de las rocas y sus características tales como fracturamiento y porosidad; también permiten inferir las características de permeabilidad de los suelos.

- La densidad de drenaje se refiere a: la capacidad de solubilidad, la permeabilidad y erosionabilidad de una roca.
- Los patrones de las formas de drenaje están determinados por el tipo de roca y su estructura. Se clasifican, en la zona de estudio (Fig 3.2) de acuerdo a su forma en tres tipos: dendrítico, paralelo y radial.
- La uniformidad de drenaje está determinada por la presencia o ausencia de un arreglo, se denomina como textura y se divide en tres tipos: fina, media y gruesa.

En términos generales, en las partes altas de las cuencas hidrológicas, la red de drenaje está definida por la naturaleza litológica del sustrato geológico y corresponden a las zonas de recarga de los acuíferos. En la zona de estudio (Fig. 3.2) correspondiente a este trabajo, se pueden observar las siguientes características de las principales cuencas que abarcan la entidad.

#### Cuenca del Río Amacuzac

La cabecera del río Apatlaco se ubica al sureste del Distrito Federal y al noroeste del estado de Morelos, el drenaje es de tipo paralelo en el talud, pasando a ser dendrítico en la parte media y baja de esta subcuenca. La textura en el talud es fina y hacia la parte baja es media.

Los cuerpos de agua localizados en la imagen, muestran líneas de desagüe que convergen hacia una depresión central, definiendo un patrón tipo radial. Este tipo se encontró en las lagunas de Coatetelco y El Rodeo, lago de Tequesquitengo y el lago-cráter del Volcán Popocatepetl.

En la cuenca del río Yautepec el patrón de drenaje es del tipo dendrítico en la parte superior y paralela en la inferior, la textura es gruesa en la parte alta y media en la parte baja.

La configuración del río Cuautla es del tipo dendrítico, este río nace de los escurrimientos del volcán Popocatepetl, en la localidad de Cuautla su caudal es enriquecido debido a la descarga del acuífero libre a través de los manantiales de Agua Hedionda y Los Sabinos principalmente, en la parte inferior cerca de la localidad de San Rafael Zaragoza, se observa una amplia sección del río en la que predominan los meandros. La textura del drenaje en la parte superior es gruesa pasando a ser media en la parte inferior.

Las áreas cubiertas por rocas calizas de la región muestran un drenaje que varía de paralelo a subparalelo se desarrolla en las laderas de las sierras calcáreas principalmente en donde se encuentra un declive pronunciado, son de corto desarrollo desapareciendo en los valles.

En la porción sur, en la Sierra de Huautla se observa que la red de drenaje es dendrítica con ramificaciones irregulares, en varias direcciones, determinada por la estructura geológica así como por el intenso fracturamiento que muestra, dando lugar a la presencia de numerosos arroyos de corto desarrollo, con una textura fina.

### **Cuenca del Río Nexapa**

La cuenca del Río Nexapa, al igual que la cuenca del río Amacuzac, se ubica en la parte norte del estado y al sur del Volcán Popocatepetl. La red hidrológica la constituyen los ríos Tepalcingo y La Barranca del Amatzinac y proveniente del Estado de Puebla, el río Nexapa.

El río Tepalcingo presenta una configuración dendrítica subparalela con una textura media. El arreglo de la Barranca del Amatzinac es del tipo dendrítico subparalelo con una textura media, mientras que el río Nexapa presenta una configuración dendrítica con una textura media.

El mapa de resultado de la interpretación de los patrones de drenaje se muestra en la figura 3.4.

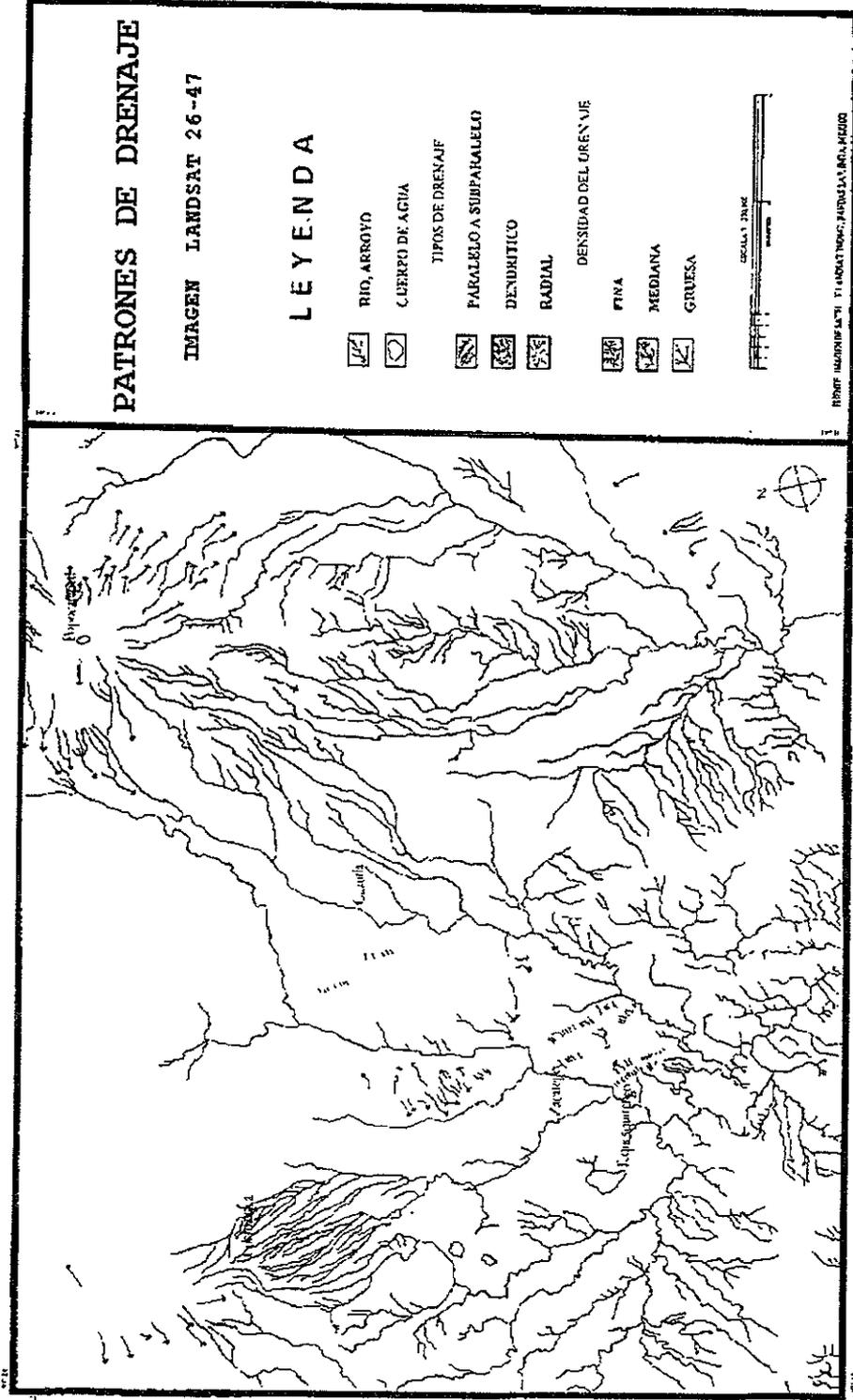


Figura 3.4 Patrones de drenaje

### 3.2.3 Patrones de cobertura

Este patrón muestra una gran variedad de caracterizaciones por los cambios y modificaciones que presenta el suelo debido a las actividades del hombre; está definido básicamente por el uso que presenta el suelo en el momento en que se toma la imagen.

En el presente trabajo se clasificó la cobertura con base en la zonificación del relieve y de la vegetación, ya que existe una estrecha relación entre los parámetros del relieve, roca, suelo y vegetación.

De acuerdo a la combinación de las bandas espectrales 2, 4 y 7 de la imagen de satélite (Fig. 3.5), se tiene que los colores verdes corresponden a la vegetación; como la imagen se tomó en el mes de febrero de 1990, durante la temporada de estiaje, se puede apreciar que en las partes bajas de los valles, la vegetación corresponde a la agricultura de riego, en la que predomina el cultivo de caña de azúcar.

En la porción septentrional de la imagen, en las partes altas de las sierras de Zempoala, Chichinautzin y Nevada, se distingue claramente la presencia de bosques, que corresponden a pino en sus porciones más altas y en transición hacia el pie de monte a bosque de pino-encino.

En la parte centro-sur de la imagen en correspondencia con las sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla se nota una vegetación natural muy rala que corresponde al tipo de selva baja caducifolia, en esta época los árboles carecen de follaje por lo cual no se distingue coloración alguna en la imagen, que correspondería a la agricultura de temporal. Además se observan en estas sierras pequeñas zonas cubiertas con vegetación de bosque de encino.

En las porciones planas y de lomeríos destinadas a la agricultura de temporal, se observan colores claros, debido a que no existe vegetación alguna que cubra el suelo, resultando aún más claras las zonas de pastizales.

Son fácilmente identificables las zonas destinadas a uso urbano, por sus tonos azules, así como los cuerpos de agua con tonos negros, entre los que destacan las lagunas, El Rodeo y Coatetelco, lago de Tequesquitengo y las presas Coahuixtla, Emiliano Zapata, Los Carros y Cayehuacán, ver figura 3.5. El mapa de interpretación de los patrones de cobertura se muestra en la figura 3.6.

La tabla 3.1 muestra una clasificación de los patrones de cobertura su clave, el uso del suelo y su localización.

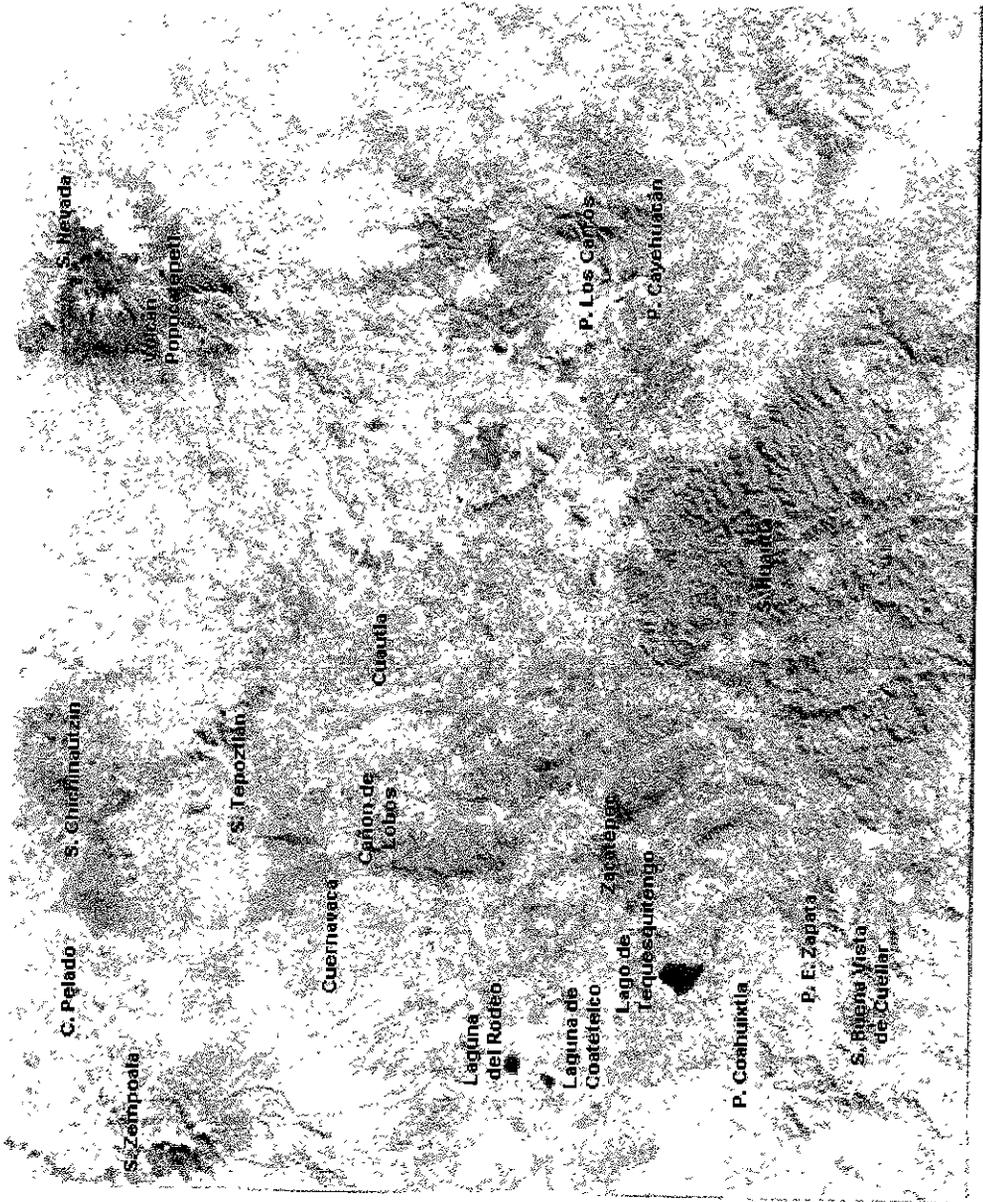


Figura 3.5 Área de estudio. Sección de la imagen de satélite Landsat TM 26-47, combinación de bandas espectrales 2, 4 y 7.

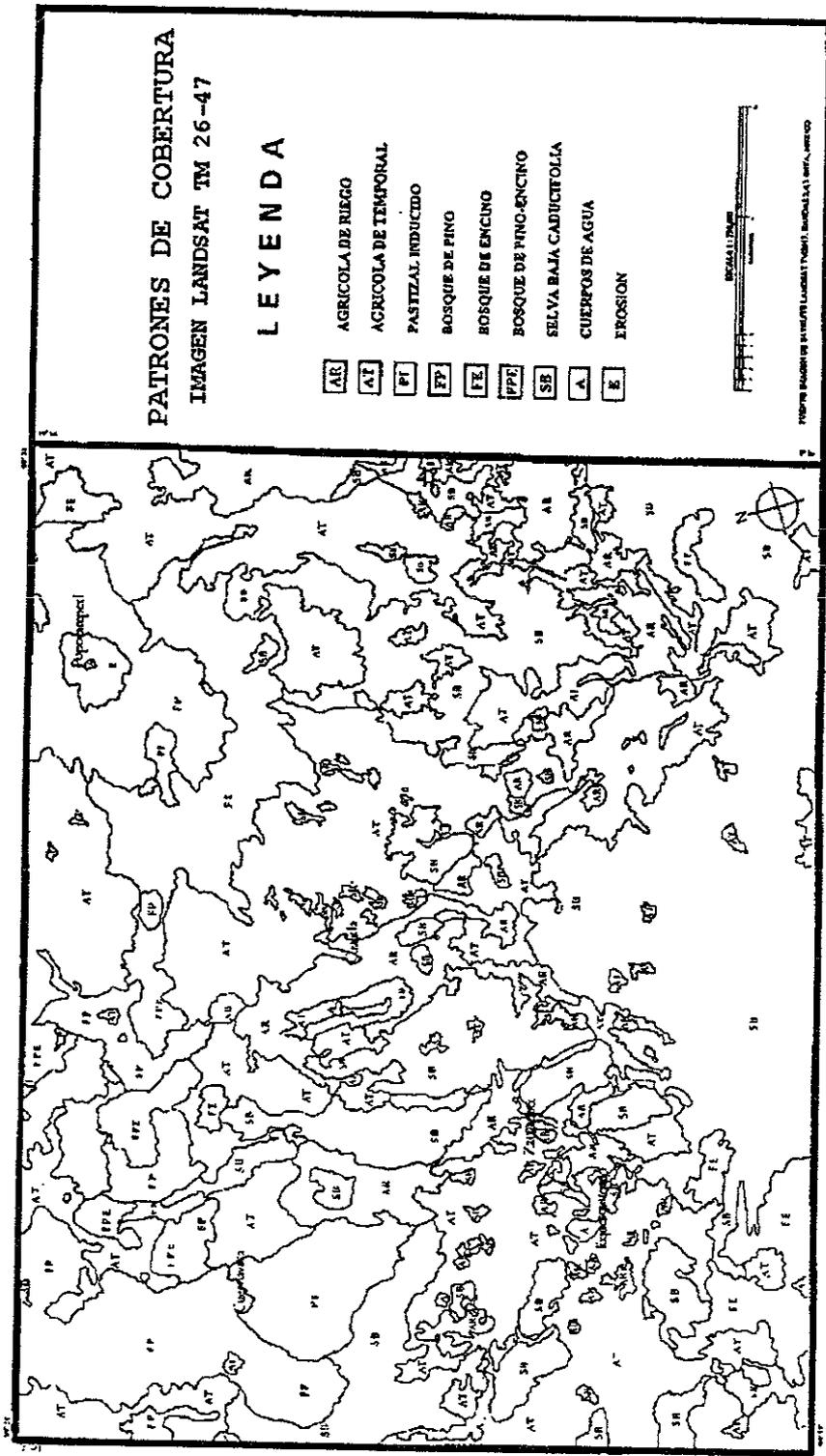


Figura 3.6 Patrones de cobertura

Tabla 3.1 Patrones de cobertura.

CLAVE	USO DEL SUELO	LOCALIZACIÓN
	<b>ACTIVIDAD AGRÍCOLA</b>	
AR	AGRICULTURA DE RIEGO	PARTES PLANAS
AT	AGRICULTURA DE TEMPORAL	LOMERÍOS
	<b>ACTIVIDAD PECUARIA</b>	
PI	PASTIZAL INDUCIDO	LOMERÍOS
	<b>FORESTAL</b>	
FP	BOSQUE PINO	
FE	BOSQUE ENCINO	PARTES ALTAS
FPE	BOSQUE PINO-ENCINO	
	<b>SELVAS</b>	
SB	SELVA BAJA CADUCIFOLIA	PARTES PLANAS
	<b>CUERPOS DE AGUA</b>	
A	LAGO, LAGUNA, PRESA	PARTES BAJAS
	<b>OTROS</b>	
E	EROSIÓN	PARTES ALTAS

### 3.2.4 Lineamientos

Los lineamientos son la representación de las condiciones anómalas del suelo en cuanto a su relieve, drenaje y cobertura o la combinación de éstos y se relacionan con los elementos geológicos.

De mucha importancia son los lineamientos debidos a un desarrollo del drenaje superficial, ya que resultan como consecuencia de los procesos tectónicos. De aquí la importancia de darle significación a los componentes más importantes de las imágenes sometidas al análisis y éstos son las líneas que se encuentran dentro del cuerpo de la imagen los que pueden ser o significar lo siguiente: líneas rectas expresan equilibrio, líneas curvas expresan movimiento.

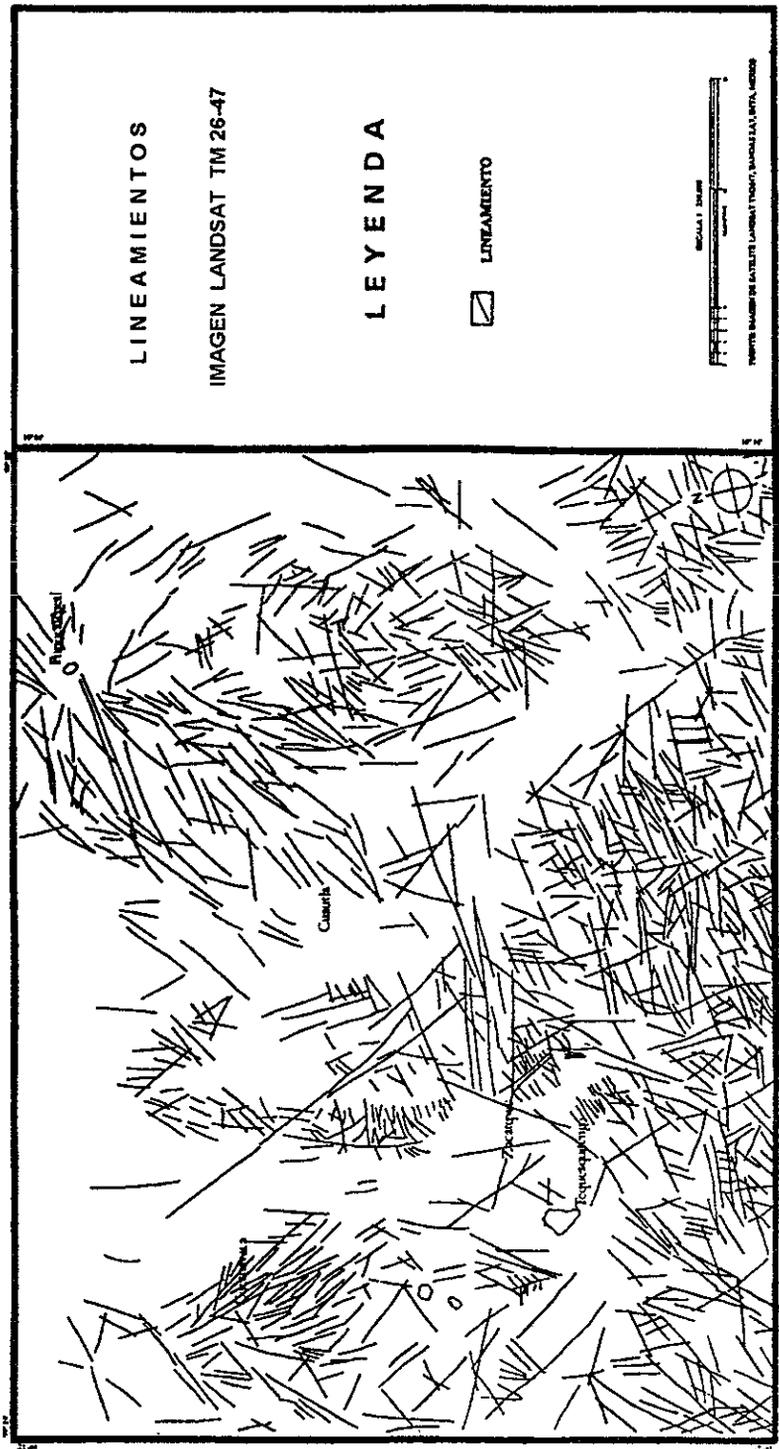


Figura 3.7 Lineamientos

Los lineamientos en las imágenes de satélite se representan en forma de líneas continuas discontinuas, gruesas o delgadas, tenues o destacadas, escalonadas o quebradas, rectilíneas o curvilíneas, largas o cortas, que se interceptan o no. Pueden ser las manifestaciones de fallas, fracturas, desplazamientos estructurales, linderos de vegetación, geomorfológicos, estructurales o litológicos, afloramientos regionales de estratos, valles tectónicos, depresiones, características culturales del suelo, etcétera.

En la figura 3.7 se presentan los lineamientos de manera como se observaron en la zona de estudio (Fig 3.2) sin realizar una interpretación geológica y se les dio una clasificación muy general en cuanto a su densidad: alta, media, baja, muy baja y nula.

### **3.3 Interpretación geológica**

#### **3.3.1 Relaciones geomorfológicas**

Son las relaciones geológicas de la forma, origen, naturaleza y evolución del relieve, basados en el significado de los datos o características de la superficie continental, obtenidos por percepción remota y la interpretación lógica de su significado.

La figura 3.5, imagen de satélite con combinación de bandas espectrales 2,4 y 7, permite observar las diferentes unidades de roca que constituyen el marco geológico regional, destacan las rocas ígneas del Eje Neovolcánico, emitidas por un importante número de aparatos volcánicos, algunos de los cuales constituyen las principales alturas del país.

Esta actividad volcánica ha dado lugar a la presencia de algunas cuencas endorreicas con el consecuente desarrollo de lagos, lo que da al paisaje geomorfológico una apariencia muy característica.

La principal geoforma que se observa en la imagen de satélite es el estratovolcán Popocatepetl, edificado por emisiones alternantes de productos piroclásticos y derrames lávicos. Además se observan numerosos aparatos de tipo cono cinerítico, que son generalmente de pequeña extensión entre los que destacan Chichinautzin, Tlaloc, Tres Marías y Pelado.

En la misma figura 3.5, se pueden observar derrames de materiales volcánicos de naturaleza ácida, cubriendo amplias extensiones en las porciones noroeste, sur, sureste y suroeste. Estos materiales se encuentran constituyendo las siguientes geoformas Sierra de Zempoala, Sierra de Chichinautzin y Sierra Nevada en la parte norte y Sierra de Huautla y Buena Vista de Cuéllar al sur.

Otra geoforma característica la constituye las rocas sedimentarias marinas de la provincia de la Sierra Madre del Sur, las cuales forman elevaciones alargadas y redondeadas, con un desarrollo mucho mayor en sentido longitudinal que en sentido transversal.

El análisis de la zona de estudio (Fig 3.3) permite ver el modelado unitario del terreno (parteaguas, sistemas de drenaje, elevaciones, depresiones, etc), la posición de las rocas (estructuras geológicas), los tipos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas), y por último los cambios de vegetación (éstos pueden estar influenciados por los cambios de rocas), ver mapa de interpretación de relaciones geomorfológicas figura 3.8.

Los rasgos geomorfológicos son de lo más importante dentro del análisis planteado, son la evidencia directa de los complejos naturales involucrados. El modelado terrestre conduce a determinar los rasgos constituidos del paisaje.

Desde el punto de vista geomorfológico el relieve tiene un papel muy importante, ya que es el resultado de los procesos endógenos y exógenos, es decir, conjuga el tectonismo y la acción de los procesos erosivos. De manera general se puede decir que las características de un paisaje dependen de los siguientes parámetros:

- Procesos endógenos y exógenos.
- Tipos de roca y estructuras geológicas presentes.
- Clima bajo el cual se han desarrollado estos paisajes.
- Duración de los cambios en el ambiente.
- Modificaciones producidas por el hombre.

La clasificación que se presenta es de tipo morfogenético, la cual considera la relación entre los procesos morfológicos y la base geológica.

Con base en la geomorfología y la geología, las formas del relieve que se encuentran en el área de estudio pertenecen a tres grupos: endógeno, endógeno modelado y exógeno, mismos que se subdividen en tipos específicos de geoformas, ver la figura 3.8.

## **I. Relieve endógeno**

### **A) Volcánico acumulativo.**

Aa) conos cineríticos.

Ab) derrames lávicos y domos (basálticos, riodacíticos y andesíticos).

Ac) laderas lávicas (basálticas, riodacíticas y andesíticas).

## **II. Relieve endógeno modelado**

- A) Ladera volcánica con erosión fuerte constituida por brechas y tobas.
- B) Ladera volcánica con erosión de moderada a fuerte, constituida por rocas basálticas, andesíticas, riódacíticas y riolíticas.
- C) Ladera volcánica con erosión leve.
  - Ca) Constituida por derrames (basálticos, andesíticos, riódacíticos y riolíticos).
  - Cb) Constituida por material piroclástico.
- D) Montaña de plegamiento.
- E) Intrusiones exhumadas erosionadas.

## **III. Relieve exógeno**

- A) Acumulativo de planicie aluvial.
- B) Acumulativo erosivo.
  - Ba) de piedemonte.
  - Bb) de montañas y lomeríos residuales.
- C) Erosivo de carst o erosivo cárstico.

Como su nombre lo indica, el relieve endógenos el que se debe a un origen interno, ya sea al tectonismo o al vulcanismo, en el que los procesos exógenos del modelado no han alterado sus formas originales.

El relieve debido a factores endógenos modelados por la erosión comprende a todas aquellas topoformas que al ser creadas por fuerzas internas se han modelado en forma significativa por los agentes denudatorios.

El relieve que se debe a factores exógenos, a diferencia de los dos anteriores, abarca las topoformas derivadas de la acción de procesos externos de carácter acumulativo, acumulativo erosivo y erosivo, aunque en algunos casos el tectonismo y vulcanismo hayan jugado un papel determinante, de manera directa o indirecta.

La siguiente tabla es la matriz de resultado de la sobreposición de los diferentes patrones espaciales.

Tabla 3.2 Interpretación de los materiales y procesos geológicos superficiales.

UNIDAD GEOMO.	PATRONES DE RELIEVE	PATRONES DE DRENAJE	DENSIDAD	PATRONES DE COBERTURA	LINEAMIENTOS DENSIDAD	MATERIAL SUPERFICIAL	PROCESO
IID	CERROS ALARGADOS		MUY BAJA	VEGETACIÓN	MUY BAJA	ROCA	RESIDUAL
IIIBb	SUBREDONDEADOS A REDONDEADOS		MUY BAJA	ROCA CONSOLIDADA	MUY BAJA	SEDIMENTARIA	RESIDUAL
IIB	CERROS ESCARPADOS	DENDRÍTICO	MEDIA	VEGETACIÓN Roca	MEDIA	ROCA ÍGNEA	RESIDUAL
IIA	CERROS ALTOS ESCARPADOS		MUY BAJA	CONSOLIDADA VEGETACIÓN Roca	MUY BAJA	ROCA ÍGNEA	RESIDUAL
IIIBa	PIE DE MONTE	SUBPARALELO	MEDIA	CONSOLIDADA VEGETACIÓN Roca NO CONSOLIDADA VEGETACIÓN	ALTA	GRAVAS ARENAS	FLUVIAL
IAa	VOLCANES	SUBPARALELO	MUY ALTA	ROCA	MUY BAJA	ÍGNEO	VOLCÁNICO
Iab, IAc	DERRAMES	INCIPIENTE	MUY BAJA		MUY BAJA	ÍGNEO	VOLCÁNICO
IIIBa	LOMERÍOS Y BARRANCAS		NULA	VEGETACIÓN CULTIVOS	MUY BAJA	GRAVAS ARENAS	ALUVIAL FLUVIAL
IIIA	PLANICIES Y COLINAS		NULA	CULTIVOS	MUY BAJA	ARENAS	FLUVIAL
IIIC	PLANICIES Y DEPRESIONES		NULA	CULTIVOS CUERPOS DE AGUA	NULA	ARCILLA ARENA, AGUA	ALUVIAL

A continuación se describen las topoformas identificadas en la zona de estudio (Fig. 3.2)

## **I. Relieve endógeno**

### **Aa) Volcánico acumulativo de conos cineríticos**

Este tipo de relieve se localiza en el norte de Morelos como resultado de una extraordinaria actividad volcánica que se tradujo en una acumulación masiva de lava y tefra.

Se observan numerosos aparatos volcánicos, aunque no se podría precisar su número, ya que se presentan volcanes sobrepuestos o cubiertos. En casi todos existe cráter con grado variable de relleno, algunos se encuentran abiertos en forma de herradura, son frecuentes los conos adventicios, sus pendientes son medias y homogéneas, conservan sus rasgos originales, su alineamiento este-oeste indica zonas de debilidad cortical que coinciden con fallas en la misma dirección.

### **Ab) Volcánico acumulativo de derrames lávicos y domos**

Esta geoforma está representada por derrames de lavas basálticas recientes que conservan su aspecto original. Se ubican alrededor de centros eruptivos y cubren materiales preexistentes de diversa naturaleza geológica, los principales derrames son:

- En el extremo noreste de la entidad, los derrames en forma de domos conocidos con los nombres de La Gloria y El Tabaquillo.
- Al sur de los volcanes de Tres Cumbres y Tezontle.
- Al sur del aparato volcánico de Tezoyuca.
- Al sur de los conos cineríticos de Atlacholoaya.
- En el oeste de Yautepec, proveniente de los volcanes Las Tetillas.
- Al norte de Yecapixtla en la Loma Malpaís, de origen, derrame de fisura, orientado de noreste a suroeste.
- El derrame de lava del Volcán Chichinautzin.
- Al suroeste del volcán La Herradura en el derrame llamado El Texcal.

Todos los derrames corresponden a la Formación Chichinautzin, su composición básica facilita su movilidad. Los rasgos sobre los derrames son incipientes.

### **Ac) Volcánico acumulativo en laderas lávicas**

Estas laderas relativamente jóvenes, comúnmente coronadas por conos cineríticos, están integradas por basaltos, riolacitas y piroclastos. Se localizan en toda la parte septentrional de la entidad.

Esta amplia forma no presenta grandes pendientes y desciende del extenso flanco del área montañosa. Sobreyace en rocas sedimentarias mesozoicas, tiene una disección débil y/o erosión nula debido a la cubierta vegetal de bosque templado, así como a su reciente edad.

Este relieve al igual que los dos anteriores está constituido por la Formación Chichinautzin, presenta fracturamientos aislados con una orientación dominante de noreste a suroeste.

A diferencia de los derrames lávicos, antes mencionados, éste tipo de relieve endógeno tiene una mayor integración de drenaje, de tipo radial como consecuencia de la forma cónica de las estructuras volcánicas.

## **II. Relieve endógeno modelado**

### **A) Ladera volcánica con erosión fuerte constituida por brechas y tobas**

Esta geoforma queda representada por depósitos volcanoclásticos que constituyen la Formación Tepoztlán, localizada en los alrededores del poblado del mismo nombre, también al noreste de la entidad.

Tomando como referencia que la Sierra de Xochitepec, del Terciario Superior (2,400 msnm) se extiende hacia el sur con altitudes mayores y que la actividad volcánica que generó la Sierra de Chichinautzin del Cuaternario (3,480 msnm) cubrió a la serie Xochitepec, al tiempo que obstruyó el drenaje de la Cuenca de México que se dirige a la Cuenca del Balsas, se puede afirmar que es muy probable que la Formación Tepoztlán, tenga su origen de flujos coalescentes andesíticos provenientes de la serranía de Xochitepec y/o de la serranía de Zempoala (3,690 msnm).

Además, es factible que ciertos depósitos de estos materiales hayan sido erosionados por lo que no quedan testigos al sur del poblado de Oacalco en el municipio de Yautepec.

Otro afloramiento de estos materiales se localiza al noreste en la localidad de Palpan, en las estribaciones de la Sierra de Ocuilan en la porción limítrofe entre los estados de México y Morelos.

### **B) Ladera volcánica con erosión de moderada a fuerte por rocas basálticas, andesíticas, riódacíticas y riolíticas**

Esta geoforma se localiza en las sierras volcánicas de edad anterior al Cuaternario, como: serranía de Zempoala al noreste, serranía de Huautla al sureste, serranía de Buenavista al suroeste y parte de las laderas del Volcán Popocatepetl. También se incluyen algunos afloramientos aislados al este de Chalcatzingo, sur de Hutzililla y noreste de Totolapan.

Cabe aclarar que aun cuando la erosión se efectúa con moderada intensidad, las partes superiores de la ladera si conservan su forma original. En ellas tienen desarrollo numerosas barrancas, deslaves, corrimientos de tierra, derrumbes, etcétera.

### **Ca) Ladera volcánica con erosión leve, constituido por coladas**

Esta topoforma se sitúa al norte de Tetela del Volcán y oeste de Ixtilco El Chico. En la primera porción forma parte del Volcán Popocatepetl, predominando materiales volcánicos ácidos (andesita y toba andesítica) tienen un drenaje radial. En ella quedan comprendidos 10 centros volcánicos explosivos de carácter cinerítico.

En ambas porciones existen altas pendientes y fuerte disección, estas geoformas se diferencian de las que se consideran como releve endógeno, por que en este caso existe una mayor integración del drenaje. Son formas que muestran un relieve erosivo intermedio entre las topoformas volcánicas endógenas y aquellas que han perdido sustancialmente su expresión original, como serían las sierras constituidas por tobas y brechas.

### **Cb) Ladera volcánica constituida por piroclásticos**

Este tipo morfológico se encuentra representado en la parte más alta del estratovolcán Popocatepetl, por un cono de piroclásticos, se localiza en la zona de las nieves perpétuas, la cima tiene un amplio cráter.

### **D) Montañas de plegamiento**

Este relieve se encuentra ampliamente distribuido en la entidad, destaca en las porciones centro y oeste. Corresponde a rocas sedimentarias químicas y clásticas de ambiente marino cretácico.

Estos materiales litológicos forman estrechas y alargadas serranías constituyendo estructuras anticlinales, separadas por valles sinclinales en donde se ha acumulado un potente espesor de sedimentos aluviales.

Los anticlinales que dividen a Morelos se localizan en la parte central, dividen los valles de Cuernavaca, Yautepec y Cuautla, al oeste se localizan en las serranías de Xochicalco, Ocuilan, Chalma y Cacahuamilpa.

En estas sierras plegadas los rasgos fluviales son escasos debido al fracturamiento y débil resistencia de las calizas; su pequeña altura determina poca profundidad de las corrientes fluviales que da lugar a una red de drenaje subparalela.

#### **E) Intrusiones exhumadas erosionadas**

Estos cuerpos intrusivos se enfriaron en el interior de la corteza terrestre y quedaron expuestos por procesos de desgaste de los materiales que los cubrían.

En la porción oriente de Cuautla, se localizan cuerpos intrusivos discordantes, en forma de troncos y diques de composición heterogénea, principalmente pórfido riolítico, pórfido andesítico y diabasa.

### **III. Relieve Exógeno Acumulativo**

#### **A) Planicie aluvial**

Este relieve se vincula a las formas originadas por las corrientes fluviales. Están integradas por aluviones cuaternarios resultado del intemperismo y erosión de las rocas que la rodean, las planicies aluviales son, a nivel estatal, de extensión notables debido al porcentaje de relieve plano.

Se ubican en la parte centro-oeste de la entidad en pequeñas depresiones. Se derivan de la sobreposición de coladas lávicas que al alterar las condiciones de drenaje, propiciaron el depósito de materiales que aceleraron el surgimiento de estas geoformas semiplanas.

Otra área de planicies aluviales se sitúa en los sinclinales correspondientes a las serranías de rocas sinclinales del centro del Estado de Morelos y al oeste de la ciudad de Cuautla, dichas planicies se formaron como resultado de la erosión fluvial de las sierras mencionadas y por los aportes del Río Cuautla.

## **Ba) Erosivo de piedemonte**

Los piedemonte son estructuras complejas formados por varios procesos exógenos e incluso algunos endógenos. Se localizan dos, uno al este y otro al oeste de la entidad.

Comprenden sedimentos fluviales derivados de corrientes coalescentes que se han depositado en pendientes suaves.

El primero corresponde a) a la Formación Cuernavaca, el segundo b) a la Formación Tlayecac y Riodacita Popocatépetl, ambos tienen dirección norte-sur.

a) El piedemonte de la Formación Cuernavaca ha sido cubierto en la parte oriental por lavas de la Formación Chichinautzin, designado por Ortiz como glacis de Cuernavaca, que es una mezcla de conglomerados clásticos y volcanoclásticos andesíticos, originados por abanicos aluviales.

b) La aparición del Volcán Popocatépetl favoreció el desarrollo de un manto de acumulación a sus pies, por la acción de la gravedad, procesos fluviales y gelifracción.

La gran altura del volcán ha propiciado una fuerte intensidad de los procesos modeladores, condicionados por factores orográficos y climáticos. Al desarrollarse la disección de las laderas montañosas se produjo un manto acumulativo de piedemonte. Conforme se expandió alejándose del Popocatépetl se han diferenciado dos regiones: una superior más antigua que muestra disección y extinción de las acumulaciones y otra acumulativa más joven.

La primera región comprende los derrames lávicos que llegaron a la superficie por el centro eruptivo del volcán.

La segunda representa una secuencia de derrames de lodo o lahares interdigitados y emplazados al mismo tiempo que las lavas, pero a mayor distancia del centro eruptivo.

Ambos derrames han cubierto más de 50 Km<sup>2</sup> a partir de su fuente original en una o varias etapas. El material no está cementado no obstante está muy compacto y suele formar acantilados en los flancos de las barrancas.

El piedemonte del Plan de Amilpa, a diferencia del de Buenavista está en proceso de formación más que de extinción.

## **Bb) Montañas y lomeríos residuales**

Esta forma queda representada por los primeros depósitos terciarios que descansan encima de las rocas cretácicas. Consiste en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres no marinos, que se denominan Grupo Balsas.

Las áreas de afloramiento quedan junto a las formaciones del Cretácico, en sitios donde hubo fallamiento, que levantaba algunos bloques mientras otros bajaban. Su máxima expresión se observa en el Cerro Amarillo al oriente de Ticumán. Este depósito se considera como relieve postorogénico del tipo molasa continental.

## **C) Erosivo de carst o erosivo cárstico**

Este tipo morfológico se desarrolló en la depresión relativa del sureste de la entidad, a 1000 msnm que está rodeando al Complejo Oligomiocénico y las sierras Cretácicas plegadas. Dos factores han determinado esta geoforma: el drenaje y la estructura geológica.

Hacia la depresión señalada drenan las cuencas superficiales y subterráneas que alimentan al Río Amacuzac, alcanzando ahí mismo su nivel base, dando lugar a la erosión subterránea y al surgimiento de manantiales.

Esta topografía está constituida por calizas, dolomías y en menor cantidad, mármol que ocupan miles de kilómetros cuadrados bajo la superficie del estado e integra la Formación Morelos principalmente, su composición mineralógica influye en la existencia de dolinas.

Las dolinas son depresiones causadas por procesos de disolución bajo la superficie, con el hundimiento subsecuente. Las más notables que están ocupadas por agua son Tequesquitengo, El Rodeo y Coatetelco; también se presentan ocupadas por zonas de cultivos como las de Alpuyeca y Puente de Ixtla.

Estas rocas son en particularmente susceptibles al ataque del agua subterránea que contiene sustancias en solución. Su capacidad para disolver y oxidar depende del contenido de bióxido de carbono y oxígeno libre al penetrar a la zona de aereación.

El agua de lluvia contiene ambos, los adquiere de la atmósfera y cuando pasa a través del suelo obtiene más bióxido de carbono generado por las bacterias. El proceso anterior explica por qué en la parte superior de la zona de aereación, el agua subterránea es un ácido carbónico muy diluido, una sustancia corrosiva y solvente. El mapa de resultado de la interpretación de relaciones geomorfológicas se muestra en la figura 3.8.

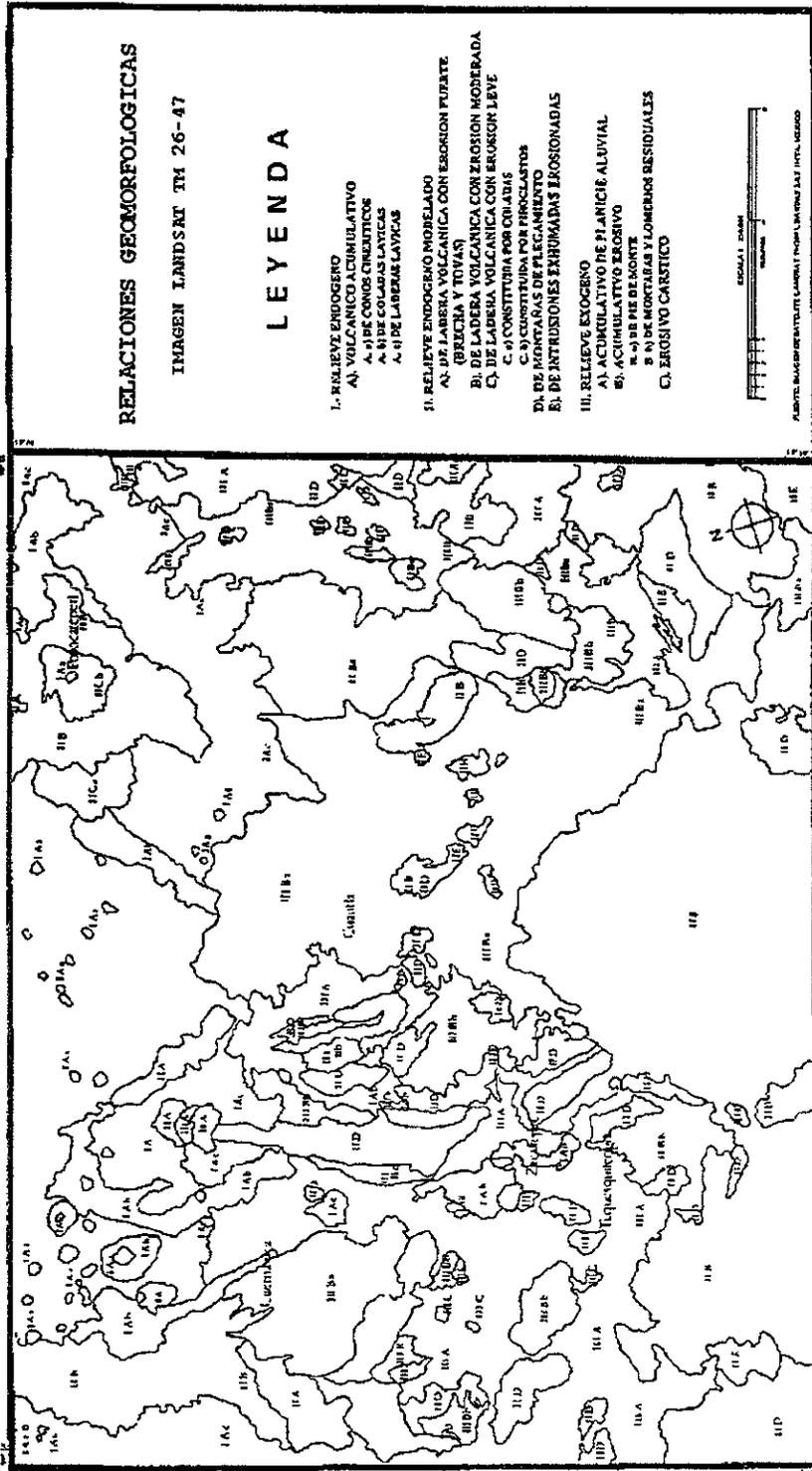


Figura 3.8 Relaciones geomorfológicas

### 3.3.2 Correlaciones estratigráficas

Es la interpretación de los materiales del subsuelo con características petrográficas similares a otras que han sido estudiadas en otros sitios y corresponden a la misma edad geológica y que se constituyeron a través de los procesos de formación geológica por capas, lechos, estratos y láminas. Esta interpretación se realiza tomando en cuenta las características del relieve, drenaje, de materiales de la superficie (cobertura) y relaciones geomorfológicas.

En la figura 3.9 se muestra la distribución estratigráfica del subsuelo: rocas ígneas extrusivas básicas (Igeb), rocas ígneas extrusivas ácidas (Igea), rocas ígneas extrusivas intermedias (Igei), rocas ígneas intrusivas (Igi), lutitas (Lt), calizas (Cz), yesos (Y), metamórfico (Mt), areniscas y conglomerados (Ar-Cgl), conglomerados (Cg), aluvión (Al).

Una vez que se concluyó el reconocimiento e identificación de los procesos que están o han estado actuando en la zona de estudio se llegó a la fase de interpretación de las unidades geológicas existentes. Estas se caracterizan por pertenecer a dos dominios geológicos principales, el primero de tipo sedimentario, constituido por rocas de tipo calcáreo de edad cretácica, conglomerados continentales y materiales aluviales del terciario y cuaternario respectivamente; el segundo tipo representado por rocas ígneas extrusivas, conos cineríticos, etcétera. La siguiente tabla muestra la interpretación de la litología superficial y del subsuelo.

Tabla 3.3 Interpretación de la litología superficial y del subsuelo.

UNIDAD GEOMOR.	MATERIAL SUPERFICIAL	ASOCIACIÓN LITOLÓGICA	CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN
IA IID IIB	RESIDUAL RESIDUAL	COLADAS LÁVICAS CALIZAS Y LUTITAS	ALTA BAJA-MEDIA
IIB	RESIDUAL	ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS (INTERMEDIAS Y ÁCIDAS)	BAJA -MEDIA
IIE	RESIDUAL	ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS	BAJA
IIA	RESIDUAL	VOLCANOCLÁSTICOS	MEDIA-ALTA
IIIBd	TRANSPORTADO	CONGLOMERADO	MEDIA
IIIAa IIIAb IIIAc	RESIDUAL	ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS (BÁSICAS E INTERMEDIAS)	MEDIA
IIIA IIIBa	TRANSPORTADO	ALUVIÓN Y CONGLOMERADO	ALTA

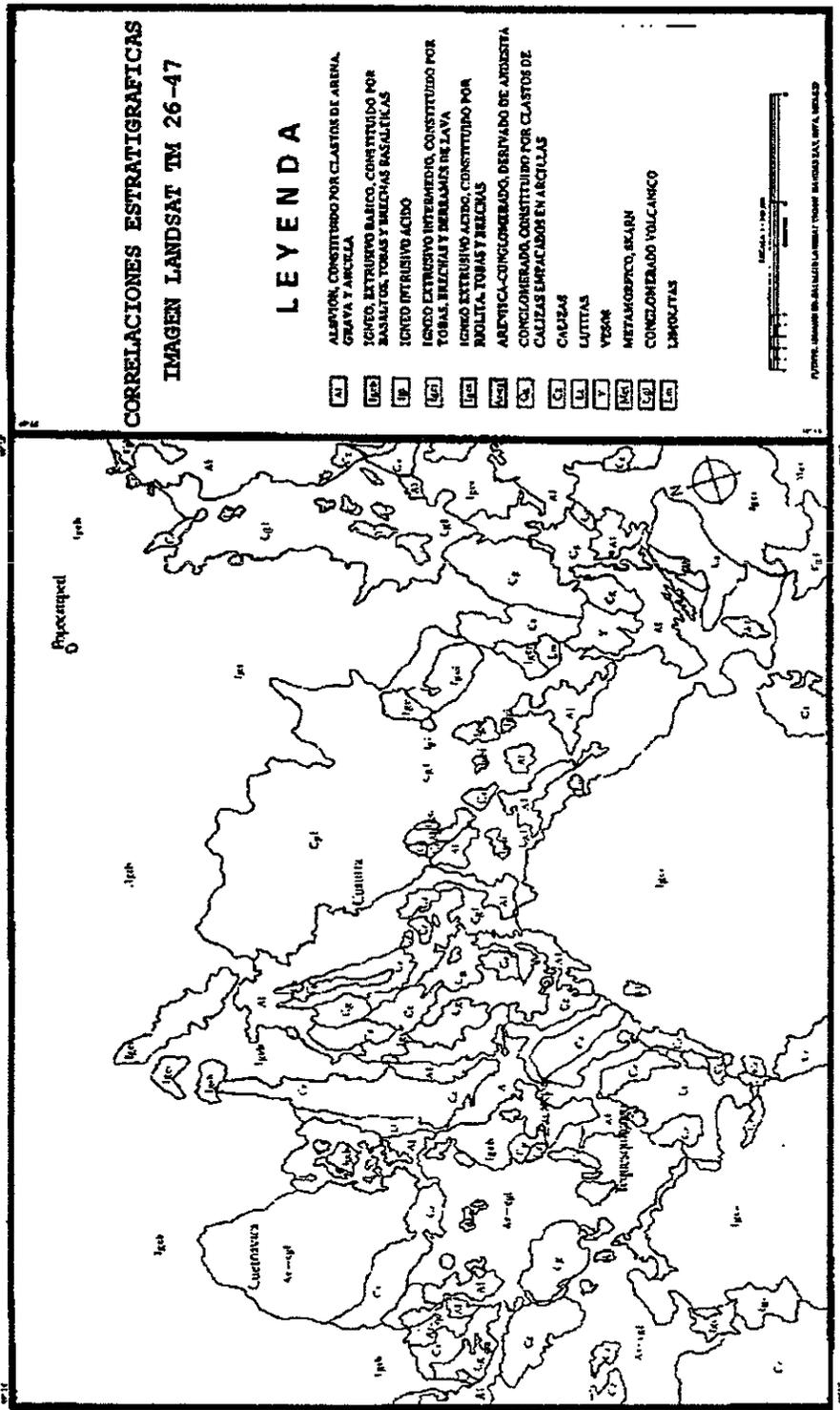


Figura 3.9 Correlaciones estratigráficas

### **3.4 Análisis e interpretación de lineamientos**

Puesto que uno de los objetivos principales del presente estudio es la prospección geohidrológica de la zona como acuífero, utilizando percepción remota, revisten gran importancia los lineamientos como fracturas y fallas geológicas, ya que pueden tener relación con la capacidad de infiltración en zonas de recarga o salida por flujo horizontal.

Los lineamientos de mayor longitud y la intersección de éstos, son muy importantes ya que pueden representar zonas sumamente fracturadas y falladas.

Por lo anterior, se eliminaron los lineamientos superficiales, líneas de drenaje, linderos geomorfológicos y de vegetación, cambios de textura debido a cambios de tonos de la imagen, características culturales, etcétera.

Los lineamientos rectilíneos pueden ser: grandes fallas de la corteza de muchos kilómetros de longitud; pequeñas fallas normales, inversas, de desplazamiento lateral, etc.; conjunto de fallas paralelas; alineamientos de cursos de ríos con control estructural; líneas de drenaje; desplazamientos estructurales; linderos geomorfológicos o estructurales; rumbos de afloramientos regionales de estratos; valles tectónicos, etcétera.

Los lineamientos curvilíneos cerrados o semicerrados o estructuras circulares y ovales pueden ser: aparatos volcánicos, domos intrusivos o extrusivos ígneos, domos salinos, plegamientos convados de rocas sedimentarias, sinclinales, anticlinales, calderas de colapso, emisiones de lavas ácidas, intermedias o básicas con contornos circulares, zonas cársticas con dolinas, cuencas hidrográficas, valles intermontanos, bolsones, lagos, etcétera.

En la figura 3.10 se muestra la interpretación de las formas y distribución de los lineamientos asociados a las estructuras geológicas de la zona de estudio.

En la zona de estudio (Fig.3.5) se observan claramente los pliegues anticlinales y sinclinales de las rocas calizas cretácicas por efecto de la Orogenia Laramide.

Relacionadas con estas estructuras se distinguen las fallas de Cañon de Lobos y de Jojutla, de edad posterior a la Orogenia Laramide, ya que únicamente afectan a las estructuras plegadas de calizas, presentan una dirección NE-SW y NW-SE respectivamente, presentando desplazamiento vertical normal de aproximadamente 1,500 m en la primera y en la segunda el movimiento es lateral derecho, dentro de éste sistema se incluyen fallas normales de dirección NE, localizadas al occidente del anticlinal de Ticumán.

Resulta interesante el alineamiento de conos cineríticos y volcanes escudo, que constituyen las Sierras de Chichinautzin, Zempoala y Nevada, la dirección que representan es E-W y NW-SE respectivamente, a este lineamiento se le denomina Falla Clarión.

En el área de Tepoztlán se presenta una estructura del tipo de Graben asociado a Horst del Plioceno. Se distingue un alineamiento de los afloramientos de la Formación Tepoztlán la cual se puede continuar hacia la parte SW del estado.

Es notable el alineamiento que presenta la falla del Cañon de Lobos el cual se puede continuar hacia el SW del estado y se manifiesta en trazo que presenta el río Tepalcingo.

De la misma manera se distingue el alineamiento que parte de la población de Atlixco, Puebla en dirección NW-SE hacia la localidad de Axochiapan. Este mismo alineamiento se aprecia que continua en la Serranía de Huautla internándose en el Estado de Guerrero.

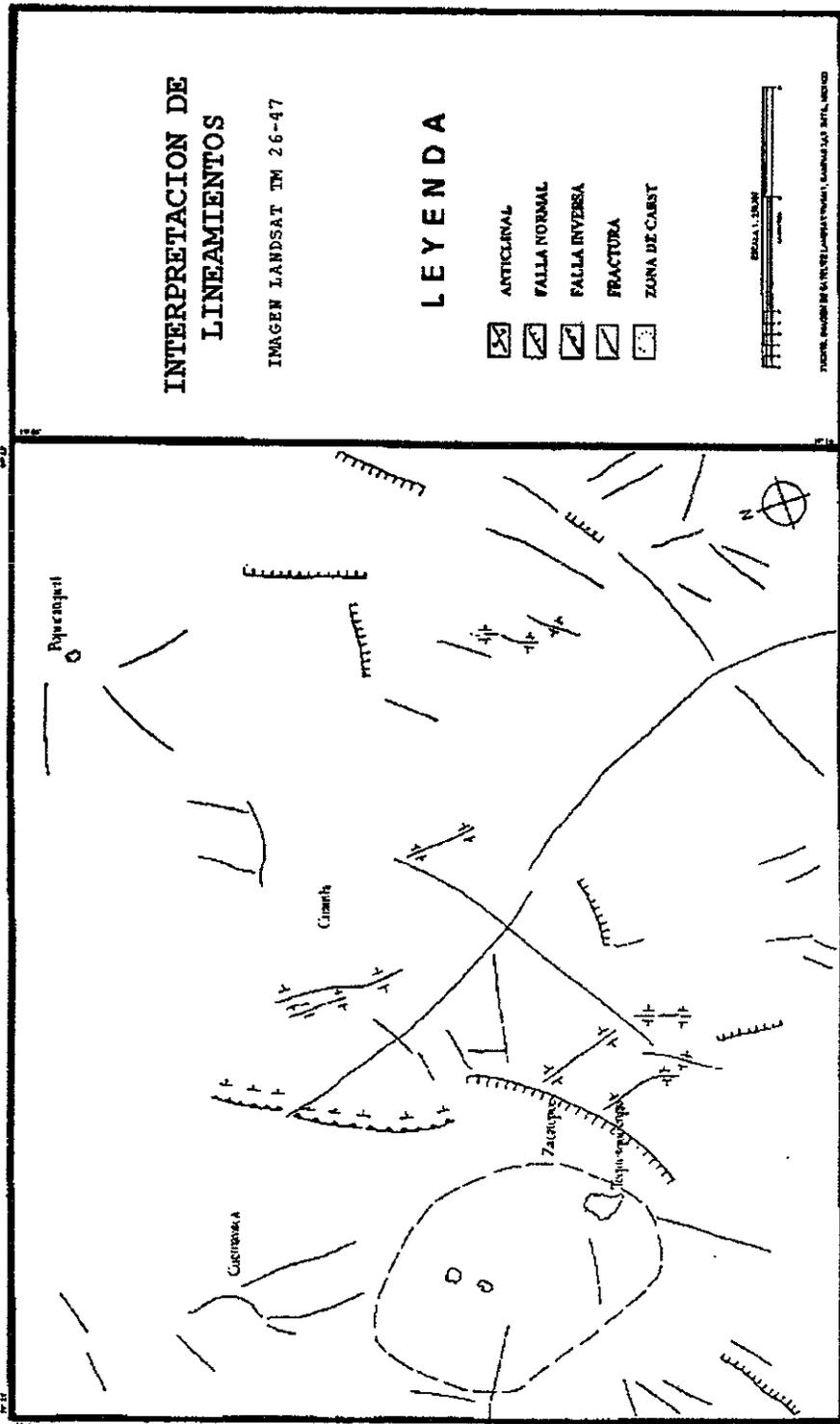


Figura 3.10 Interpretación de lineamientos

### 3.5 Asociaciones estructurales

En la parte centro del área de estudio (Fig.3.5) se observan las estructuras sinclinales y anticlinales de las sierras de calizas plegadas, con una orientación preferencial NE-SW.

Al norte se observa la presencia de la actividad volcánica representada por la alineación de numerosos aparatos volcánicos (Eje Neovolcánico) en donde destacan la Sierra de Chichinautzin con dirección E-W, la Sierra Nevada N-S y hacia el sur se observa la serranía de Huautla, constituida por materiales ígneos intrusivos intermedios, en donde se distinguen gran cantidad de lineamientos producidos por fallas de corrimiento, ver figura 3.8.

El significado de los patrones interpretados en la imagen y por las relaciones que existen entre éstos se tiene que, las rocas sedimentarias calcáreas marinas fueron plegadas por esfuerzos producidos durante la Orogenia Laramide, desarrollándose anticlinales y sinclinales que dieron forma a las serranías actuales como las de Tepoztlán-Tlaltizapán, Cerro Santa María y Cerro Jojutla.

En la zona se identifican fallas y fracturas de diferentes dimensiones, las cuales se encuentran afectando a las rocas sedimentarias, mismas que por su movimiento fueron clasificadas como fallas del tipo normal e inverso.

Con base en su génesis, las estructuras son la consecuencia de los procesos endógenos. De sus asociaciones estructurales se establece una interpretación de acuerdo con:

- Los principios de identidad. Estos se apoyan en los caracteres de que los orígenes de cada tipo de roca les ha sido impuesto por su naturaleza (sedimentaria, ígnea o metamórfica).
- Las relaciones externas de las estructuras. En este caso no necesariamente implica correspondencia interna entre estructuras relacionadas externamente, ya que por su origen y por sus relaciones temporales, pueden pertenecer a sistemas estructurales diferentes.
- Las relaciones internas de las estructuras. Estas relaciones se pueden ejemplificar con un anticlinal ligado a un sinclinal. Esto puede ser siempre y cuando ambas estructuras reúnan el conjunto de condiciones o parámetros que les den los caracteres de identidad y de correspondencia, tales como: la misma secuencia litológica; que hayan sido afectados por los mismos procesos; que tengan relaciones de parentesco en cuanto a su génesis, etcétera.

- La conexión de las estructuras. Se basa en los caracteres de correspondencia o de no correspondencia; ejemplo del primer caso, situación en la cual un intrusivo joven está afectando a un paquete de rocas pre-existente metamorfizándolo y provocando fallamiento y fracturamiento. Por otro lado se puede tener una roca granítica anterior a la depositación de un paquete sedimentario, dándose el caso de no correspondencia.
- Los sistemas de estructuras. Se definen como las asociaciones de estructuras originadas por un mismo fenómeno o mismo período de fenómenos geológicos; por ejemplo, cuando se presentan campos de fallas normales asociadas a capas basculadas, el cambio de buzamiento de una falla geológica puede provocar el desarrollo de fracturas secundarias o incluso una rotación de capas.

La siguiente tabla es la matriz de resultado de la correlación estratigráfica y de la interacción geodinámica.

Tabla 3.4 Interpretación de la litología del subsuelo y asociaciones estructurales.

UNIDAD LITOLÓGICA	ASOCIACIONES ESTRUCTURALES	CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN
Igeb	DERRAMES HORIZONTALES E INCLINADOS	ALTA
Ig <sub>1</sub>	FRACTURAMIENTO VARIABLE	BAJA
Igei	FRACTURAMIENTO VARIABLE, FALLAS NORMALES	BAJA
Igea	FRACTURAMIENTO VARIABLE, FALLAS NORMALES	BAJA
Cz	ANTICLINALES, SINCLINALES, FALLAS NORMALES E INVERSAS	BAJA-MEDIA

De acuerdo con lo expuesto se puede inferir, dentro del área de estudio, la presencia de derrames volcánicos de composición intermedia a básica; estratos sedimentarios calcáreos formando anticlinales y sinclinales; fallas de tipo normal e inverso que afectan principalmente a las rocas de origen sedimentario y por último, sistemas multidireccionales de fracturas primarias que se encuentran tanto en las rocas ígneas extrusivas y sedimentarias.

### 3.6 Interacciones geodinámicas

En la imagen de la figura 3.5 se distinguen numerosos lineamientos, en primer lugar destacan las estructuras de sierras plegadas de rocas calizas Mesozoicas, localizadas en la parte media, con una dirección preferencial NE-SW.

En segundo lugar en la parte norte se observa la presencia de la actividad ígnea del Eje Neovolcánico, el cual sigue una dirección E-W en la sierra de Chichinautzin, NE-SW en las Sierras de Zempoala y Nevada.

La presencia del Eje Neovolcánico modifica la secuencia sedimentaria marina y continental del Mesozoico. Se observa como se encuentran rodeadas por materiales ígneos en la parte oriente, poniente y sur, dando lugar a lineamientos regionales en la zona de: Cañon de Lobos-Tepalcingo, Jojutla y Atlixco Iguala, Gro. La figura 3.11 muestra el mapa de interpretación de las interacciones geodinámicas.

La siguiente tabla muestra la interpretación de la secuencia estructural y de movimiento relativo del área de estudio.

Tabla 3.5 Interpretación de la secuencia estructural y de movimiento relativo.

ESTRUCTURA	MOVIMIENTO RELATIVO
1,2,3,4,5,6,7,8 FALLAS NORMALES	BLOQUE B DESPLAZADO CON RESPECTO AL BLOQUE A EN FORMA VERTICAL O INCLINADA
9 FALLA INVERSA	BLOQUE B DESPLAZADO O MONTADO SOBRE BLOQUE B BLOQUE A DESPLAZADO O MONTADO SOBRE BLOQUE B
10,11,12,13,14,15,16,17 Y 18 ANTICLINALES	ESTRUCTURAS PLEGADAS ORIENTADAS NW-SE, NE SW Y NS

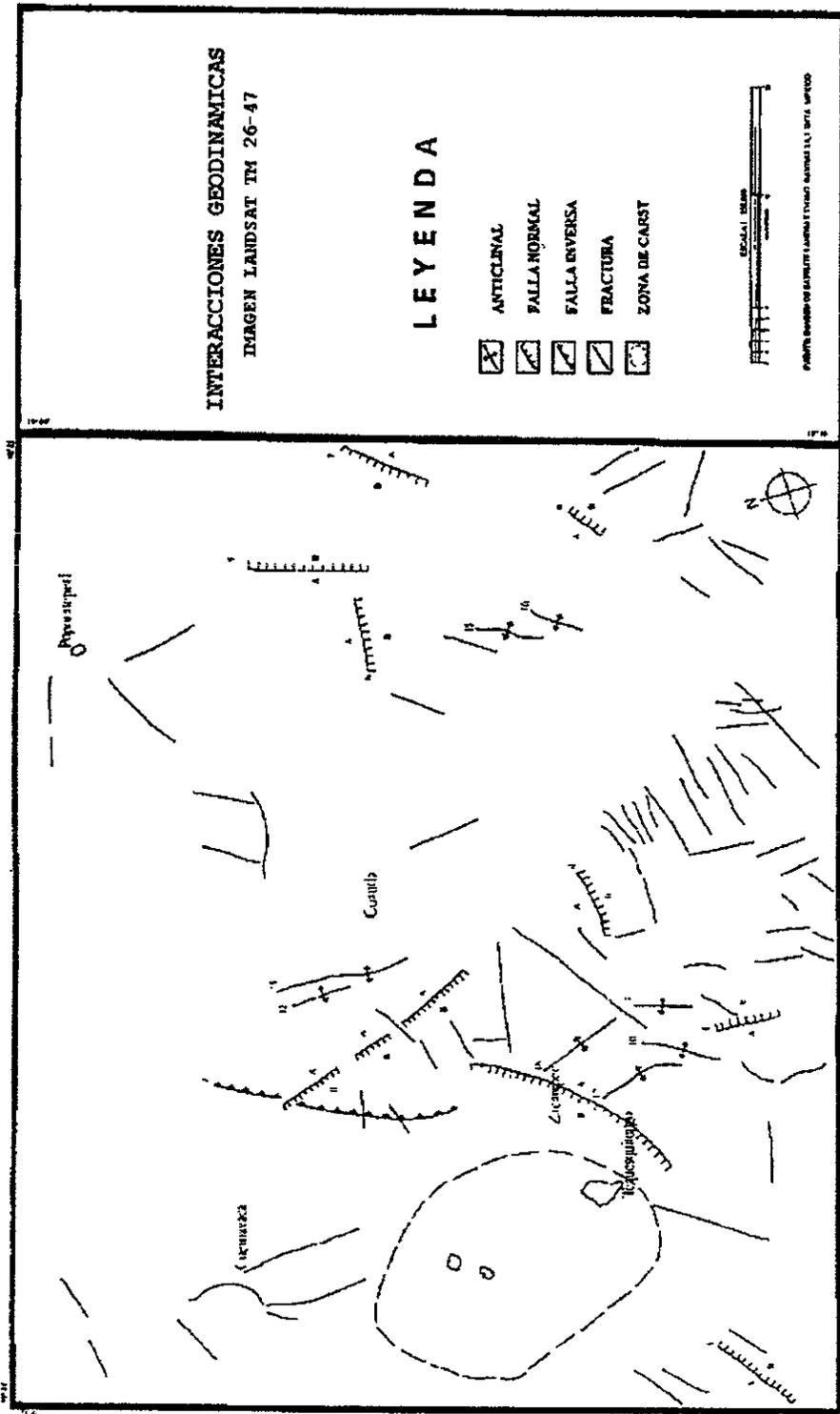


Figura 3.11 Interacciones geodinámicas

### 3.7 Interpretación geohidrológica

El desarrollo de una metodología para la interpretación de imágenes de satélite para recursos naturales (tipo Landsat TM) en la prospección geohidrológica, requiere de un entendimiento claro del significado geohidrológico de los rasgos de los patrones identificados en la imagen de satélite.

La interpretación geohidrológica se basó en los siguientes criterios:

- Las fracturas y las fallas han tenido influencia en el desarrollo de los patrones de drenaje, así como en la evolución temprana de la geomorfología de la zona.
- Los materiales de grano grueso transportados por corrientes antiguas, se encuentran localizados en las partes externas de la cuenca.
- Generalmente cuando un mayor número de lineamientos de diversas direcciones se cruzan, dan origen a zonas de debilidad en la corteza, resquebrajándola en sumo grado. Además si esto ocurre en rocas que aunque no sean favorables para formar acuíferos, las zonas de fracturamiento y/o fallamiento pueden permitir que el agua aportada por la precipitación pluvial se infiltre a través de ellas y el flujo subterráneo continúe en dirección de las mismas para recargar las zonas que presentan condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea.
- Cuando las condiciones anteriormente descritas se localizan en las rocas sedimentarias (principalmente calizas) se establecen ambientes favorables para el posible desarrollo de zonas cársticas que pueden llegar a contener acuíferos de importancia económica.
- En algunos casos, los lineamientos de las fallas o fracturas que se observan en las zonas montañosas, se continúan a través de los valles, aunque ahí se encuentran cubiertos por aluvión. Sin embargo la continuidad de estos lineamientos es posible detectarla cuando en la misma dirección se forman arroyos que se ubican generalmente hacia el centro de los valles.
- La máxima infiltración se produce a lo largo de las corrientes principales y de las áreas caracterizadas por patrones de drenaje con textura media y gruesa.
- El drenaje de textura fina indica sedimentos de grano fino, en donde la infiltración del agua en el subsuelo es muy pobre, por lo tanto de posibilidades muy bajas.
- Las rocas fracturadas son susceptibles de intemperismo y erosión, estas zonas de debilidad en las rocas se extienden desde las montañas hacia las cuencas y están cubiertas por aluvión.
- En las áreas semidesérticas, la vegetación ribereña la cual crece en las cercanías de los ríos y las freatofitas vegetación la cual depende del agua subterránea para su subsistencia son buenos indicadores de agua subterránea cerca de la superficie.

- Los principales acuíferos o los más conocidos se encuentran en materiales granulares.
- Las rocas ígneas extrusivas de tipo básico (basaltos, brechas y tobas) pueden ser formadoras de acuíferos.
- Las superficies cubiertas por las rocas ígneas extrusivas ácidas e intermedias, andesitas y riolitas fracturadas, así como brechas y tobas, pueden ser buenas formadoras de acuíferos.
- En lo concerniente a las rocas sedimentarias, los subtipos de las calizas arrecifales y las de plataforma representan la mayor importancia como formadoras de acuíferos, debido a que presentan las mejores condiciones para el desarrollo de fenómenos de carsticidad.

Del análisis e interpretación de los diferentes patrones espaciales identificados en la zona de estudio (Fig 3.1) se concluye la siguiente interpretación geohidrológica.

### **I. Zona de baja posibilidad para aprovechamiento**

La presencia de materiales permeables y el relieve inclinado en la parte norte del estado, determina que no se presenten condiciones geohidrológicas adecuadas para el aprovechamiento de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, por lo que se considera zona de recarga.

Los materiales impermeables de la región sur, como son las Sierras de Buenavista de Cuéllar y Huautla, determinan a su vez bajas posibilidades.

Las geoformas constituidas por rocas calizas se encuentran sometidas a procesos de erosión y carsticidad por lo que su ubicación es muy localizada.

El Valle Tepalcingo-Axochiapan ubicado en la porción oriental del estado, se encuentra reglamentado como acuífero sobreexplotado.

### **II. Zona de mediana posibilidad para aprovechamiento**

Las partes de lomeríos de la imagen presentan condiciones de mediana permeabilidad, dependiendo de las características físicas del acuífero, ubicación en la cuenca, así como de la naturaleza litológica de los materiales del subsuelo.

### **III. Zona de alta posibilidad de aprovechamiento**

Las partes bajas de los valles constituidos por materiales granulares, presentan posibilidades altas para la extracción, explotación, perforación y establecimiento de aprovechamientos subterráneos.

Los pie de monte presentan condiciones propicias para las descargas de aguas subterráneas, debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad.

Es importante resaltar la geoquímica de las aguas subterráneas, la cual está dada por el tipo de roca por donde circulan, ya que aunque se tenga disponibilidad no siempre presenta la calidad adecuada para diversos usos. Este es un problema que se tiene a nivel regional, como es el caso de los manantiales de Oaxtepec, Agua Hedionda y los pozos de la zona de Oacalco, Cuautla, Cd. Ayala y Axochiapan, donde las aguas contienen gran cantidad de sales de sulfato de calcio lo cual limitan su aprovechamiento.

Para el aprovechamiento de las aguas subterráneas, el área de estudio se ha dividido en valles acuíferos, los cuales presentan diferentes grados de explotación.

El acuífero del Valle de Cuernavaca presenta condición de equilibrio, los valles de Cuautla-Yautepec y Zacatepec se presentan subexplotados y finalmente el valle de Tepalcingo Axochiapan se encuentra bajo veda rígida por encontrarse sobreexplotado.

Las zonas bajas de los valles de los ríos: Apatlaco, Yautepec, Cuautla, Tepalcingo y Nexapa presentan una agricultura de riego en la que las fuentes de abastecimiento son aguas superficiales y subterráneas.

Las partes altas de la porción norte presentan abundantes recursos naturales, pero no se dispone de agua, por tratarse de zonas de recarga, lo cual limita las actividades económicas y se considera que no pueden ser modificadas las condiciones actuales lo que permite la conservación de los recursos naturales (vegetación, suelos, etc).

Hacia el sur se presentan las Serranías de Buenavista de Cuéllar y Huautla, con bajas posibilidades para la captación de agua subterránea, además de que por el relieve que presentan no hay áreas por beneficiar o demanda de la población por cubrir. El mapa de interpretación geohidrológica se muestra en la figura 3.12.

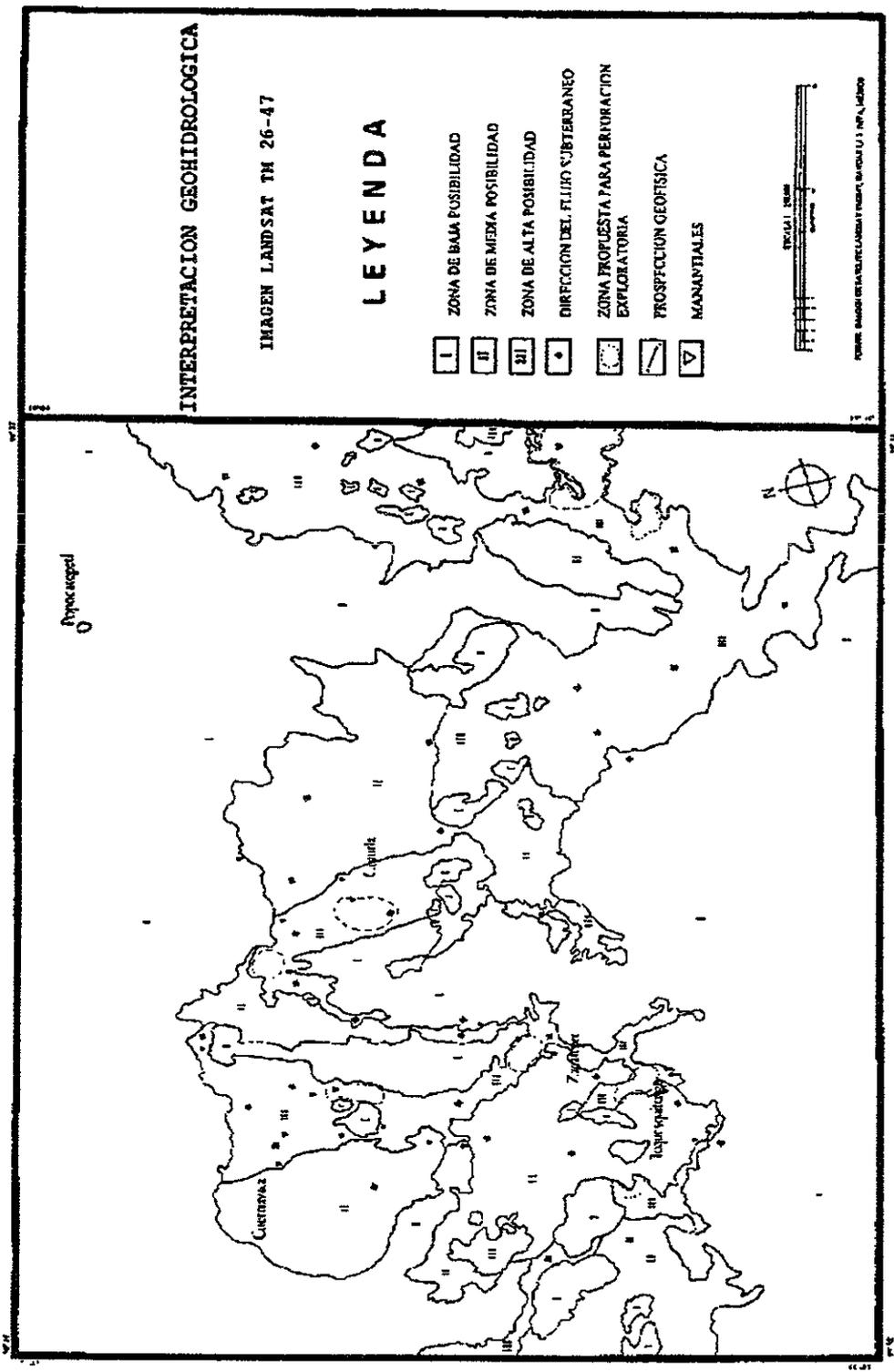


Figura 3.12 Interpretación geohidrológica

## **4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 Conclusiones**

El empleo de imágenes de satélite para la prospección geohidrológica, es una técnica que permite agilizar el análisis e interpretación de los recursos naturales, haciendo énfasis en las condiciones naturales que determinan la presencia o ausencia de los recursos hidráulicos subterráneos.

El relieve del Eje Neovolcánico da lugar a la presencia de muchas geoformas, entre ellas, una característica (sierras) que da lugar a un marcado desnivel en un tramo muy corto, variando de 3,500 a 1,000 msnm en una distancia de 65 km con un talud muy pronunciado. Es importante resaltar este aspecto ya que el relieve, combinado con las características hidrogeológicas de los materiales del subsuelo, determinan la manera como se drena la región, tanto superficial como subterránea.

La red hidrológica está determinada por los materiales que constituyen el sustrato geológico, de tal manera que en la parte alta de las cuencas de los ríos Apatlaco y Yautepec, se tienen en términos generales condiciones de alta permeabilidad, como lo demuestra la ausencia de drenaje, mientras que para la parte alta de la cuenca del río Cuautla muestra un arreglo dendrítico debido a que los materiales presentan una permeabilidad de baja a nula.

El volcán Popocatepetl presenta drenaje tipo radial, el cual se define con mayor precisión, hacia las partes media y baja con una densidad media. Hacia las porciones sureste, sur y suroeste de la imagen, se observan las cuencas con poca permeabilidad, representada por una alta densidad de drenaje.

Resulta significativa la presencia de la cobertura de la imagen, donde se identifican claramente la presencia de varias coberturas superficiales, en las que se identificaron las zonas agrícolas, pecuarias, de bosques, trazas urbanas, cuerpos de agua y áreas sujetas a erosión.

En geohidrología es recomendable la prospección en época de estiaje, los elementos acuosos del clima, ocasiona presencia de vegetación. El encontrar un desarrollo anormal de vegetación en esta época, indica la presencia de agua en o cerca de la superficie.

En la figura 3.5 se observa una gran cantidad de lineamientos, tanto en las rocas ígneas como en las sedimentarias marinas y continentales, destacando por su densidad en la parte poniente de Cuernavaca, Sierra de Huautla y en el flanco sur del volcán Popocatepetl.

También se observa, en la misma figura 3.5, un control estructural que ejerce un dominio preponderante sobre el flujo subterráneo, especialmente en los valles sinclinales, en donde el relleno de los mismos funciona como un dren colector subterráneo, recibiendo aportaciones laterales de las sierras adyacentes, para que el agua transite hacia las áreas de descarga.

La presencia de un relieve tan especial dentro del Eje Neovolcánico, así como de un potente paquete de materiales volcánicos permeables determina que el movimiento (y dirección) de las corrientes de agua superficial y subterránea, sea de las partes altas a las bajas, siendo generalmente en dirección N-S. En la porción oriente la presencia del volcán Popocatepetl da lugar a un drenaje radial con dirección preferencial NW-SE.

La parte norte de Morelos, las sierras de Buena Vista de Cuéllar y Huautla al sur y las serranías de calizas de la región centro, se consideran como zonas de bajas posibilidades geohidrológicas para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos tanto superficiales como subterráneos.

Las zonas pie de monte presentan condiciones propicias para la descarga natural de aguas subterráneas, debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad. Esto se demuestra por la existencia de numerosos manantiales, entre los que destacan El Túnel, Chapultepec, Las Fuentes, Itzamatitlán y Oaxtepec.

Las áreas de lomeríos de la zona centro del área de estudio, presentan medianas posibilidades para el establecimiento de obras de captación.

Las partes bajas de los valles sinclinales en la porción poniente y centro así como el valle del Río Nexapa, debido a la presencia de materiales granulares, son áreas que presentan un alto potencial para explotación geohidrológica.

## **4.2 Recomendaciones**

A las instituciones que se dedican a la exploración geohidrológica se les sugiere las siguientes áreas:

En los valles sinclinales de la porción poniente y centro, constituidos por materiales granulares, hay posibilidades de fuentes para satisfacer las necesidades de agua.

Los pies de monte presentan condiciones propicias para la descarga de agua subterránea debido al cambio de pendiente y a la presencia de materiales de diferente permeabilidad.

El valle del Río Nexapa, debido a la presencia de materiales granulares, se considera que presenta un alto potencial para la explotación geohidrológica.

Se recomienda realizar un estudio geohidrológico en cada uno de los lugares con mejores posibilidades de potencial geohidrológico y hacer sondeos eléctricos verticales para conocer y verificar la presencia de agua subterránea, antes de perforar un pozo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aguilar, B. S. Dimensiones Ecológicas del Estado de Morelos. UNAM-CRIM. 1990. México.

Cambrige, M.McMahon y A.A.Cañas. Identificación de Desarrollos Hidráulicos con Imágenes de Satélite. Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol.III, No.1, enero/abril 1988. México.

Chuvieco, Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp. 1990, Madrid.

Fries, Carl Jr. Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México. Boletín No. 60. Instituto de Geología UNAM. 1961. México.

García, Enriqueta. Modificaciones al sistema de clasificación climatológica de Köppen. Editorial Larios.1988. México.

García, Sesento Alfonso. Sinopsis Geohidrológica del Estado de Morelos. Publicación interna. CNA-Morelos. 1992, México.

González, R.C. Digital Image Processing. Addison Wesley Publishing Company. 1987. USA.

Sanvicente S. Héctor, Balancán S. Alberto, Gastelum F. Armando. Percepción Remota Aplicada a la Geohidrología. IMTA, Informe Final Proyecto SH-9315. 1993. México.

Legg, Christopher. Remote Sensing and Geographics Information Systems. Wiley-Praxis. 1994. Inglaterra.

López, Parra J.F. Procesamiento digital de imágenes multiespectrales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Septiembre 1990, Bogotá, Colombia.

Mijailov, L. Hidrogeología. Editorial MIR MOSCU. 1989. URSS.

Morán, Zenteno Dante. Geología de la República Mexicana. SPP y UNAM, 1985.México.

Raisz,E. Land Forms of Mexico. Mapa escala 1:3000000. Cambridge Mas.1964.USA.