



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**“LA DEFORESTACIÓN COMO MECANISMO
DETONADOR DE LA INESTABILIDAD DE LADERAS,
ESTUDIO CASO SIERRA NORTE DE PUEBLA.”**



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A :
OMAR ESTEBAN CHÁVEZ

ASESOR: DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

MÉXICO, D.F.

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO, 2004

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Omar Esteban
Chávez

FECHA: 12 - Enero - 2004

FIRMA: [Firma]

DEDICATORIA

A **mi madre**, por todo el amor que desde niño me ha brindado por todos sus esfuerzos por hacer de mi lo que ahora soy, por creer en mi y por seguir combatiendo las enfermedades para estar muchos años más conmigo. "Te quiero mucho".

A **mi padre** por todas sus enseñanzas que siempre me han sacado adelante y el cariño que me ha brindado todos estos años. Gracias por enseñarme que el trabajo es fundamental en la vida.

A **mi hermano** quien es una de las personas que realmente quiero y me ha ayudado a crecer como persona, gracias por depositar tú confianza en mi.

A **mi familia** que de alguna manera contribuyeron a la elaboración de este trabajo, que en los momentos mas difíciles me han apoyado y me hacen sentir que siempre habrá alguien que me apoye (**Héctor Chávez, Carlos Hernández (Harry), Paula Esteban, Lilia Chávez y todos sus hermanos**).

AGRADECIMIENTOS

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

En primer lugar tengo muchas cosas que agradecer a la Dra. **Irasema Alcántara Ayala** (Instituto de Geografía-UNAM), que además de ser la asesora de esta tesis es sin duda una de las personas que definitivamente deja una marca en mi vida por la amistad, el ambiente de trabajo, los consejos, las experiencias y momentos felices durante el trabajo de campo y sobre todo por creer en mí. Si conociera la palabra con la que pudiese expresar todo el agradecimiento que siento, la escribiría varias veces pero la única que conozco es ¡GRACIAS!

Agradezco a la Dra. **Isabel Ramírez Ramírez** por su comprensión y aportaciones a este trabajo; al Dr. **Raúl Aguirre Gómez** por sus contribuciones y críticas constructivas a la tesis; al Dr. **Jorge López Blanco** por sus comentarios y su contribución en mi formación durante la carrera y al Dr. **Arturo García Romero** por sus observaciones.

Al **CONACyT** por el apoyo económico brindado para la realización de esta tesis a través del proyecto "**Inestabilidad de laderas y riesgos asociados: estrategias de prevención de desastres para la región Puebla-Veracruz**" con la clave J33428-T. A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por brindarme la oportunidad de pertenecer a la máxima casa de estudios del país. Al **Instituto de Geografía** por facilitar sus instalaciones y las imágenes de satélite del estado de Puebla.

De manera especial le agradezco sus atenciones, aportes y comentarios al Dr. **Jean François Parrot** para la elaboración de este trabajo, pues sin su ayuda hubiese sido muy difícil.

Les agradezco a mis compañeros de trabajo: **Lic. José Marcos López** (Smeagol) por su apoyo incondicional en todo momento y por su amistad, a **Ricardo Garnica Peña** (Lujurias) por su disposición en la elaboración de este trabajo, a **Marlene Mendoza López** (Pereza) por su ayuda y comentarios, al **Lic. Roberto Borja Baeza** (Frodo), a **Manolo y Marilú** por su amistad y apoyo en trabajo de campo: "Gracias Comunidad de la Ladera".

A **Laura Del Valle Lara** por la comprensión, apoyo y todos los momentos felices que hemos pasado juntos, nunca los olvidare, te quiero mucho (Se que esto no es un capítulo, pero créeme que estas palabras son con todo mi cariño ¡GRACIAS!).

A todos mis amigos que de alguna manera contribuyeron en este trabajo: **Adriana Galván, Cibeli, Maritza, Paty, Araceli, Miguel Ángel Márquez Condado** (Mike, Pirri o gallo, gracias por tu amistad incondicional y por compartir momentos felices que hemos vivido durante la carrera), **Rafael Aragón, Alejandro** (Trompeta Pérez), **Mario Salazar, Sergio Salinas, Chavita, Quiroz, Raúl Gutiérrez** (Chino), **Héctor Cruz, Julián, Ismael, Lic. Pablo Flores, Miguel Santos** (Doc), **Román** y a los que se me olvidaron les digo gracias y arriba los PUMAS!!!!!!!

Sierra Norte de Puebla



Imagen de Satélite Landsat ETM+

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
-Generalidades del área de estudio.....	3

CAPÍTULO I. DEFORESTACIÓN

1.1. Conceptualización.....	19
1.2. Deforestación en México.....	21
1.3. Deforestación en Puebla.....	27
1.4. Deforestación en la Sierra Norte de Puebla.....	31

CAPÍTULO II. INESTABILIDAD DE LADERAS

2.1. Conceptualización y clasificaciones	34
2.2 Morfología	39
2.3 Causas de la inestabilidad	41
2.4. Vegetación e Inestabilidad	43
2.4.1. Características generales de las raíces	50
2.4.2. Acción de refuerzo de las raíces.....	52
2.4.3. Algunas observaciones en relación con la inestabilidad de laderas y la vegetación en la Sierra Norte de Puebla.....	54
2.4.3. Aproximaciones en el estudio de la relación inestabilidad-vegetación.....	64

CAPÍTULO III. DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA Y SU RELACIÓN CON LA INESTABILIDAD

3.1. Introducción.....	68
3.2 Inventario Forestal Nacional (1992-1994).....	70
3.3 Inventario Forestal Nacional (1999-2000).....	75
3.4 Distribución Espacial y Movimientos del Terreno.....	82
3.5 Análisis Comparativo	84

CAPITULO IV. VEGETACIÓN E INESTABILIDAD; UNA PERSPECTIVA DE LA TELEDETECCIÓN.

4.1. Conceptualización.....88

4.2. Imágenes Landsat94

 4.2.1. Sensor Landsat Multi Spectral Scanner (MSS).....95

 4.2.2. Sensor Landsat Thematic Mapper (TM) y el ETM+.....96

4.3. Proceso de deforestación en la Sierra Norte de Puebla.....99

 4.3.1. Análisis comparativo de los índices de vegetación normalizados de los años de 1989 y 2000.....101

 4.3.2. Metodología.....113

CAPITULO V. CONCLUSIONES.....116

ANEXO 1.....120

ANEXO 2.....131

BIBLIOGRAFÍA.....149

Introducción

La dinámica del cambio de usos del suelo, la presión demográfica y el consumo de recursos naturales han ocasionado en México un deterioro ambiental difícil de contrarrestar. De manera particular, la expansión urbana, tala, incendios, extracción de recursos son los principales factores que ocasiona el problema de deforestación en el país, proceso que ha afectado a varios estados de la República, entre ellos el estado de Puebla, donde los recursos forestales se han visto seriamente disminuidos en los últimos años ocasionando la extinción local o regional de especies, recursos genéticos, el aumento de ocurrencia de plagas, la disminución en la polinización de cultivos comerciales, la alteración de los procesos de formación y mantenimiento de los suelos (erosión), disminución de la recarga de los acuíferos, entre otros procesos de deterioro ambiental (FAO 1993; Trani y Giles, 1999).

Aunque de manera general el estado de Puebla se ha visto afectado por el proceso de deforestación, el grado de afectación varía entre las regiones y municipios existentes. La Sierra Norte de Puebla presenta un proceso acelerado de disminución de sus recursos naturales (Galván, 1999), principalmente de los bosques, como consecuencia del cambio de uso de suelo que ha pasado de forestal a agrícola, ya que los campesinos han reducido grandes extensiones de áreas boscosas, ocasionando no solo el deterioro ambiental del área, sino también incrementado la incidencia e impacto de los desastres naturales. Entre éstos últimos cabe destacar los cientos de procesos de remoción en masa o movimientos del terreno ocurridos en el año de 1999 desencadenados por las precipitaciones extraordinarias, originadas por la depresión tropical No. 11 del Golfo de México.

Diversas observaciones de campo sugieren que existe una relación importante entre la estabilidad de las laderas y la presencia de vegetación, debido a que la distribución espacial de estos procesos tuvo lugar no sólo en áreas habitadas, sino también en áreas deforestadas. Sin la cubierta protectora de la vegetación, el suelo se desestabiliza produciendo movimientos del terreno que pueden remover grandes cantidades de material. De tal manera que la deforestación se convierte en un factor de suma importancia en la detonación de este tipo de procesos. De esta forma, el monitoreo y mapeo de la cubierta vegetal se ha convertido en un elemento clave para el estudio de la activación de los procesos de remoción en masa (Greenway, 1987).

En nuestro país existen pocos trabajos que analizan la relación entre la vegetación y la estabilidad de las laderas; la mayor parte de ellos con un enfoque de ingeniería.

Consecuentemente, un primer paso para la elaboración de este tipo de investigaciones es contar con datos que permitan conocer el grado de deforestación durante distintos períodos. Para ello existen diferentes técnicas que permiten analizar la dinámica de la cobertura forestal, entre ellas cabe destacar la comparación de cartografía o imágenes de satélite de distintas fechas. Este tipo de análisis proporciona las herramientas necesarias para la estimación de áreas que son deforestadas, lo cual provoca que se de una infiltración y saturación de los suelos, y por ende sean altamente susceptibles a la inestabilidad.

En función de las ideas antes mencionadas, este trabajo presenta un análisis entre la relación de las áreas deforestadas y la inestabilidad de las laderas en la Sierra Norte de Puebla a través de la comparación de dos inventarios forestales (1994 y 2000), así como del análisis de imágenes de satélite Landsat MSS y ETM+, en función de la distribución de los procesos de remoción en masa desencadenados en otoño de 1999.

La hipótesis principal de este trabajo de investigación surge como consecuencia de las observaciones realizadas en campo, en la Sierra Norte de Puebla, a través de las cuales fue posible identificar una incidencia considerable de los procesos de remoción en masa en zonas afectadas por deforestación, o bien, donde el cambio del uso del suelo es evidente. De tal forma que la hipótesis considera la idea de que los procesos de deforestación influyen en gran medida en el comportamiento de la relación suelo-vegetación-inestabilidad, principalmente a través del incremento de la infiltración en el suelo, y por consecuencia en la saturación del mismo, produciendo zonas con exceso de humedad, las cuales son altamente susceptibles a los procesos de ladera. Cabe destacar que dicha hipótesis implica en un sentido estricto, el establecimiento de un programa de investigación que involucre el análisis de las relaciones hidrológicas del suelo y la vegetación, objetivos difíciles de llevar a efecto en una tesis de licenciatura debido fundamentalmente a la falta de recursos adecuados. No obstante, con el propósito de determinar el grado de correlación entre los procesos antes mencionados, se decidió abordar tal problemática desde un enfoque de Percepción Remota, pues si bien, no es posible obtener de manera precisa la cuantificación de los procesos, los patrones espaciales de incidencia, resultado de la aplicación de dicho enfoque, contribuyen al entendimiento de la dinámica en cuestión.

Generalidades del área de estudio

a. Localización

El estado de Puebla está localizado al sureste del Altiplano central de la República Mexicana, entre la sierra Nevada y el oeste de la sierra Madre oriental. Limita al norte y este con Veracruz, al sur con Oaxaca, al suroeste con Guerrero y al oeste con Hidalgo, Tlaxcala, Morelos y el estado de México (INEGI, 1985).

El área de estudio se localiza en la parte norte del estado (Figura 1.1.). Enmarcada dentro de las coordenadas geográficas de 19° 27' y 20° 30' de Latitud Norte y 97° 00' y 98° 20' de Longitud Oeste, está formado por 68 municipios que ocupan una superficie de 7810.09 km² en la zona de estudio.

La delimitación del área de estudio se realizó en función de la distribución espacial de las zonas más afectadas por procesos de ladera a causa de las intensas lluvias de octubre de 1999, aunque cabe mencionar que para dicha delimitación no se tomaron en cuenta divisiones políticas municipales, ya que la región denominada Sierra Norte de Puebla no tiene límites políticos establecidos.

La mayor parte de la zona se encuentra sobre la cuenca Río Tecolutla, aunque también cabe destacar las cuencas Río Cazonces y del Río Tuxpan. La actividad agrícola tiene más de un siglo de llevarse a cabo y ha posibilitado el sostenimiento económico de la región (INEGI, 1985).

Esta región está conformada por una población de 637,961 habitantes de los cuales, el 79% es población rural, el 37% población indígena. El 65% de la población registrada corresponde a un alto grado de migración y el otro 35% a alto grado de marginación (INEGI, 1995).

Municipio	Área (km ²)	Municipio	Área (km ²)
Acateno	227.07	Nauzontla	47.20
Atlequizayan	28.08	Olintla	66.35
Ahuacatlán	94.4	Pahuatlán	80.37
Amixtlán	33.17	Pantepec	216.88
Aquixtla	190.09	San Felipe Tepatlán	37.00
Atempan	34.45	Tenamulco	108.44
Ayotoxco de Guerrero	130.12	Tepango de Rodriguez	20.42
Camocuautla	21.69	Tepetzintla	127.57
Caxhuacan	20.41	Tetela de Ocampo	304.89
Coatepec	867	Tlacuilotepec	153.08
Cuautempan	8524	Tlaola	108.44
Cuetzalán del Progreso	135	Tlapacoya	80.38
Chiconcuautla	113.55	Tlatlauquitepec	246.22
Chignahuapan	591.92	Tlaxco	90.57
Chignautla	104.61	Tuzamapan de Galeana	45.92
Chila Honey	93.12	Venustino Carranza	308.71
Francisco Z. Mena	535.79	Xicotepec	283.20
Hermenegildo Galeana	43.37	Xiutetelco	93.12
Huehuetla	59.96	Xochiapulco	110.99
Hueytamalco	75.27	Xochitlán de Vicente Suarez	11588
Hueytlalpn	242.48	Yaonahuac	54.85
Huitzilán de Sardan	15.31	Zacapoaxtla	188.81
Ixtacamaxtitlán	44.66	Zacatlán	512.32
Ixtepec	614.88	Zapotitlán de Mendez	35.72
Jalpan	10.22	Zautla	274.27
Jonotla	199.01	Zihuateutla	177.33
Jopala	73.99	Zongozotla	19.15
Naupan	96.96	Zoquiapan	22.96

Tabla 1.1. Municipios que Integran la Región Sierra Norte de Puebla (INEGI, Conteo 1995).

b. Clima

En el área de estudio existen diferentes tipos de climas y están en relación con la fisiografía, ya que valles y pequeñas cuencas conforman su propio microclima; existen variantes de tropical subhúmedo, hasta templado semiseco, además su distribución sigue la línea de desplazamiento de humedad desde el golfo hacia el interior del continente. En la Tabla 1.2 se presentan los tipos de clima y su extensión sobre la área de estudio.

Tipo / subtipo	Símbolo	Área	Porcentaje
Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano	Am	393.6	5.0
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	A(w)	1970.4	25.2
Semicalido subhúmedo con lluvias en verano	Acw	901.2	11.5
Templado húmedo con abundantes lluvias en verano	C(m)	343.6	4.4
Templado subhúmedo con lluvias en verano	C(w)	2824.1	36.1
Semiseco cálido	BS1(h)	590.4	7.5
Semiseco templado	BS1K	688.8	8.8
Semiseco semicalido	BSh	97.6	1.2
	TOTAL	7810	100

Tabla 1.2. Climas presentes en la Región Sierra Norte de Puebla (Galván, 1999).

c. Suelos

Los suelos que existen en la zona de estudio de acuerdo con las cartas edafológicas de INEGI (1988), son:

Litsoles de textura media y fina; una de las características principales de estos suelos es el hecho de estar constituidos principalmente por rocas y carecen de horizontes; estos se distribuyen en la parte norte del área de estudio.

Por otro lado cabe destacar los regosoles, distribuidos en la porción Noroccidental; son de textura gruesa media y fina, y se caracterizan por estar formados por materiales no consolidados, incluyendo materiales de textura gruesa, por lo que se consideran poco desarrollados. Se encuentran en cualquier tipo de clima y generalmente sobre topografía accidentada. Después de los Leptosoles, son el tipo de suelo más dominante en la República Mexicana; estos ocupan una superficie de 362,461 km² (18.5%) del territorio nacional y se distribuyen principalmente en los estados de Chihuahua, Sonora, Sinaloa, Oaxaca y Durango.

Otro tipo de suelo que existe en la Sierra Norte de Puebla es el Luvisol de textura media y fina; contiene un horizonte arcilloso que hace evidente un proceso continuo de lavado de bases. Ocupa una superficie de 47, 022 km² (2.4%) del territorio nacional y se localiza principalmente en las zonas semicalidas y cálidas de los estados de Chiapas, Jalisco y Michoacán; éstas entidades concentran más de la mitad de la superficie nacional con este tipo de suelo. En la Sierra Norte de Puebla se distribuyen al norte de la presa la soledad como se puede apreciar en la figura I.2

Los andosoles, provienen de materiales volcánicos, son de textura media y ocupan 23, 511 km² (12% del territorio nacional). Cerca del 66% de la superficie nacional con este tipo de suelo se localiza en los estados de Michoacán, Estado de México y Veracruz. Otros estados con superficie representativa de Andosoles son Guerrero, Puebla, Chiapas, Morelos y el Distrito Federal.

Los feozem son suelos ricos en materia orgánica, lo cual imprime el color oscuro que los caracteriza. Se encuentran generalmente en zonas templadas y semiáridas, ocupan una superficie de 190, 047 km² (9.7% del territorio nacional). Este tipo de suelo se encuentra distribuido en la parte sur del área entre los municipios de Tetela de Ocampo y Zaragoza.

Los Nitosoles ocupan 7, 837 km²(0.4% del territorio nacional) y se encuentran distribuidos en la parte nororiental del área de estudio, cerca del municipio de Tenampulco.

Los cambisoles son suelos poco desarrollados aun con características semejantes al material que le da origen; ocupan 92, 085 km² (4.7%) del territorio nacional, se encuentran distribuidos en el sector noroccidental, al norte de la presa Necaxa.

Acrisol se presenta solo en climas tropicales y subtropicales, ocupan una superficie de 9, 796 km.² (0.5% del territorio nacional). Dentro del area de estudio se localizan en la parte norte por encima del municipio de Bienvenido y son de textura media.

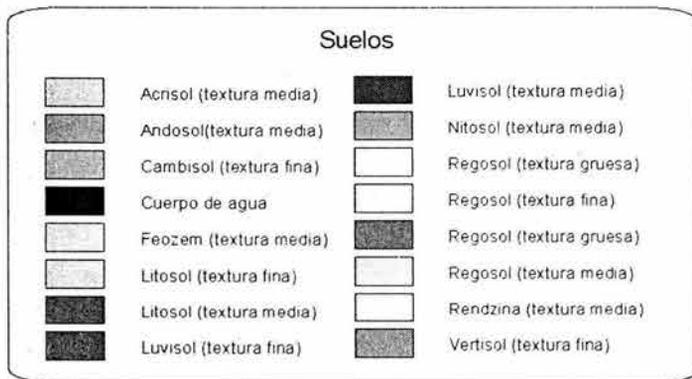
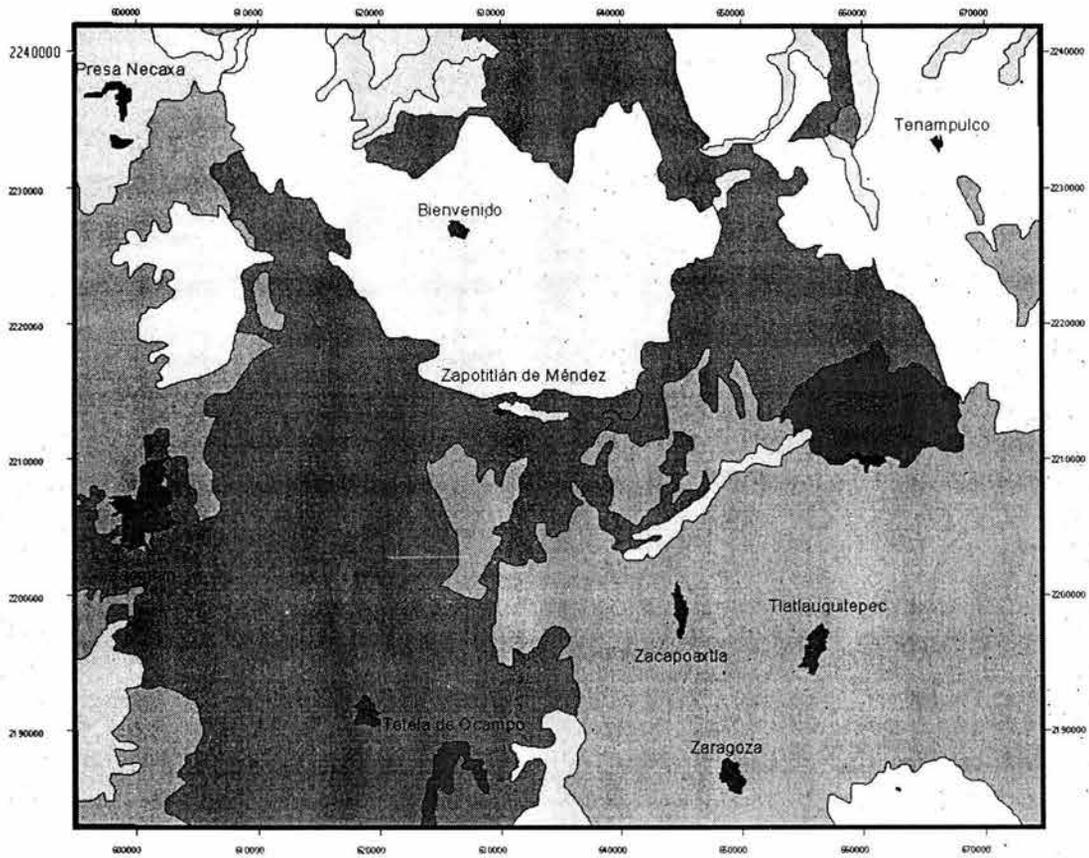
Rendzina son suelos muy someros y pedregosos de poco desarrollo y con pocas características particulares, su ubicación topográfica se asocia a las zonas montañosas por lo que son altamente susceptibles a la erosión y se les puede encontrar bajo diversas condiciones climáticas y por lo regular son utilizados para pastoreo extensivo. Ocupan una superficie de 469, 436 km² (23.96%) del territorio nacional. En la zona de estudio se ubican alrededor del municipio de Bienvenido y al norte de Zapotitlán de Méndez.

El suelo es uno de los factores más importantes en la inestabilidad de laderas, de tal modo que es necesario conocer la incidencia de procesos de remoción en masa en función del tipo de suelo. Para ello se elaboró una síntesis donde se relaciona el número de deslizamientos ocurridos con el tipo de suelo (tabla 1.3). En dicha tabla es factible percibir que la mayor parte de los movimientos de ladera ocurrió en los andosoles, suelos derivados de litologías ígneas.

Tipo de suelo	Número de deslizamientos
Andosol textura media	199
Feozem textura media	3
Litosol textura media	15
Litosol textura fina	47
Luvisol textura media	18
Regosol textura gruesa	10
Regosol textura media	7
Rendzina textura media	2

Tabla 1.3. Relación de los procesos ocurridos en octubre de 1999 y las unidades edafológicas.

Mapa de Suelos



TESIS UNAM GEOGRAFIA
OMAR ESTEBAN CHAVEZ
ASESOR DRA. IRASEMA ALCANTARA AYALA

Figura 1.2. Mapa de distribución de unidades edafológicas en la Sierra Norte de Puebla.

De acuerdo con la carta edafológica del INEGI, la región Sierra Norte de Puebla esta compuesta por varias unidades edafológicas y sus diferentes fases físicas. El primer sistema, el Eje Neovolcánico se caracteriza por tener suelos muy someros de colores pardo-oscuro a pardo-rojizo derivados de la erosión de las crestas volcánicas; estos presentan texturas que van de medias a gruesas con poco contenido de materia orgánica. Los suelos que se presentan son denominados cambisoles, luvisoles, regozoles y andosoles (FAO). En el área de la Sierra Madre Oriental hay suelos entre medios y profundos; los someros se ubican sobre las cimas, en tanto que al bajar son más profundos. De acuerdo con la nomenclatura de la FAO, son suelos tipo cambisol principalmente; aunque se encuentran, en menor proporción algunos regosoles ubicados sobre los valles (Galván, 1999).

Sobre la vertiente interior de la sierra, en la región noreste, los suelos más abundantes son feozem, estos se alternan con cambisoles; los espesores van de profundos a muy profundos. En la tabla 1.4 se presenta la distribución por áreas de cada unidad principal de suelos.

UNIDAD	SUPERFICIE(km ²)	SUPERFICIE (%)
Regosol	1638.7	19.7
Andosoles	641.1	7.7
Vertisoles	1687	20.3
Luvisol	641.2	7.7
Acrisol	43.3	0.5
Litosol	77.1	0.9
Redzina	241.1	2.9
Solochak	14.4	0.1
Feozem	1740	20.9
Cambisol	1080	13
Sin información	4.8	5.8
	7809	99.9

Tabla 1.4. Principales unidades de suelo (Galván, 1999).

d. Hidrología

La red hidrológica está integrada por un lado por la vertiente norte, con los ríos Necaxa, San Marcos, Jaloapan y Apulco que son tributarios del río Tecolutla. En tanto que en la porción de la sierra y suroeste, entre los principales ríos está el Ajajalpa; Marimba, y los lagos de Cruz Colorada, Cuatelolulco, Ajolotla y Chignahuapan (SEPROCI, 2000). Los patrones de escurrimiento están determinados por la presencia de la Sierra Madre Oriental, donde se originan los escurrimientos de los ríos que forman las grandes corrientes (SEPROCI, 2000). Debido a los altos índices de infiltración, y las pequeñas áreas de drenaje, estos arroyos son más bien de tipo intermitente. Hacia el oriente, la sierra deriva en lomeríos y cuevas tendidas en combinación con valles estrechos por cuyas desembocaduras salen los ríos hacia la planicie costera.

En la porción interior, existe una serie de embalses pequeños que se usan para aprovechamiento agrícola. Es una región con alto coeficiente de infiltración, por lo que las lluvias, contribuyen a la acumulación de agua subterránea que se localiza en el área de los grandes llanos de San Martín y Atlixco; se puede considerar como una área de recarga.

En la franja intermedia entre ambos sistemas se registra la más alta precipitación, por lo que se forman corrientes pequeñas e intermitentes.

e. Vegetación

En México se han realizado diferentes trabajos para clasificar la vegetación entre ellos se encuentra la cartografía elaborada por INEGI en las series I (1986) y II (1990), el inventario forestal periódico (1994) elaborado por la SARH y recientemente el inventario forestal periódico (2000) que realizó la SEMARNAP en conjunto con la UNAM. Dado lo anterior se tomó en cuenta la clasificación más reciente la cual corresponde al inventario forestal periódico del 2000.

De acuerdo con dicho inventario, las formaciones que existen en la región Sierra Norte de Puebla son cultivos, bosques, selvas y pastizales.

Los bosques están conformados por bosque de encino, que se encuentran distribuidos al noreste del municipio de Zacatlán y del lado este del municipio de Tlatlauquitepec, son bosques de estructuras variadas, con alturas que oscilan entre 2 y 10 m, dominados por especies del género *Quercus*, el clima en el que se presentan es templado húmedo a subhúmedo; la presencia de

vegetación secundaria en dichos bosques indica cierto grado de deterioro o perturbación este tipo de bosque solo se encuentra al sur del municipio de Zacatlán y ocupa muy poca extensión.

Dentro los diferentes tipos de bosques que presenta la Sierra Norte de Puebla esta el bosque de oyamel con vegetación secundaria, es decir con un cierto grado de deterioro en la vegetación primaria, es un bosque alto de entre 20 y 40 m, dominados por *Abies*, *Pseudotsuga*, *Picea* y *Cupressus*, se distribuye en el clima templado subhúmedo de la Sierra Norte.

Otro de los bosques existentes en la zona de interés es el bosque de pino se caracteriza por ser un bosque de árboles que van de bajos a altos, entre 8 y 25 m dominado por *Pinus*, dadas las condiciones de clima templado la especie que domina es *Pinus hartwegii*. El bosque de pino con vegetación secundaria se encuentra localizado en la parte sureste y noreste del municipio de Zacatlán.

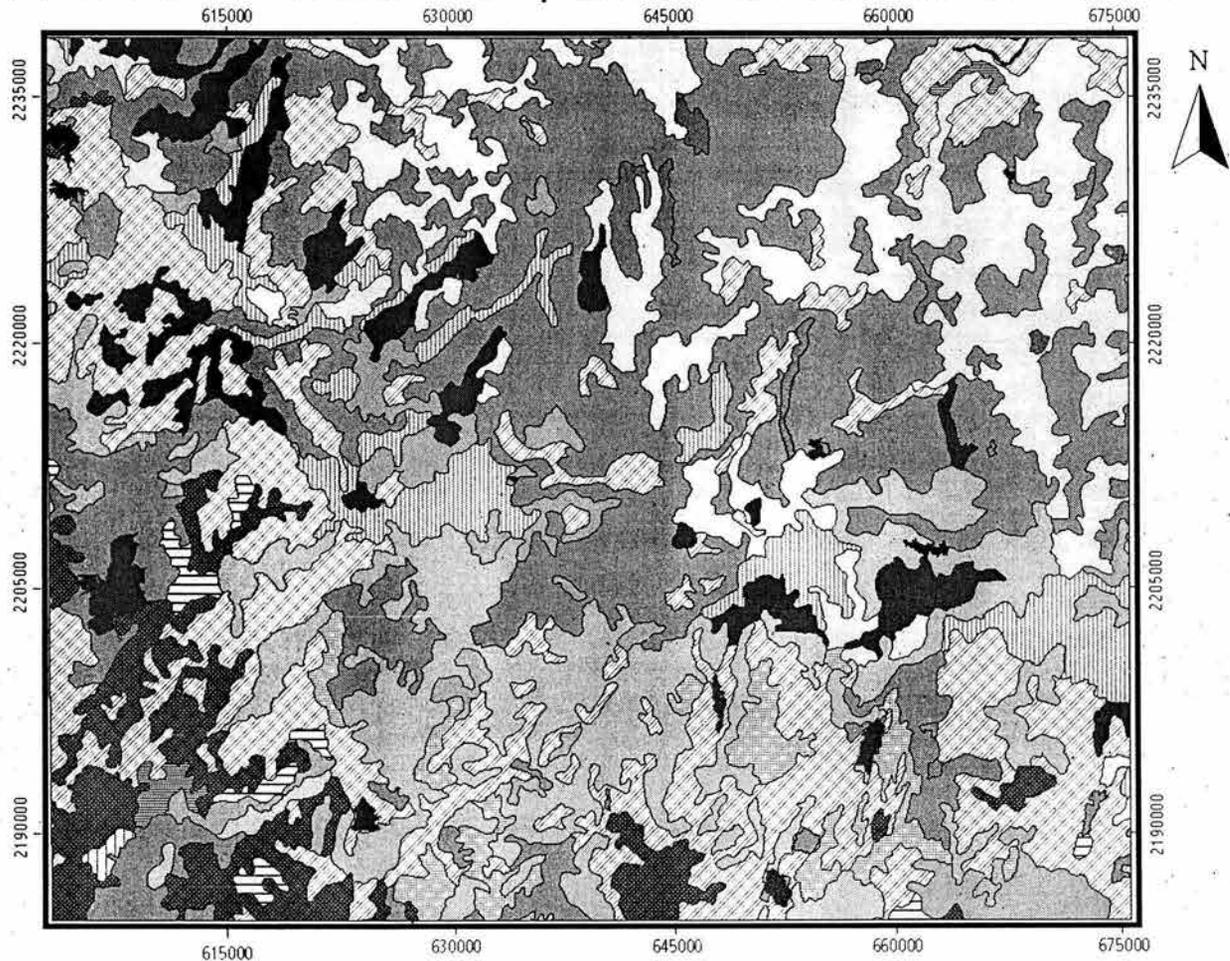
De los bosques que más abundan en el sitio de interés es el bosque de pino-encino, es un bosque mixto de pinos y encinos (*Pinus spp.* – *Quercus spp.*), oscilan entre una altura de 5 y 20 metros, se distribuyen con gran extensión en la parte sur de la zona de estudio, estos se encuentran rodeados de bosques de pino y encino con vegetación secundaria y zonas de cultivo, lo que nos indica que la deforestación es continua debido al cambio de uso de suelo. El tipo de clima en el que se desarrollan es templado húmedo y subhúmedo.

El bosque mesofilo de montaña que se presenta en la zona es de altura media de aproximadamente 15 y 35 metros de altura, es un bosque muy denso y se caracteriza por árboles de el género *Magnolia*, *Fagus*, *Oreomunnea*, *Clethra*, *Liquidambar*, *Podocarpus*. El clima en el que se distribuye es templado húmedo y subhúmedo; se encuentra distribuido al norte de Tlatlauquitepec, al este de Zapotitlán de Méndez y Bienvenido; se encuentra rodeado de cultivos y pastizales, lo cual ha dado origen a un bosque mesofilo con vegetación secundaria, es decir un bosque que ha sido afectado o perturbado por el cambio de uso de suelo forestal a agrícola.

El tipo de selva que existe en la Sierra Norte de Puebla es la selva alta y mediana perennifolia, la vegetación arbórea oscila entre los 20 y 35 metros de altura el tipo de clima en el que se encuentra es cálido húmedo y subhúmedo. Los géneros más notables son *Terminalia*, *Swietenia*, *Brosimum*, entre otros. Se encuentra distribuida en la parte noreste de la zona de estudio y se encuentra rodeada de zonas de cultivo y pastizales, lo cual a causado la presencia de vegetación secundaria al ser alterada por el cambio de uso de suelo.

Existen dos tipos de pastizales en la zona, pastizal inducido y de cultivo, son comunidades vegetales caracterizadas por el dominio de gramíneas (pastos o zacates) o graminoides. El pastizal inducido se desarrolla al eliminarse la vegetación original (bosques, selvas, matorral, otros) o en áreas agrícolas abandonadas. Se distribuye a los alrededores de Zapotitlán de Méndez y al sur de Bienvenido en un clima semicálido húmedo. Los pastizales de cultivo se incluyen en la formación de "Cultivos" debido a su origen cultivado y su asociación estrecha con las parcelas de riego.

Inventario Forestal 2000 para la Sierra Norte de Puebla



Leyenda

- | | |
|--|--|
|  AGRICULTURA DE RIEGO (INCLUYE RIEGO EVENTUAL) |  BOSQUE DE PINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA |
|  AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS ANUALES |  BOSQUE MESOFILO DE MONTAÑA |
|  AGRICULTURA DE TEMPORAL CON CULTIVOS PERMANENTES Y SEMIPERMANENTES |  BOSQUE MESOFILO DE MONTAÑA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA |
|  ASENTAMIENTO HUMANO |  CUERPO DE AGUA |
|  BOSQUE DE ENCINO |  PASTIZAL CULTIVADO |
|  BOSQUE DE ENCINO CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA |  PASTIZAL INDUCIDO |
|  BOSQUE DE OYAMEL (INCLUYE AYARIN Y CEDRO) CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA |  SELVA ALTA Y MEDIANA PERENNIFOLIA |
|  BOSQUE DE PINO |  SELVA ALTA Y MEDIANA PERENNIFOLIA CON VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA Y HERBACEA |
|  BOSQUE DE PINO-ENCINO | |
|  BOSQUE DE PINO-ENCINO CON VEGETACION SECUNDARIA | |

10 0 10 kilometros



TESIS UNAM GEOGRAFIA
ESTEBAN CHÁVEZ OMAR
ASESORA: DRA. IRASEMA ALCANTARA AYALA

Figura 1.3. Inventario Nacional Forestal Periódico 2000.

f. Geología

Las características geológicas que presenta el área de estudio están representadas en las cartas 1:250 000 con nombre Poza Rica (F14-12) INEGI, (1984) y Veracruz (E14-3) INEGI, (1988). La región denominada como Sierra Norte de Puebla se encuentra dentro de una área transicional entre dos regiones fisiográficas, el Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre Oriental (Martínez-Serrano, 1984). La primera está representada por materiales de tipo volcánico asociados a la formación del centro volcánico Los Húmeros y a una actividad volcánica que se generó en el Mioceno Superior dentro del área. La segunda región se distingue por materiales de tipo sedimentario principalmente rocas calizas y lutitas de edades del Jurásico y del Cretácico (Figura 1.2).

Las unidades litológicas que se encuentran en la Sierra Norte de Puebla corresponden a rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, en parte cubiertas por rocas volcánicas Pliocénicas y Cuaternarias, entre las más jóvenes las de la caldera de los Húmeros (Menes-López en Borja-Baeza, 2003). En el Jurásico Tardío y el Cretácico, el área permaneció sumergida. Posteriormente, y como resultado de fuerzas con origen en el suroeste del área de estudio, se inició el levantamiento (Yáñez-García *et al*, 1982). Los bloques elevados formaron una unidad arqueada y plegada (Menes-López en Borja-Baeza, 2003). Las rocas cenozoicas volcánicas y continentales se acumularon sobre sedimentos marinos mesozoicos, que sobreyacen, a su vez, a rocas pre-mesozoicas que constituyen el antipaís de la Sierra Madre Oriental (López-Ramos, 1982).

La litología que abarca el área de estudio está constituida principalmente por rocas de tipo sedimentario, caracterizándose las calizas y lutitas, las cuales se distribuyen en la porción centro y norte dando origen a formas del relieve como montañas y laderas de limonitas y areniscas del Jurásico Medio y lomeríos de lutitas del Terciario Inferior.

Al Norte del área de estudio las rocas de mayor predominancia pertenecen a depósitos de rocas de calizas y lutitas de edad del Cretácico Superior (INEGI, 1984). Los depósitos de este tipo de roca se hallan distribuidos en los poblados de Filomeno Mata, Coahuitlan, Ricardo Flores Magón, por mencionar algunos.

En la zona centro y sur, también se encuentran rocas de tipo metamórfico, aunque en menor proporción y están representadas por conjuntos montañosos de esquistos del Paleozoico.

Existen además rocas de tipo volcánico, las cuales tienen su distribución principalmente al oeste del área y de acuerdo con la carta geológica de INEGI (1984), los tipos de roca que se distribuyen en esta parte, son principalmente las de tipo sedimentario, las cuales en algunos casos se encuentran sepultadas por capas de material volcánico como coladas de lavá y cubiertas piroclásticas asociadas a la formación de la caldera de Los Húmeros (Martínez-Serrano, 1984).

Dentro de las formaciones más recientes en el área de estudio se encuentran depósitos de aluvión, los cuales son producto de la erosión de materiales de tipo sedimentario, principalmente lutitas y calizas del Cretácico, estos depósitos alcanzan sus mayores dimensiones al sur de Tetela de Ocampo (Martínez-Serrano, 1984).

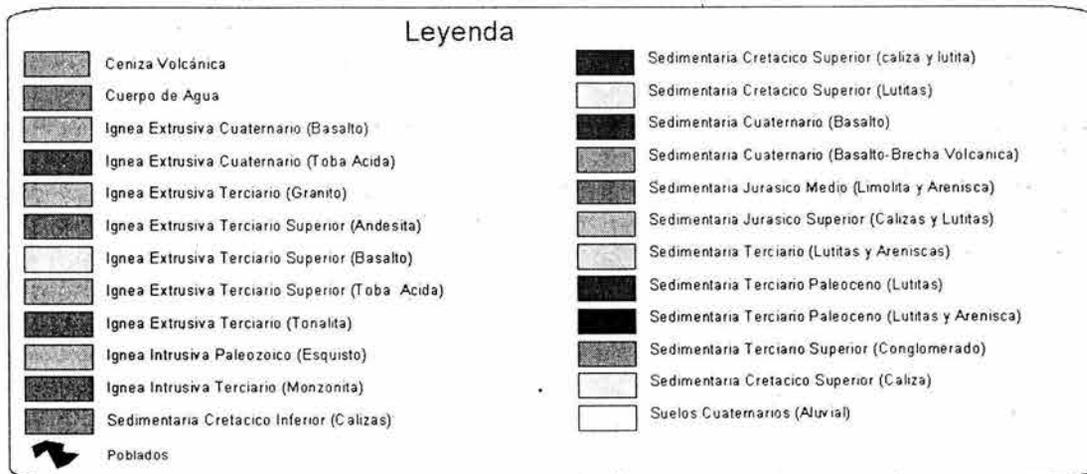
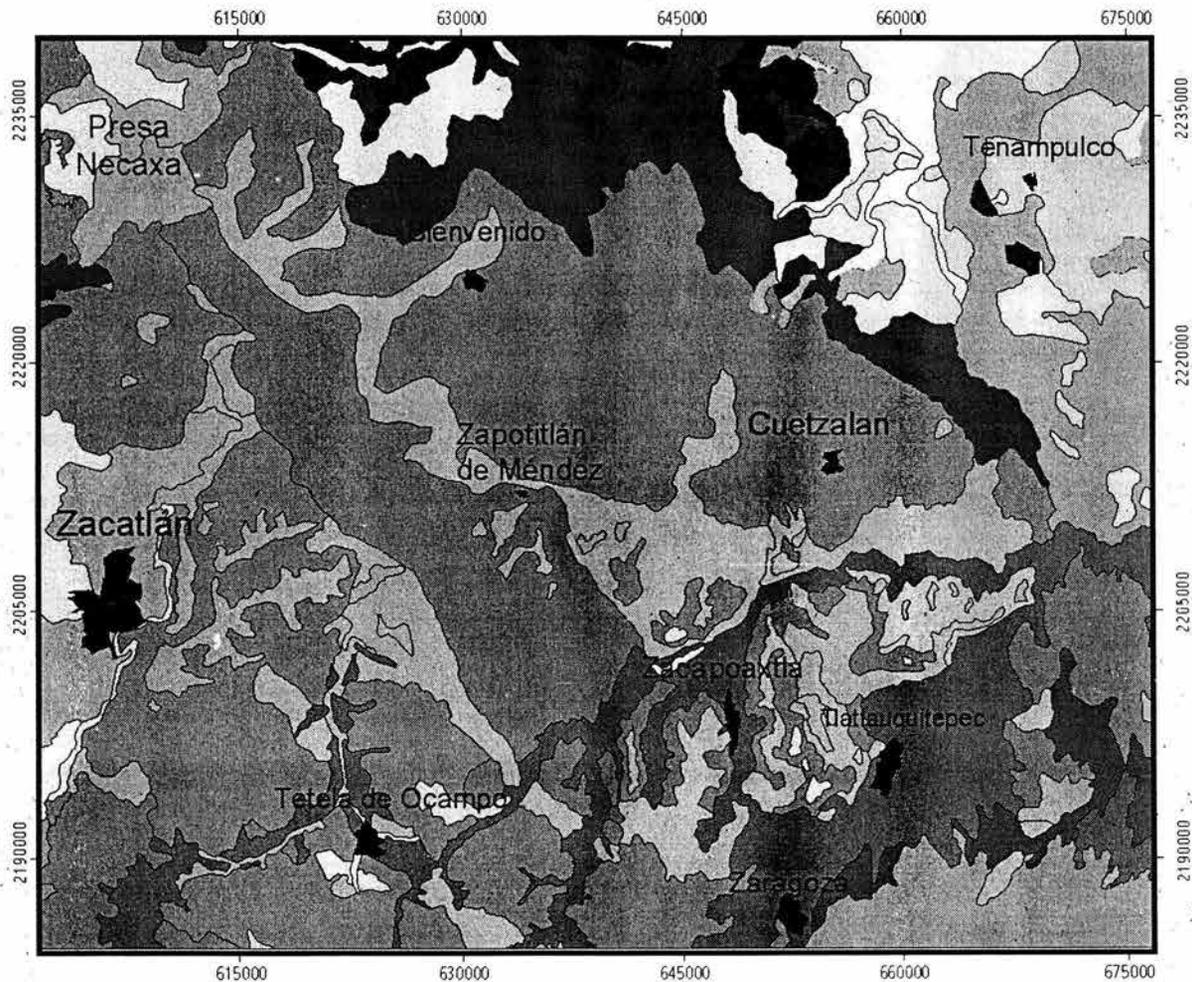
Los procesos de ladera implican el desplazamiento por gravedad de los materiales formadores de una ladera (suelo, rocas o detritos), por lo tanto es importante conocer la distribución de los diferentes tipos de roca que existen en el área de estudio.

Los grupos de rocas que presentan mayor densidad de procesos de ladera ocurridos en octubre de 1999, son los que se encuentran en la parte oeste del área de interés y corresponden a tobas ácidas del cuaternario y tobas ácidas del Terciario Superior (Tabla 1.4) (INEGI, 1984).

Tipos de Roca	Número de procesos	Porcentaje
Ceniza Volcánica	1	0.3
Ígnea Extrusiva del Cuaternario (Basalto)	7	2.7
Ígnea Extrusiva del Cuaternario (Toba Ácida)	86	33.7
Ígnea Extrusiva del Terciario (Granito)	1	0.3
Ígnea Extrusiva Terciario Superior (Basalto)	2	0.7
Ígnea Extrusiva del Terciario Superior (Toba Ácida)	37	14.5
Ígnea Intrusiva del Paleozoico (Esquisto)	19	7.4
Sedimentaria del Cretácico Inferior (Calizas)	16	6.2
Sedimentaria del Cretácico Superior (calizas y lutita)	8	3.1
Sedimentaria del Cretácico Superior (Lutitas)	6	2.3
Sedimentaria del Cuaternario (Basalto)	15	5.8
Sedimentaria del Cuaternario (Basalto Brecha Volcánica)	2	0.7
Sedimentaria del Jurásico Medio (Limolita arenisca)	23	9
Sedimentaria del Jurásico Superior (Calizas-Lutitas)	23	9
Sedimentaria del Terciario (Lutitas Areniscas)	2	0.6
Suelos Cuaternarios Aluvial	7	2.7

Tabla 1.4. Distribución de procesos de ladera en relación con las unidades litológicas.

Mapa Geológico de la Sierra Norte de Puebla



TESIS UNAM GEOGRAFÍA
 ESTEBAN CHÁVEZ OMAR
 ASESCORA DRA. IRASEMA ALCANTARA AYALA

Figura I.3. Geología de la Sierra Norte de Puebla.

Estructura de la tesis

La presente tesis está dividida en cinco capítulos. En el primer capítulo se aborda de manera general el problema de la deforestación en México, y en particular en el estado de Puebla. Posteriormente, en el segundo capítulo, se presenta una revisión de los fundamentos básicos de la inestabilidad de las laderas, haciendo énfasis en la relación entre la vegetación y la inestabilidad de las laderas.

El capítulo tercero incorpora la revisión y análisis de la distribución espacio-temporal de la deforestación en el estado de Puebla y el grado de asociación con los procesos de remoción en masa ocurridos en octubre de 1999, a partir de los datos de los inventarios forestales nacionales de 1992 y 2000.

En el cuarto capítulo se presenta un análisis de la relación vegetación-inestabilidad de las laderas a partir de imágenes de satélite Landsat MSS y ETM+ , utilizando los NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado) para visualizar la pérdida de vegetación durante un periodo de 11 años y de esta manera relacionar la pérdida de vegetación con la inestabilidad de las laderas.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros en el quinto capítulo.

CAPITULO I. DEFORESTACIÓN

1.1 Conceptualización

Las definiciones y criterios de clasificación en materia forestal varían considerablemente entre países y organismos, por lo que no es factible llevar a cabo comparaciones entre el ámbito internacional y la información que existe en nuestro país. Dado lo anterior, la cuantificación de la deforestación depende de las metodologías utilizadas, la disponibilidad de la información, el objetivo del estudio y las entidades involucradas (Velásquez, 2002).

A nivel mundial, las definiciones existentes engloban varios procesos con relación a la deforestación. Por ejemplo, el Banco Mundial en 1991 consideró el término, deforestación, como la “eliminación (clearing) de bosques y la conversión de la tierra a usos no forestales“. Otros autores como Deacon (1994), la consideran como la “reducción en el área de tierra cubierta por bosques“. Para Wasserman (1996), es la “eliminación en gran escala (*full scale clearing*) de tierras boscosas“. La FAO incluye en dicho término a todos los cambios de forestal arbolado a no forestal (ERF, 1990). Otro término es el propuesto por la Unidad del Inventario Nacional de Recursos Naturales, quien considera la deforestación como la “eliminación completa de áreas arboladas para dedicarlas a usos de suelo no forestales” (Varela, 1998). Por último la SEMARNAP la maneja como la eliminación de la vegetación forestal, o el cambio de uso del suelo hacia usos no forestales SEMARNAP (1998).

De igual manera existen otros términos relacionados con el concepto de deforestación tales como degradación, desertificación, reducción, disturbio y perturbación, por lo que es necesario hacer una diferenciación de los mismos. En este sentido, de acuerdo con la SEMARNAP, (1998) éstos se definen de la siguiente manera:

Degradación: procesos biológicos, químicos y físicos que resultan en la pérdida del potencial productivo de los recursos naturales en áreas clasificadas como bosques. Puede ser permanente si los bosques no se recuperan naturalmente o con la ayuda del hombre. Gradual reducción de la biomasa, cambios en la composición de especies y deterioro correlativo del suelo.

Desertificación: degradación de la tierra que en último término lleva a condiciones similares a las del desierto.

Reducción: Disminución en el área o volumen forestal como resultado de la deforestación.

Disturbio: alteración que directa o indirectamente ha provocado el hombre en la vegetación. Ocasionada también por fenómenos naturales (incendios, plagas, etc.)

Perturbación: cambios en la constitución de la vegetación natural producidos por agentes destructores. Engloba deforestación, degradación y disturbio.

Con relación a la deforestación, la definición que se manejará en este trabajo, es la propuesta por la SEMARNAP, (1998) que implica eliminación de la vegetación forestal, o el cambio de uso del suelo hacia usos no forestales. El cambio de uso de suelo es considerado como la principal causa de la deforestación en nuestro país, aunado a ello existen diferentes actividades tales como, el crecimiento demográfico, la demanda de espacios por parte de la población para uso agrícola y las actividades económicas forestales, que han ocasionado que se reduzcan las extensiones de la cubierta vegetal, originando la pérdida de suelos, extinción de especies, la recarga de los cuerpos de agua , entre otros procesos de deterioro ambiental (Varela, 1998).

De manera paralela, la construcción de carreteras, la extracción de maderas preciosas y el desarrollo de planes para el aprovechamiento forestal han contribuido a una mayor incidencia de la deforestación. De acuerdo con la FAO (1993), en los países en vías de desarrollo, la deforestación es el resultado del cambio en el uso del suelo y la consecuente transformación de bosques o selvas en áreas agrícolas o pecuarias, debido a la presión demográfica sobre el uso de los recursos naturales y del aprovechamiento inadecuado de la tierra.

En varias partes del mundo el fenómeno del proceso de deforestación se ha intensificado de tal manera que es uno de los problemas más importantes para la conservación de la biosfera. Durante el periodo 1964-1973, el ritmo de deforestación de los bosques tropicales en el mundo se calculó en 21 ha/minuto (Velásquez, 2002), lo que significó una pérdida anual de aproximadamente 11 millones de ha. Se estima que la conversión de la cobertura forestal en el mundo alcanzó en promedio 15.5 millones de ha. al año en el periodo de 1981-1990, con una tasa anual de pérdida de 0.8%. Para el caso de Latinoamérica se estima que cuenta con tan solo 366 millones de ha. de cubierta forestal, lo que representa el 52.8% de los 693 millones de hectáreas que poseía originalmente (Velásquez, 2002). Esta se considera la mayor transformación que ha ocurrido en Centroamérica y Sudamérica centrándose principalmente en

Brasil, México y Costa Rica, países que contribuyen con un 32% del total estimado (FAO, 1995; Velásquez, 2002).

1.2 Deforestación en México

A lo largo de la historia y en la actualidad, los bosques han sido de gran importancia económica y ecológica ya que son fuente de recursos maderables, contribuyen a la dinámica de la biosfera aportando carbono, forman parte del ciclo hidrológico y son fuente de energía entre diversos usos. Sin embargo, los bosques han venido disminuyendo debido al grave problema de la deforestación (Palacio *et al.*, 2000).

La deforestación en nuestro país no es un problema reciente ya que desde tiempos precolombinos se ha presentado, de manera particular, debido a causas como incendios, plagas y el cambio de uso de suelo, los recursos forestales han disminuido ocasionando un grave problema de tipo ambiental (SARH, 1992).

Para el caso de México la SEMARNAP ha calculado en porcentajes algunas de las causas principales de la deforestación como se puede apreciar en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Principales causas de la deforestación (SEMARNAP, 1999).

Los desmontes para uso agropecuario constituyen el 82%, es decir, pueden ser considerados como el principal factor del proceso de deforestación, dejando en segundo término a plagas; el cambio de uso de suelo autorizado y los incendios (SEMARNAP, 1999). Cabe señalar que éste último se ha convertido en uno de los fenómenos más comunes que aceleran el proceso de

deforestación afectando la superficie forestal en gran medida, pues según datos de la SEMARNAT, (1999) para el año de 1999 ocurrieron en el país 8,557 incendios forestales, afectando 40,475.46 ha., y reduciendo en gran medida la cubierta vegetal natural.

Otro de los factores que ha disminuido las reservas forestales nacionales ha sido la demanda de recursos maderables para su comercialización y uso doméstico, tal demanda es mayor que la producción forestal, ya que las áreas dedicadas a la obtención de maderas no satisfacen las necesidades existentes, por esta razón, la tala de árboles de manera ilegal se ha visto incrementada en los últimos años.

Una estrategia implementada por las dependencias gubernamentales para atacar el problema de la deforestación ha sido la aplicación de planes de aprovechamiento forestal, además de la vigilancia de los bosques, sin embargo, aun con estas medidas de control el proceso ha ido en aumento. De acuerdo con Masera (1996) México debería tener aproximadamente 0.7 ha per cápita para la presente década, no obstante, los datos actuales, indican que México posee tan solo un 0.5 ha de cubierta forestal per cápita y que la tendencia para el 2025 será de un 0.3 ha per cápita; es decir por debajo de la media mundial.

FUENTE	BOSQUES	RESERVAS	ZONAS ÁRIDAS	GLOBAL (miles de ha/año)
Toledo1989	Nd	Nd	nd	1500
Repetto1988	nd	460	nd	460
Myers1989	nd	700	nd	700
FAO1988	125	470	20	615
FAO1995	nd	Nd	nd	678
WRI 1992	nd	Nd	nd	615
WRI 1994	nd	Nd	nd	678
SARH 1990	127	202	41	370
SARH 1991	127	189	54	370
Castillo <i>et al.</i> 1989	273	473	nd	746
Masera <i>et al.</i> 1992	167	501	nd	668

nd: no disponible.

Tabla1.1. Estimaciones de Deforestación en México, 1980-1990, Fuente: SEMARNAP, 1999

Toledo, (1989) calcula la pérdida de 15000 ha. dañadas para el año de 1989, en tanto que Castillo *et al.* (1989) para el mismo año da cifras de 746 mil ha. y Myers (1989) de 700 mil ha. Por otro lado, la WRI (1992) estima la tasa de deforestación de 615 mil ha para el año de 1992, mientras que Masera *et al.* (1992) para el mismo año habla de 668 mil ha. Recientemente se han propuesto nuevas estimaciones de pérdida de cobertura forestal que inclusive pueden llegar a tener una pérdida de 1,200,000 ha. (Lichtinger, 2001). La discrepancia que existe en los datos de los diferentes autores de la Tabla 1.1, se deben a que los estudios que proporcionan los datos involucran diferentes definiciones de deforestación, distintas metodologías y otros tipos de muestras en distintas especies de bosques, de tal manera que no existe un método que estandarice los estudios de tal manera que sean comparables. Consecuentemente las estimaciones de la deforestación no son confiables y por ende es difícil obtener argumentos precisos para implementar técnicas adecuadas que contrarresten el proceso de la deforestación.

Otra de las limitantes para poder obtener valores precisos de la deforestación ha sido la dificultad de hacer mediciones en algunas áreas geográficas, tales como las zonas tropicales de México, debido a que son escenarios naturales muy cambiantes (Palacio *et al.*, 2000). Además de estos factores no existen medios de vigilancia competente ni monitoreo de los recursos forestales por lo que la realización de un inventariado es prácticamente imposible (Palacio *et al.*, 2000). De manera especial, el problema se vuelve más complejo ya que es necesario contemplar un periodo de tiempo considerable para poder evaluar el cambio real del área forestal. De manera contrastante, en los países desarrollados, la tecnología y mecanismos de control están bien definidos, por lo que el registro y supervisión de los cambios que sufren las áreas boscosas es más claro y sencillo (SEMARNAP 1998).

La realización de estimaciones de la deforestación en México a nivel nacional es muy complicada, esta situación se complica a un más si se analizara cada tipo de vegetación o región; lo anterior se ve reflejado en las opiniones de distintos autores con respecto a las evaluaciones de la deforestación a nivel regional (Tabla 1.2.).

Fuente	Región	Tipo de bosque o selva	Tasa de deforestación %/año	Periodo
Caro,1990	Purépecha, Michoacán	Templado	1.5-2	1986-1987
Cortez Ortiz,1990	Selva lacandona Chiapas	Tropical siempre verde	4.5	1980-1988
Cuarón ,1991	Sureste de México	Tropical siempre verde	7.7	1974-1986
De Ita,1991	Chamela, Jalisco	Tropical caducifolio	3.8	1982
Dirzo y García, 1992	Los Tuxtlas Veracruz	Tropical siempre verde	4.3	1976-1986
Mas et al.,1996	Veracruz, Puebla, Oaxaca	Tropical Templado	8.7-10.4 2-3.4	1982-1992
Mas, 1997	Campeche	Tropical Manglar	4.5 3.3	1978/80-1992
Ordóñez,1998	Oaxaca	Tropical Templado	2.2-2.8 1.1	1980-1993
Sorani y Álvarez,1996	Términos Campeche	Tropical y manglar	6.4	1980-1993
Trejo y Hernández, 1996	Morelos	Tropical caducifolio Templado	2.7 1.6	1986-1992
Cortina et al., 1999	Calakmul, Campeche	Tropical subperennifolio	2	1975-1985
Diaz et al., 2001a	Calakmul, Campeche	Tropical subperennifolio	4.5	1970-1996
Mendoza y Dirzo,1999	Selva lacandona, Chiapas	Tropical siempre verde	2.1-1.6	1974/81-1991
Bocco et al., 2001	Michoacán	Tropical Templado	1.8 1	1970-1990
Turner II et al., 2001	Sur de Yucatán	Tropical subperennifolio	2.8	1987-1997
Diaz et al., 2001b	Sureste de México	Cubierta vegetal natural	2	1993-2000

Tabla 1.2. Tasa de Deforestación de Diversos Tipos de Vegetación en Algunas Regiones de México.

A pesar de la situación antes señalada, es importante considerar que de manera paralela a los serios problemas técnicos e institucionales que los países subdesarrollados tienen para medir de modo adecuado la magnitud de la deforestación, las pocas fuentes de información confiable con que se cuenta se convierten en herramientas básicas para analizar el problema, ya que de

alguna u otra manera pueden ser aprovechadas para precisar su situación forestal y llevar a efecto proyecciones sobre el cambio en su superficie arbolada (Palacio *et al.*, 2000).

En el caso de México, un inventario nacional forestal periódico brinda la posibilidad de tener un monitoreo y control forestal, con base en las mediciones de 1994 y 2000. Los resultados de dichos inventarios pueden ser utilizados como un instrumento de análisis para clasificar la superficie forestal (SARH, 1992). Consecuentemente la SEMARNAT a través del inventario de 1994 provee información sobre la vegetación de zonas áridas, la cual ocupa una superficie de 58.5 millones de ha, así como de las áreas integradas por vegetación hidrófila y halófila, mismas que abarcan 4.2 millones de ha. Adicionalmente las áreas forestales perturbadas cubren un total de 22.2 millones de ha. En México el 72 % de la superficie es forestal con un total de 141.7 millones de hectáreas. De acuerdo con el inventario forestal 1994 (SARH,1992), la superficie total arbolada nacional se calculó en 56.8 millones de ha, ésta última resulta de la integración de bosques de coníferas y hojosas que cubren 30.4 millones de ha. y por selvas altas, medianas y bajas en una extensión de 26.4 millones de ha.

En la Figura 1.2 se puede observar la distribución de la extensión forestal para los diferentes estados de la Republica Mexicana en 1994 (SARH, 1992). En ella se puede apreciar el contraste de los diferentes estados que cuentan con la mayor extensión del recurso e identificar las áreas críticas.

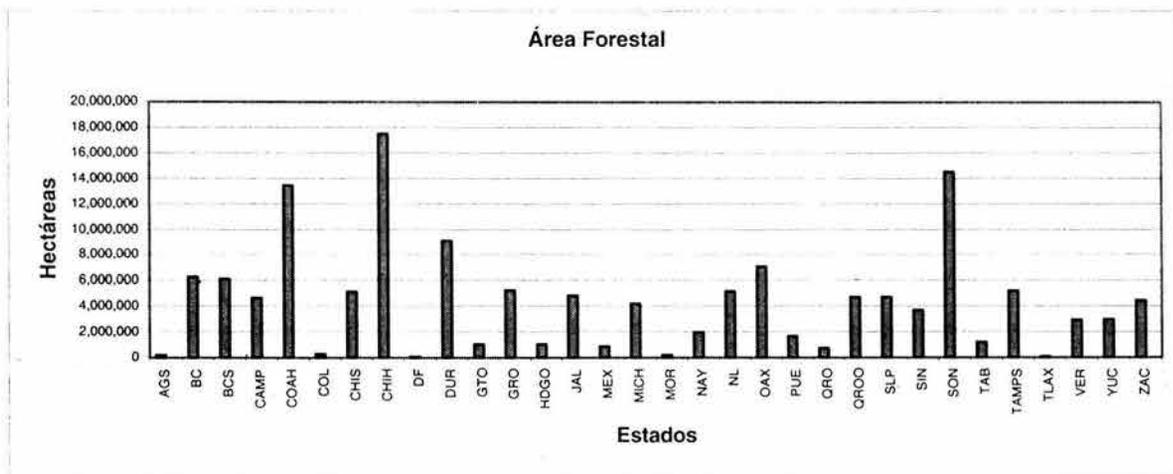


Figura 1.2. Superficie Forestal por Estados (Fuente: Inventario Forestal Periódico 1994).

A pesar del esfuerzo de contar con una evaluación realista de las áreas forestales, la información que se tiene es muy general y existen pocos datos a una escala local. Sin embargo,

estos datos pueden ser utilizados como instrumento clave en la fase inicial de distintos tipos de investigación a nivel estatal y posteriormente a una escala detallada. Cabe destacar que de acuerdo con varios autores, el avance del proceso de deforestación en nuestro país, ha implicado la pérdida o deterioro de por lo menos 50% de la superficie original, de tal manera que ha perdido su papel ecológico original (Toledo, 1989; Masera, 1996; Velásquez, 1999).

Las alteraciones que ocurren en la cubierta forestal pueden ser naturales o inducidas por el hombre, entre las naturales cabe destacar las plagas, incendios o degradación natural, sin embargo, la mayor parte de las alteraciones en la cubierta vegetal son producidas por las actividades del hombre. De acuerdo con Rzedowski (1978), la alteración de la cubierta vegetal puede ser de manera directa o indirecta, lo cual ocasiona destrucción y perturbación de la vegetación; el desmonte, el sobrepastoreo, la tala desmedida, los incendios y la explotación selectiva de algunas especies útiles forman parte de las alteraciones de tipo directo, mientras que las indirectas tienen que ver con la modificación o eliminación del ambiente ecológico necesario para el desarrollo de una determinada comunidad biótica, causando su desaparición automática.

El cambio de uso de suelo forestal a agrícola es una manera directa de afectar a la superficie forestal, pues influye en gran medida en la reducción de los bosques en nuestro país; diez por ciento del territorio mexicano (unos 20 millones de hectáreas) se dedica a la producción agrícola (Toledo, 1988; Cevallos y Navarro, 1991; citados en Challenger, 1998), y cerca del 13% de las zonas donde existió selva húmeda se encuentra actualmente en cultivo, sobre todo en Veracruz, Tabasco, Oaxaca y Chiapas (Challenger, 1998). Por otro lado cabe destacar que en el 15% de las zonas templadas subhúmedas del país se cultiva principalmente maíz (Toledo y Ordóñez, 1993 citados en Challenger, 1998), por lo que se pierden considerables extensiones de bosque de pino y encino característicos de la zona. Aunado a ello, en muchos de los casos los suelos de los bosques son pobres y pierden rápidamente su fertilidad por lixiviación, estos terrenos se convierten en pastizales por lo que se requiere abrir al cultivo nuevas áreas de selva; según Rzedowski (1978) las actividades antropogénicas han destruido los bosques de pino en un 50 a 67% de su área de distribución natural en México, de modo que en la actualidad, éstos sólo cubren 5% del territorio del país. Dichas actividades antropogénicas son originadas por el crecimiento de la población ocasionando la demanda de espacios para vivienda, industria y carreteras, y a su vez el incremento de consumo de alimentos y de materias primas vegetales involucra la extensión de terrenos dedicados a la agricultura Rzedowski (1978).

Challenger (1998) considera que cuando la perturbación antropogénica es intensa, prolongada y difundida, ésta altera profundamente las características físicas y químicas del suelo, además de modificar la composición, y reducir la abundancia y diversidad de propagulos presentes en el banco y en la lluvia de semillas del suelo, por lo que la regeneración del bosque de pino y encino (en especial del bosque primario) es más difícil, y quizá imposible de llevarse a cabo. Como consecuencia, en varias áreas de México donde los bosques de pino y encino se encuentran sometidos a quemadas deliberadas, la vegetación secundaria que sustituye al bosque está conformada generalmente por matorrales.

Otra observación de Challenger (1998) sugiere que otra de las principales causas de la disminución de especies de árboles, son las actividades forestales, debido principalmente a que los pinos se destinan sobre todo a la producción de papel y celulosa, madera aserrada y a la manufactura de muebles, industrias cuya voracidad han reducido significativamente la extensión los bosques de pino y encino.

1.3 Deforestación en Puebla

Para el caso de Puebla las estimaciones de la cubierta vegetal corresponden principalmente a los inventarios forestales realizados por la SEMARNAP en diferentes fechas (1994 y 2000). Sin embargo, existen limitantes para comparar la información de dichos inventarios forestales ya que las metodologías utilizadas son completamente diferentes y las leyendas utilizadas son incompatibles. A pesar de ello, es posible llevar a cabo una comparación al agregar categorías y obtener una leyenda que permita hacer comparaciones de la cartografía resultante.

Los resultados del inventario nacional forestal para el año de 1994 estiman una superficie total forestal de 1,698,722 ha, las cuales están constituidas por 460,771 ha de bosques. Dicho inventario contempla la categoría de bosques considerando subdivisiones en bosque de coníferas, bosque de coníferas y latifoliadas, bosque fragmentado y plantaciones forestales. En la Tabla 1.3 se puede observar la superficie forestal de bosques en las diferentes categorías y por subprovincia fisiográfica, este dato es importante por la relación que existe entre la vegetación, el clima y las formas del relieve en el estado de Puebla.

En el caso de las selvas mexicanas se estima que cubrían alrededor de un 20 % de la superficie nacional y entre 1976 y 1980 la deforestación anual de estas fue de 1,660,000 ha/año (Maser 1987). En 1994, las cifras del inventario forestal nacional (1992-1994) señalan que en el país quedaban un total de 196,724 km² de selvas. De manera particular se considera que el estado de Puebla tenía una extensión original de aproximadamente 307,455 ha de selvas.

SUBPROVINCIAS FISIográfICAS DE PUEBLA	B O S Q U E S					SUBTOTAL (ha)
	CONIFERAS	CONIFERAS Y LATIFOLIADAS	LATIFOLIADAS	FRAGMENTADO	PLANTACIONES FORESTALES	
Carso Huasteco	13,745	44,173	2,867	7,818	0	68,603
Llanuras y Lomeríos	0	0	0	0	0	0
Llanuras y Sierras de Qro e Hgo	0	0	0	0	0	0
Chiconguiaco	25	2,483	10,872	7,198	0	20,578
Lagos y Volcánes de Anáhuac	90,451	49,611	33,650	48,907	96	222,715
Sur de Puebla	870	0	66,466	12	0	67,348
Cordillera Costera del Sur	0	0	9,427	5,863	0	15,290
Sierras y Valles Guerrerenses	0	0	0	0	0	0
Sierras Orientales	12,029	2,116	0	37,728	0	51,873
Sierras Centrales de Oaxaca	4,082	0	9,991	25	0	14,098
Mixteca Alta	221	0	45	0	0	266
TOTAL	121,423	98,383	133,318	107,551	96	460,771

Tabla 1.3. Distribución de Bosques en las distintas provincias fisiográficas en el estado de Puebla (SARH, 1992).

En la Tabla 1.4 se presentan las superficies de selva de las distintas provincias fisiográficas. En ella destaca la selva baja en el Sur de Puebla con una extensión de 132,999 ha, aunque también está presente en la región de los Lagos y Volcanes de Anáhuac, en la Cordillera Costera del Sur y en las Sierras y Valles Guerrerenses (SARH, 1992). En cuanto a la selva fragmentada, ésta se extiende en mayor porcentaje en la región del Carso Huasteco, y en menor proporción también en el Sur. La selva alta y mediana solo se encuentra distribuida en las Sierras Orientales (SARH, 1992).

SUBPROVINCIAS FISIográfICAS DE PUEBLA	S E L V A S				SUBTOTAL (ha)
	ALTAS Y MEDIANAS	BAJAS	SELVA FRAGMENTADA	OTRAS ASOCIACIONES	
Carso Huasteco	0	0	22,103	11,028	33,131
Llanuras y Lomeríos	0	0	0	0	0
Llanuras y Sierras de Qro e Hgo	0	0	0	0	0
Chiconguiaco	0	0	1,637	0	1,637
Lagos y Volcánes de Anáhuac	0	19,050	0	0	19,050
Sur de Puebla	0	132,999	6,955	18,663	158,617
Cordillera Costera del Sur	0	19,971	0	0	19,971
Sierras y Valles Guerrerenses	0	8,913	0	10,292	19,205
Sierras Orientales	3,492	10,660	0	16,615	30,767
Sierras Centrales de Oaxaca	0	17,473	1,663	0	19,136
Mixteca Alta	0	5,941	0	0	5,941
TOTAL	3,492	215,007	32,358	56,598	307,455

Tabla 1.4. Distribución de Selvas en las distintas provincias fisiográficas en el estado de Puebla (SARH, 1992).

En cuanto a la categoría de otras áreas forestales, los resultados a nivel nacional indican la existencia de 302,774 ha de vegetación en zonas áridas y 627,722 ha de áreas perturbadas. De acuerdo con el inventario forestal de Puebla (SARH, 1994), las regiones de los Lagos y Volcanes de Anáhuac, y el Sur de Puebla destacan por su mayor extensión arbolada, la cual es de 241,765 y 225,965 ha respectivamente. En cuanto a la vegetación de zonas áridas, las Sierras centrales de Oaxaca ocupan la mayor superficie con un total de 133,198 ha. Finalmente, la distribución de áreas perturbadas es por lo general homogénea, con excepción de la región de Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo. El sur de Puebla es la zona que presenta mayor superficie de áreas perturbadas, junto con los lagos y volcanes de Anáhuac (Tabla 1.5).

SUBPROVINCIAS FISIográfICAS DE PUEBLA	CUBIERTA ARBOLADA	OTRAS ÁREAS FORESTALES			TOTAL FORESTAL (ha)
		VEGETACIÓN	VEG. HALÓFILA	ÁREAS	
		ZONAS ÁRIDAS	Y HIDRÓFILA	PERTURBADAS	
Carso Huasteco	101,734	0	0	52,403	154,137
Llanuras y lomeríos	0	0	0	989	989
Llanuras y sierras de Qro e Hgo	0	0	0	0	0
Chiconguiacó	22,215	0	0	6,571	28,786
Lagos y volcanes de Anáhuac	241,765	64,464	0	128,774	435,003
Sur de Puebla	225,965	60,667	0	339,149	625,781
Cordillera costera del sur	35,261	3,076	0	20,394	58,731
Sierras y valles Guerrerenses	19,205	875	0	16,335	36,415
Sierras orientales	82,640	40,494	0	38,619	161,753
Sierras centrales de Oaxaca	33,234	133,198	0	22,262	188,694
Mixteca alta	6,207	0	0	2,226	8,433
TOTAL	768,226	302,774	0	627,722	1,698,722

Tabla 1.5. Distribución de Otras áreas Forestales en las distintas provincias fisiográficas en el estado de Puebla (SARH, 1992).

De acuerdo con Galván (1999), los bosques ocupan un 15 % del total territorial, distribuyéndose principalmente en el norte del estado, sobre las laderas occidentales de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico Transversal, entre los poblados de Huachinango y Hueyapan, pero también, existen pequeñas áreas en la Sierra Madre del Sur. El bosque de Pino-Encino es el de mayor presencia para el estado, le siguen en orden de abundancia los de Encino-Pino, Pino, Encino, Oyamel, y Mesófilo de Montaña (SEMARNAT, 2000).

La explotación de madera en la región se origina debido a su rentabilidad, de tal manera que el factor económico juega un papel importante en la tala de árboles (Galván, 1999) Cabe destacar que en el estado el consumo interno de recursos maderables es muy poco; las especies que son explotadas son principalmente la caobilla - alacayohuete y cedros, en tanto que los pinos son utilizados para combustibles y construcción de muebles de baja calidad (Galván, 1999) (Figura 1.3).



Figura 1.3. Aserraderos clandestinos en el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla.

1.4. Deforestación en la Sierra Norte de Puebla.

El proceso de deforestación en el ámbito local en la Sierra Norte de Puebla es un problema que se ha incrementado de manera similar que a escala nacional, con las mismas causas y repercusiones en el medio ambiente. De tal manera que existen las mismas problemáticas al proponer estimaciones de la cubierta forestal, así como debido a la falta de trabajos a una escala local y detallada.

Para analizar el comportamiento de la cobertura forestal del área de estudio es necesario conocer sus características y distribución. Esta se caracteriza por tener una variada composición en la cobertura vegetal, pues para el sector noreste, la vegetación es selva alta perennifolia; en tanto que en el sector noroeste, existe bosque mesófilo de montaña, bosques de pino y encino, y sobreviven algunos manchones de bosques de galería, toda esta vegetación se encuentra altamente perturbada, por lo que quedan muy pocos sitios sin la presencia de vegetación secundaria (Galván, 1999).

Los datos de monitoreo forestal en nuestro país, son básicamente proporcionados por el Inventario Nacional Forestal, el cual maneja datos a escala estatal, de tal manera que la información de la dinámica forestal a una escala local no existe. En la Sierra Norte de Puebla la cubierta forestal ha disminuido principalmente por el cambio de uso de suelo, de forestal a agrícola, lo cual se muestra en la Tabla 1.6.

DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE (ha)	SUPERFICIE (%)
Superficies con vegetación natural	62710.2	9.12
Agricultura de Temporal	5367505.5	72.22
Pastizales	668412.0	8.74
Café	477527.4	5.96
Frutales	262974.6	3.83
Hortalizas	10526.3	0.15
Vegetación Secundaria	10785.6	0.16

Tabla 1.6. Uso del suelo y vegetación derivado de la interpretación de una Imagen Spot, 1995 (Galván 1999).

De acuerdo con Galván (1999), las superficies con vegetación natural están constituidas por pastizales, bosques y selvas, representando tan solo el 9.12% de la superficie de la área de estudio, en contraste con el 72.22% de la superficie dedicada a la actividad agrícola (Figura 1.4).



Figura 1.4. Cambio de uso de suelo de forestal a agrícola en el municipio de Tlatlauquitepec.

Una de las principales causas de tala de árboles, es la ocupación de los suelos fértiles de los bosques para la actividad agrícola. Estos suelos se agotan después de cierto número de cosechas, dejando un área infértil sin producción económica y con un grave problema de deforestación. En segundo término se encuentran otros factores que contribuyen a la tala inmoderada, tales como la recolección de leña para uso doméstico en algunas comunidades indígenas; esta actividad tiene grandes repercusiones para los bosques ya que las personas ocupan diariamente este combustible para la cocción de sus alimentos, y el impacto anual es muy elevado (Figura 1.5).



Figura 1.5. Autoconsumo de madera por habitantes del municipio de Tlatlauquitepec.

CAPITULO II. INESTABILIDAD DE LADERAS

2.1. Conceptualización y clasificaciones

Existen distintos términos para expresar la inestabilidad de una ladera, tales como procesos de remoción en masa, procesos gravitacionales, procesos de ladera, movimientos del terreno, etc. (Alcántara, 2000). Tal variedad de terminología está en función de la complejidad del proceso, es decir, del estudio de una serie de elementos que determinan su naturaleza y que se fundamentan en conocimientos de diversa índole, tales como la ingeniería, hidrología, geología, geofísica, geotecnia, geomorfología, entre otros (Alcántara, 2000). Consecuentemente, existen en la literatura varias clasificaciones y conceptos que buscan el mejor entendimiento de dicho proceso. En el caso del presente trabajo se optó por emplear procesos de remoción en masa y movimientos del terreno, como sinónimos de tal expresión.

Los movimientos del terreno ocurren cuando una ladera se vuelve inestable como resultado de la interacción de una serie de factores en el relieve, esto es, cuando los materiales formadores de ladera (suelo, roca o detritos) se ven afectados por diferentes cambios, que pueden ser internos o externos (Terzaghi, 1950). Este tipo de movimientos implican el desplazamiento por gravedad de distintos tipos de materiales que constituyen una ladera, aunque cabe destacar que generalmente son desencadenados por agentes como el agua, o bien por fuerzas externas como la sismicidad (Alcántara, 2000).

Desde principios del siglo XX, varios científicos se dieron a la tarea de analizar la inestabilidad de laderas, de tal modo que en función de su disciplina y enfoque científico, propusieron distintas clasificaciones de este tipo de procesos, entre los cuales cabe destacar la antigüedad del movimiento (Zaruba y Mencl, 1969), grado de actividad (Erskine, 1973), tipo geográfico (Reiche, 1937), localización geográfica (Reynolds, 1932), tipo climático (Sharpe, 1938; Hutchinson, 1968), tipo de material desplazado y tamaño (Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978), tipo de movimiento (Sharpe, 1938; Ward, 1945; Hutchinson, 1968; Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978), geología básica (Ladd, 1935; Zaruma y Mencl, 1969), velocidad del movimiento (Sharpe, 1938; Varnes, 1978), contenido de agua, aire o nieve (Sharpe, 1938; Shreve, 1968; Brunnsden, 1979), causas y mecanismos desencadenantes del movimiento (Terzaghi, 1950; Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978; Brunnsden,

1979), morfología del material depositado (Skempton, 1953; Brunsten, 1973; Crozier, 1973), propiedades geotécnicas (Brunsten, 1984).

Una de las clasificaciones más utilizadas es la propuesta por Varnes (1975), en la cual se considera el movimiento en función del tipo de material involucrado, tomando en cuenta a rocas y suelos, como los dos grandes grupos de materiales (Tabla 2.1.1).

TIPO DE MOVIMIENTO			TIPO DE MATERIAL		
Caída			Roca (sustrato)	Suelo (formación superficial)	
				Grueso	Fino
Vuelco			En roca	En derrubios	En tierras
Deslizamiento	Rotacional	Unidades pequeñas			
	Translacional	Unidades grandes			
Expansión Lateral					
Flujo					
Reptación					
Complejo			Combinación de dos o más tipos		

Tabla 2.1.1 Clasificación de procesos de ladera (Varnes, 1975).

Recientemente el programa EPOCH (1993), sugirió una nueva clasificación a partir de las elaboradas por Varnes (1975) y Hutchinson (1988) y la cual se maneja en el presente trabajo, en donde se observa la diferencia entre materiales involucrados de manera más específica (rocas, detritos o derrubios y suelos) y el tipo de movimiento (desprendimientos, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos) (Tabla 2.1.2).

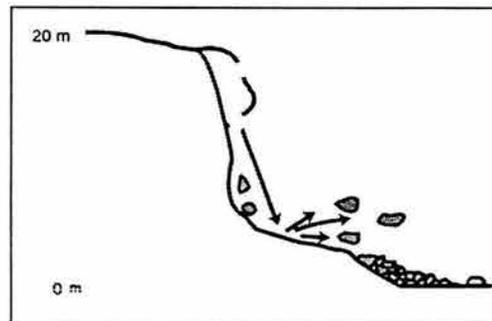
Tipo	Roca (<i>rock</i>)	Derrubios (<i>debris</i>)	Suelo (<i>soil</i>)
Desprendimientos (<i>fall</i>)	Caída o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (simple) Múltiple (múltiple) Sucesivo (successive)	Individual (simple) Múltiple (múltiple) Sucesivo (successive)	Individual (simple) Múltiple (múltiple) Sucesivo (successive)
Deslizamiento translacional o de bloques no rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Tabla 2.1.2. Clasificación de los procesos de remoción en masa (Fuente: EPOCH, 1993.

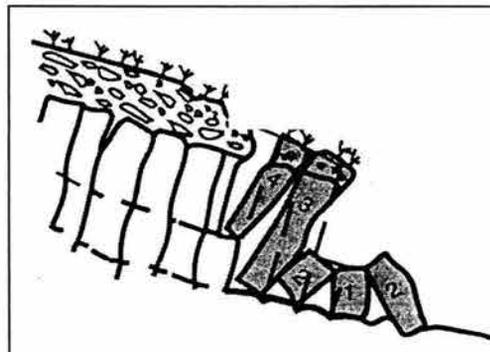
Tomado de Alcántara-Ayala, 2000).

Esta clasificación ha sido retomada en la terminología en español (Alcántara-Ayala, 2000) en donde se diferencian seis tipos de movimientos principales: desprendimientos (*fall*), vuelcos o desplomes (*topple*), deslizamientos (rotacional simple [*rotational slide*], translacional o de o de bloques no rotacional [*traslational slide, non rotational*] y planar [*planar*]), flujos (*flows*), expansiones o desplazamientos laterales (*lateral spreading*) y movimientos complejos (*complex movements*):

- 1) **Desprendimiento o caída:** es el movimiento en caída libre de distintos materiales como rocas, detritos o suelo, producto del desprendimiento de material en una superficie inclinada, la cual puede posteriormente rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo (Alcántara, 2000).

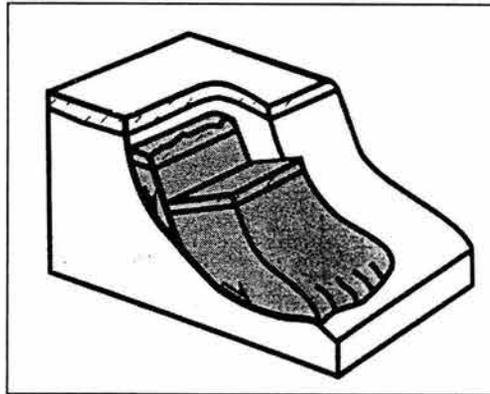


- 2) **Vuelco o desplome:** consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad, involucra la inclinación o basculamiento, pero no implica el colapso (Alcántara, 2000).

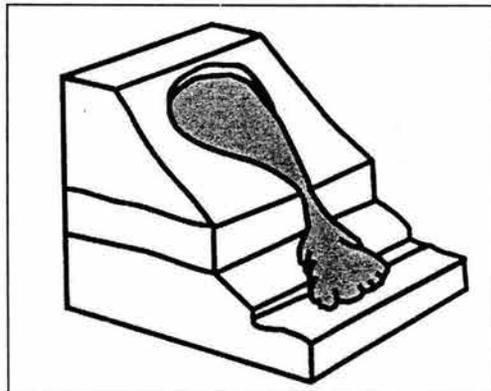


- 3) **Deslizamiento:** es un movimiento ladera abajo, de una masa de suelo, detritos o roca, ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Existen tres tipos de deslizamientos de acuerdo con la superficie de ruptura. Los deslizamientos rotacionales corresponden a superficies cóncavas, curvas o en forma de cuchara. Los deslizamientos planos

corresponden a superficies planas. Por último, los deslizamientos traslacionales corresponden a superficies de ruptura semiplanas u onduladas (Alcántara, 2000).



- 4) **Flujo:** es un movimiento espacialmente continuo, donde las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y difíciles de observar. El movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, por lo que la distribución de velocidades no es muy homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento irregular (Alcántara, 2000).



- 5) **Expansión o desplazamiento lateral:** este movimiento es el resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compacta, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de roca, grava, etc., están inmersos en una matriz de material mas fino o contienen arcilla (Alcántara, 2000).



- 6) **Movimientos complejos:** ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes (Alcántara, 2000).

2.2. Morfología

Con la idea de poder cartografiar y reportar procesos de remoción en masa, es importante contar con una metodología homogénea que se pueda aplicar de manera universal. Para este fin, la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG), acordó un esquema idealizado de los atributos morfológicos de un movimiento de ladera a partir de la modificación de un diagrama elaborado por Varnes (1978).

De acuerdo con este criterio, se especifican los componentes principales de un movimiento tipo deslizamiento de la siguiente manera (Alcántara-Ayala, 2000):

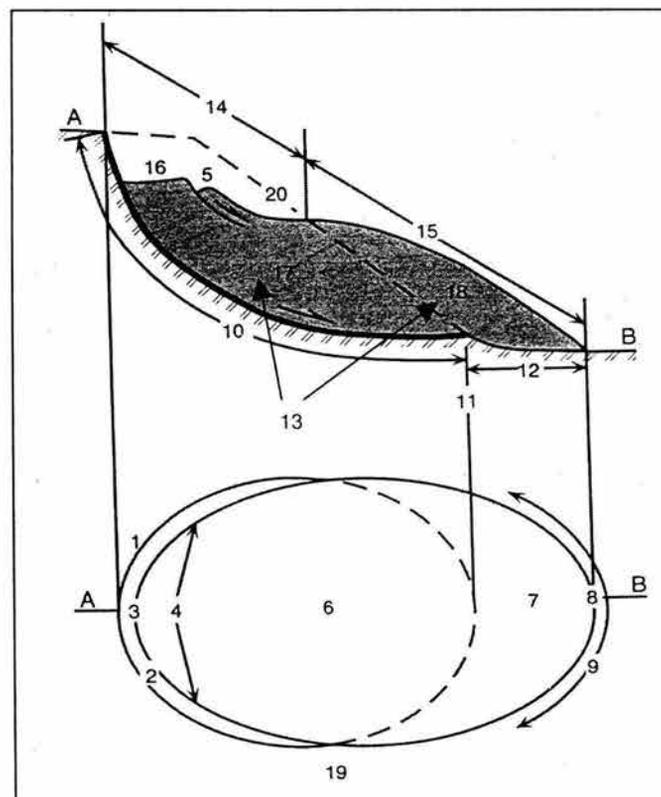


Figura 2.11.. Diagrama idealizado de los atributos morfológicos de un movimiento de ladera (IAEG Commission on Landslides, 1990): 1) Corona; 2) Escarpe principal; 3) Margen superior; 4) Cabecera; 5) Escarpe secundario; 6) Cuerpo principal; 7) Pie o pedestal; 8) Margen inferior; 9) Lóbulo frontal; 10) Superficie de ruptura; 11) Extremo inferior de la superficie de ruptura; 12) Superficie de separación; 13) Material desplazado; 14) Zona de hundimiento; 15) Zona de acumulación; 16) Hundimiento; 17) Masa hundida; 18) Acumulación o depósito; 19) Flanco; 20) Superficie original del terreno (Traducido de la WP/WLI por Alcántara, 2000).

Leyenda explicativa de la figura 2.1.1

1. *Corona* es la zona superior y adyacente, donde el material no ha sido desplazado
2. *Escarpe principal* es la superficie escarpada localizada en la arista superior resultante del movimiento
3. *Margen superior* es el punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal
4. *Cabecera* es la porción superior del movimiento a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal
5. *Escarpe secundario* es la superficie abrupta localizada en el material desplazado producido por movimientos diferenciales
6. *Cuerpo principal* es la parte del material desplazado que sobreyace la superficie de ruptura entre el escarpe principal y el extremo inferior de la superficie de ruptura
7. *Pie o pedestal* es la porción del movimiento del terreno que se ha desplazado más allá del extremo inferior de la superficie de ruptura y que sobreyace a la superficie original del terreno
8. *Margen inferior* es el punto del lóbulo frontal que se encuentra más alejado de margen superior del movimiento del terreno
9. *Lóbulo frontal* es la parte más baja y comúnmente es margen curvo del material desplazado por el movimiento, la parte más distal del escarpe principal
10. *Superficie de ruptura* es la superficie que forma o que ha formado el límite más bajo del material desplazado debajo de la superficie original
11. *Pie de la superficie de ruptura* es la intersección entre la parte más baja de la superficie de ruptura del movimiento y la superficie original del terreno (generalmente se encuentra sepultada)
12. *Superficie de separación* es la parte de la superficie original del terreno que sobreyace el pie o pedestal de movimiento
13. *Material desplazado* es el material que ha sido desplazado de su posición original en la ladera por el movimiento. Forma tanto la masa hundida o disminuida, como el depósito o acumulación
14. *Área de hundimiento* es el área del movimiento dentro de la cual el material descansa debajo de la superficie original del terreno
15. *Área de acumulación o depósito* es el área del movimiento dentro de la cual el material desplazado descansa debajo de la superficie original del terreno

16. *Hundimiento* es el volumen rodeado por el escarpe principal, a masa hundida o disminuida y la superficie original del terreno
17. *Masa hundida o disminuida* es el volumen del material desplazado, el cual sobreyace la superficie de ruptura, pero infrayace la superficie original del terreno
18. *Acumulación o depósito* es el volumen del material desplazado, el cual descansa sobre la superficie original del terreno
19. *Flanco* es el material no desplazado adyacente a los lados de la superficie de ruptura
20. *Superficie original del terreno* es la superficie de la ladera que existía antes de que el movimiento del terreno ocurriera

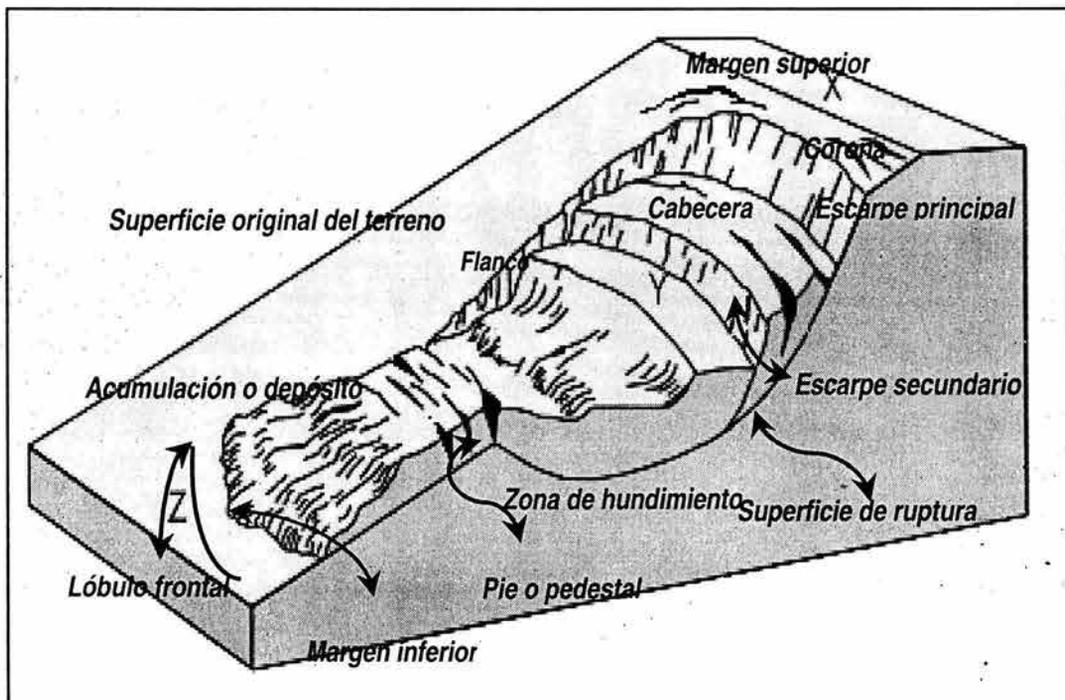


Figura 2.1.2 Esquema idealizado de un deslizamiento (Alcántara, 2000).

2.3. Causas de la inestabilidad

De acuerdo con Terzagui (1950) y Selby (1993), los procesos de remoción en masa ocurren debido a dos causas fundamentales las cuales son de tipo externo y de tipo interno. Las causas externas son todas aquellas que producen un incremento en la tensión o esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales; mientras que las causas internas, disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o esfuerzos.

De acuerdo con Alcántara-Ayala (2000), algunos de los cambios de tipo externo más importantes se encuentran asociados a los cambios geométricos o de peso que sufren las laderas como resultado de la erosión, socavamiento, incisión de un río, excavaciones artificiales, cargas y descargas. De igual manera juegan un papel muy importante las tensiones transitorias naturales y artificiales a las que son expuestas las laderas (sismos, vibraciones por explosiones o uso de maquinaria pesada), así como los cambios en el régimen hidrológico (intensidad y duración de las precipitaciones, etc.). Por otro lado, los cambios de tipo interno están con relación a la transformación de los materiales a través de movimientos progresivos (por expansiones laterales, fisuras, etc.), procesos de intemperismo y erosión.

Debido a la complejidad de la inestabilidad de laderas, se pueden establecer diversas causas, tanto internas, como externas que originan los procesos de ladera. Estas últimas han sido categorizadas por Cruden y Varnes (1996) tomando en cuenta procesos de diferente índole tales como los geológicos, morfológicos, antrópicos y por procesos físicos (Tabla 2.1.3).

Causas de índole geológica	Causas por procesos físicos
Materiales débiles Materiales sensibles Materiales intemperizados Materiales sujetos a cizallamiento Materiales con fisuras y diaclasas Discontinuidades orientadas adversamente (esquistosidad, planos de inclinación) Discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos) Permeabilidad contrastante Contraste de materiales con diferente plasticidad	Precipitación intensa Derretimiento rápido de nieve o hielo Precipitación extraordinaria Sismos Erupciones volcánicas Gelifracción Expansión e hidratación de arcillas
Causas morfológicas	Causas Antrópicas
Levantamientos tectónicos o volcánicos Erosión glacial Erosión fluvial al pie de las laderas Erosión marina al pie de los acantilados Erosión glacial al pie de las laderas Erosión en márgenes laterales Erosión subterránea Remoción de la vegetación (por incendios y sequías)	Excavación de laderas o del pie de las laderas Incremento de peso en las laderas Deseccación de cuerpos de agua Deforestación Irrigación Actividad minera Vibraciones artificiales

Tabla 2.1.3 Causas de los movimientos del terreno (fuente Cruden y Varnes 1996).

Entre los factores determinantes cabe destacar los geológicos, estratigráficos (arreglo y disposición de los estratos); estructurales (los materiales del terreno formadores pueden ser poco resistentes o estar caracterizados por la presencia de sistemas de debilidad como diaclasas, fracturas, fallas, planos de estratificación, echado entre otros, lo cual implica una inestabilidad latente); topográficos (pendiente, mayores en montaña y menores en pie de monte

y planicies) y climáticos refiriéndose al clima constante del lugar (zonas templadas con presencia de agua todo el año y por el contrario en zonas áridas). Además de estos factores de naturaleza física, el factor antrópico ha jugado un papel muy importante en la estabilidad de las laderas, ya que las actividades humanas constantemente modifican el equilibrio natural del relieve, por lo que cabe destacar que los cambios de uso del suelo, y en particular, la deforestación han ocasionado una mayor incidencia de este tipo de procesos.

2.4. Vegetación e Inestabilidad

Las actividades humanas y el crecimiento demográfico han ocasionado la aceleración del proceso de deforestación originado por incendios inducidos, extracción de maderas comerciables, búsqueda de tierras fértiles o áreas habitables. Estas actividades ocasionan la eliminación de la cubierta del suelo y de los árboles, por lo que los materiales formadores de las laderas son propensos a sufrir intemperismo y erosión, y por ende una más rápida infiltración del agua en los suelos haciendo que se saturen y reblandezcan y sean más susceptibles a la inestabilidad.

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de las laderas ha sido muy debatido en los últimos años; y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo, no ha tenido una explicación universalmente aceptada (Greenway, 1987). Sin embargo, de manera general, se ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión y reptación. Hierbas, arbustos y árboles han sido utilizados para el control de erosión en las laderas y estabilización de deslizamientos desde hace mucho tiempo. Lee (1985) reporta el trabajo del ingeniero Pan, quien en 1591 empleó plantas como los sauces para la estabilización de laderas durante la dinastía Ming de China.

Existe un sin número de prácticas que se han llevado a cabo a través de los años, con la finalidad de utilizar la vegetación para la estabilización de laderas (Greenway, 1987). En particular, las contribuciones históricas de europeos fueron descritas por Schiechtl (1980) y Zaruba y Mencl (1982), incluyendo las 1834 escrituras de Duile en la reparación de laderas escarpadas y la técnica de plantar sauces de Demontzey (1880) y Wang (1903) citados en Greenway, (1987).

La deforestación es uno de los elementos que frecuentemente influye como causante de la inestabilidad de laderas. Sin la cubierta de vegetación, el suelo se desestabiliza de manera

peligrosa, lo que produce procesos de remoción en masa (Suárez, 1994). La presencia de la cubierta forestal en laderas escarpadas minimiza las repercusiones en el suelo causadas por la dinámica de agentes erosivos como el agua y el viento, mismos que actúan reduciendo la resistencia de los materiales formadores de las laderas, haciéndolas más susceptibles a la inestabilidad.

Los análisis del efecto de la vegetación sobre el suelo requieren investigar las características específicas de la vegetación en el ambiente natural que se esté estudiando, incluyendo volumen y densidad de follaje, tamaño, ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces (Greenway, 1987).

El estudio concreto de los efectos de la vegetación y de la deforestación en el análisis de la estabilidad del terreno es de reciente incursión en el medio científico y aunque en los últimos 20 años se han desarrollado avances importantes en todo el mundo, nuestro país no ha tenido una participación objetiva. La influencia de arbustos, árboles y demás vegetación en la estabilidad del terreno es compleja y esto ha obstaculizado los esfuerzos de cuantificar los análisis de la estabilidad.

La propensión de las laderas a la ocurrencia de procesos gravitacionales disminuye a partir del correcto establecimiento de una cubierta vegetal (Greenway, 1987). El uso sistemático de cubiertas vegetales inducidas para prevenir la inestabilidad se ha empleado desde siglos pasados en diferentes culturas. No obstante, algunas investigaciones sugieren que una ladera totalmente poblada de vegetación no siempre contribuye a la estabilidad del terreno, en tanto que sitios con alto grado de deforestación tienen mayor probabilidad de ser inestables (Collison y Anderson, 1996).

Diversos trabajos han enfatizado la importancia de la influencia de los sistemas de raíces vegetales en la estabilidad de los suelos en las laderas, particularmente desde el punto de vista de la deforestación en laderas con fuerte pendiente (Suárez, 1994). Un factor crucial en la estabilidad de laderas inclinadas provistas de una cubierta vegetal, es el papel de las raíces en el mantenimiento de la resistencia y deterioro de las capas de suelo, de tal modo que el análisis

de la deforestación y su relación con la inestabilidad de las laderas, se vuelve indispensable (Greenway, 1987).

De manera natural, la vegetación cumple su función en el mantenimiento del equilibrio existente entre las fuerzas endógenas y formadoras y los procesos exógenos erosivos o de inestabilidad, por lo que la probabilidad de ocurrencia de movimientos gravitacionales o procesos de remoción se incrementa en gran medida cuando la cubierta vegetal es removida o modificada.

La vegetación sirve como una capa protectora entre la atmósfera y el suelo; las hojas y los tallos absorben la energía de los agentes erosivos como el agua y el viento, de tal modo que el impacto directo en el suelo es menor, en tanto que el sistema de raíces establece la resistencia mecánica del suelo, elemento fundamental en la inestabilidad de las laderas. Lo anterior en virtud de que las raíces y rizomas de la vegetación interactúan con el suelo para producir fibras que poseen propiedades de adhesión y una resistencia relativamente alta (Suárez, 1994).

De acuerdo con diferentes estudios y observaciones de campo (O'Loughin, 1984), las raíces finas de 1 a 20 mm de diámetro son las que contribuyen en mayor grado con el reforzamiento del suelo, mientras que las raíces mayores no juegan papel importante alguno a este respecto. Pastos, leguminosas y pequeños arbustos tienen un efecto de reforzamiento del suelo a profundidades de 0.75-1.5 m, mientras que los efectos de los árboles pueden propiciar resistencia a profundidades de 3 o más metros, dependiendo de la morfología de las raíces de las especies existentes.

Los sistemas de raíces producen un aumento en la resistencia del suelo a través del incremento de cohesión, esto como consecuencia de la adherencia entre el material compuesto por fibra y suelo y las partículas de suelo en las raíces. En general se sabe que las raíces no tienen efecto alguno en el ángulo de fricción del suelo, no obstante, investigaciones realizadas por Tengbeh (1989), sugieren que las raíces de los pastos ocasionan un incremento en el ángulo de fricción en suelos arenosos, pero no tienen el mismo efecto en suelos arenoso-arcillosos. Estudios similares han demostrado que el reforzamiento de las raíces puede incidir en la resistencia del suelo aún cuando la densidad de raíces es baja (Waldron 1977, Ziemer, 1981). Por consiguiente, se puede decir que la vegetación puede tener su mayor efecto en la área más próxima al suelo donde la densidad de raíces es por lo general más alta, y el suelo es más débil.

La vegetación con relación a la inestabilidad de las laderas cumple dos funciones principales. Por un lado tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y, por el otro, determina el grado de consistencia asociado al sistema entramado mecánico de sus raíces (Greenway, 1987). De tal modo que se puede hablar de dos tipos de mecanismos que influyen sobre los suelos de una ladera, estos se pueden clasificar como hidrológicos y físicos. Los factores físicos provienen de las interacciones mecánicas del follaje o del sistema de raíces de la vegetación en la ladera; y los mecanismos hidrológicos están en función de las distintas fases del ciclo hidrológico que se presentan con la vegetación existente, esto se puede observar en la Figura 2.4.1 en donde los números corresponden al listado de la Tabla 2.4.1., donde se describe la influencia de los mecanismos de la vegetación sobre una ladera.

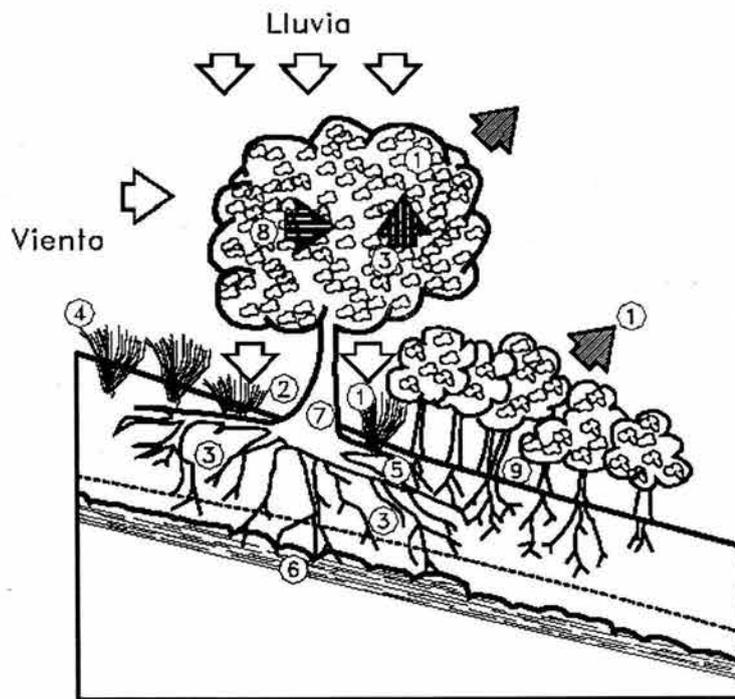


Figura 2.4.1 Esquema de la interacción entre la vegetación y la estabilidad de laderas (Greenway, 1987).

Mecanismos Hidrológicos	
1. -El follaje intercepta la lluvia.	(B)
2. -Aumenta la capacidad de infiltración. Las raíces aumentan la aspereza de la superficie de tierra y la permeabilidad del suelo, conduciendo a la capacidad creciente de la infiltración.	(A)
3. -Las raíces extraen la humedad del suelo.	(B)
4. -Grietas por desecación. El agotamiento de la humedad puede acentuar la desecación ocasionando que se presenten grietas en el suelo, dando por resultado una capacidad más alta de la infiltración.	(A)
Mecanismos Físicos	
5. -Las raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia.	(B)
6. -Ancla el suelo en los estratos firmes, proporcionando la ayuda a la capa del suelo	(B)
7. -Aumentan el peso sobre la ladera. El peso de los árboles sobrecarga la cuesta, aumentando componentes normales y en declive de la fuerza.	(A/B)
8. -La vegetación trasmite la fuerza del viento a los suelos de las laderas.	(A)
9. -Las raíces retienen las partículas del suelo disminuyendo la susceptibilidad a la erosión.	(B)
B= Benéfico; A= Adverso	

Tabla 2.4.1 Efectos de la vegetación sobre la estabilidad de las laderas (Greenway, 1987).

La influencia de la vegetación puede ser clasificada de manera general como benéfica o adversa a la estabilidad. Los mecanismos hidrológicos que contribuyen a una presión menor de los poros de agua son benéficos, en tanto que aquellos que incrementan dicha presión son adversos, pues la saturación de agua en los suelos ocasiona que estos se reblandezcan de tal manera que las laderas sean inestables. Es importante mencionar que entre los mecanismos físicos, los que incrementan la resistencia de fijación de las raíces al terreno son benéficos, mientras que los que la disminuyen son adversos (Greenway, 1987). Por otro lado se tiene que considerar que no todos los factores mencionados son aplicables a todas las laderas, ya que su grado de complejidad está determinado por las características de los materiales, además, de que el peso específico de cada factor puede indudablemente variar de un terreno a otro (Greenway, 1987).

La vegetación afecta las condiciones hidrológicas de una ladera de varias formas, por ejemplo, el agua precipitada es interceptada por el follaje, lo cual reduce el porcentaje de infiltración, parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada y otra parte llega al suelo por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. De esta manera la intercepción de la lluvia va a depender del

porcentaje o cantidad de follaje que presente una ladera (Greenway, 1987). Por otro lado, la presencia de raíces favorece la infiltración y reduce el escurrimiento al incrementar la permeabilidad. Los canales asociados a las raíces favorecen la erosión a través de conductos internos en algunos suelos. Sin embargo, las raíces también absorben agua reduciendo la humedad del suelo vía transpiración a través del follaje. En algunos casos, ésta pérdida de humedad origina la desecación del suelo y la formación de grietas. Una vez formadas cada grieta puede incrementar permanentemente la permeabilidad y la capacidad de infiltración de los suelos (Greenway, 1987).

La pérdida por infiltración que ocurre en laderas con vegetación es controlada por diversos factores, incluyendo el tipo y la especie de vegetación, la porción de la ladera con vegetación, la duración e intensidad de la precipitación, las condiciones previas de humedad y los factores estacionales o clima. La infiltración es un proceso complicado con influencia no solamente de la vegetación sino también de otros factores como las características de la precipitación, las propiedades de los materiales y el uso de suelo. El incremento de la capacidad de infiltración y permeabilidad de una superficie con vegetación en una pendiente puede atribuirse a la presencia de raíces y al aumento de la rugosidad de la superficie (Suárez, 1994).

La razón por la cual las plantas consumen humedad del suelo depende de múltiples factores, incluyendo el tipo, tamaño y especie de la vegetación, el tiempo, clima y factores estacionales, orientación de la pendiente, tipo de suelo, disponibilidad de humedad la cual determina la influencia de estos en la generación de procesos de ladera (Suárez, 1994).

La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la porción de agua de esorrentía, así como su poder erosivo, pero puede aumentar el volumen de infiltración. La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje, demoran más el ciclo hidrológico, pues retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia. En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención es mayor, dependiendo de las características de la vegetación (Greenway, 1987).

Parte del agua retenida es acumulada en el follaje para luego ser evaporada. Algunas especies vegetales como el maíz poseen espacios importantes para almacenamiento de agua. Existen

experiencias con especies vegetales, que han permitido determinar el volumen total de agua acumulada, teniendo en cuenta la densidad de área total y el volumen del follaje. El agua acumulada regresa al suelo a manera de goteo o flujo utilizando como medio el follaje, la rapidez de flujo depende de la aspereza de las superficies de las hojas y los troncos, también se debe de tomar en cuenta los diámetros y ángulos de las hojas con la vertical (Suárez, 1994).

La evapotranspiración es otro factor a considerar, ya que es un efecto combinado de evaporación y transpiración. A partir de este hay una disminución de la humedad en el suelo, Greenway (1987) sugiere que la importancia de la capacidad de una planta para consumir humedad del suelo depende del tipo, tamaño de la especie, clima, factores ambientales y características del suelo.

El peso de los árboles es una carga adicional al terreno, que incrementa la componente normal de fuerza ladera abajo en potenciales superficies de falla. La vegetación expuesta al viento transmite fuerza a la pendiente, y si son desarraigados o vuelcan ambos hechos pueden incrementar erosión y la infiltración (Greenway, 1987).

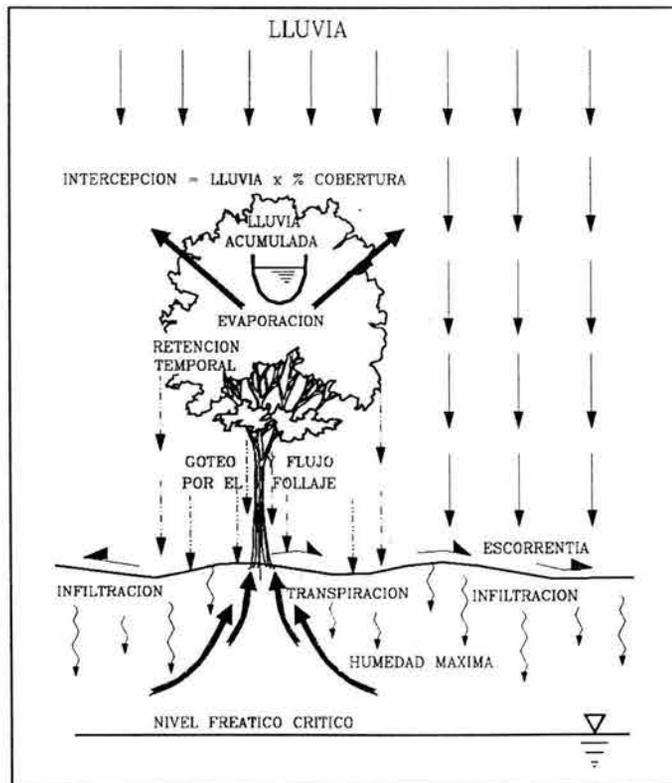


Figura 2.4.2 Esquema del efecto de la vegetación sobre el modelo hidrológico subsuperficial (Suárez, 1994).

El efecto más importante de la vegetación, aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación. La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión (Greenway, 1987). En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía (Gray, 1981). Dicha relación se puede observar de manera gráfica en la Figura 2.4.1.

Otro de los factores importantes que disminuye la acción de los agentes erosivos es el sistema de raíces que proporciona la vegetación, ya que brindan resistencia y evitan el deterioro de las capas del suelo. Las raíces de la vegetación interactúan con el suelo a través de fibras que poseen propiedades de adhesión y una resistencia relativamente alta (Gray, 1981).

2.4.1. Características generales de las raíces

Las características de las raíces dependen de las especies vegetales, la edad, las propiedades de los suelos y el ambiente (Figura 2.4.5). La diferencia entre la fuerza y profundidad de las raíces es muy obvia, pues las hierbas y algunas plantas como las que vemos en los jardines cuentan con raíces de unos cuantos cm. de profundidad, a diferencia de la estructura de las raíces que presentan los árboles, pues su profundidad y fuerza es mayor así como la extensión lateral de las raíces, la profundidad de las raíces generalmente no supera los 5 m en árboles grandes, 2 m en los arbustos y 30 cm en los pastos.

De acuerdo con Greenway (1987), existe vegetación que posee un sistema de raíz "extensivo", en el cual las raíces alcanzan profundidades o extensiones grandes, mientras otras forman un sistema "intensivo" con raíces más cortas y finas. La forma de las raíces puede presentar tres esquemas diferentes: raíz de extensión lateral, raíz de extensión radial y raíz pivotante. La longitud de las raíces y su profundidad depende de ciertas características del suelo como la compactación que esté presente, por lo que su evaluación permite determinar su efecto sobre la estabilidad de una ladera.

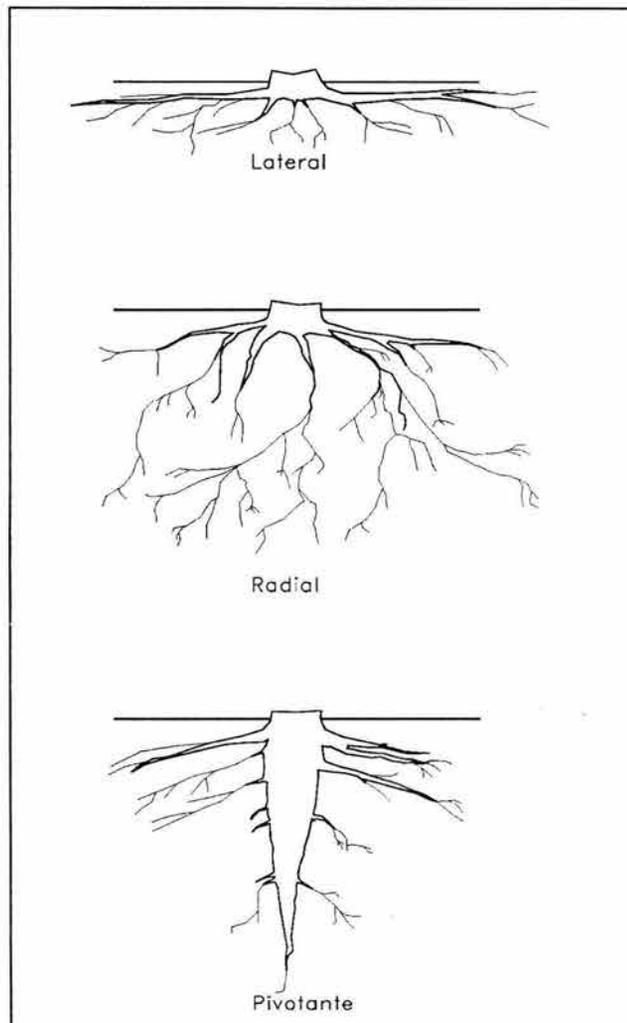


Figura 2.4.5 Diferentes tipos de raíces (Suárez, 1994).

Ante la dificultad de poder determinar con precisión la longitud de raíz, debido a la poca información existente sobre las características radiculares de las diversas especies, se puede tomar como regla general que la raíz se extiende lateralmente 1.5 veces el radio de la corona del follaje, aunque debe tenerse en cuenta que en algunos casos, las raíces pueden extenderse hasta 22 veces el radio de la corona (Kozlowski, 1971).

2.4.2. Acción de refuerzo de las raíces

La fricción y adhesión, son propiedades del suelo que se ven influidas al contar con un sistema de raíces. Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades (Figura 2.4.2.1).

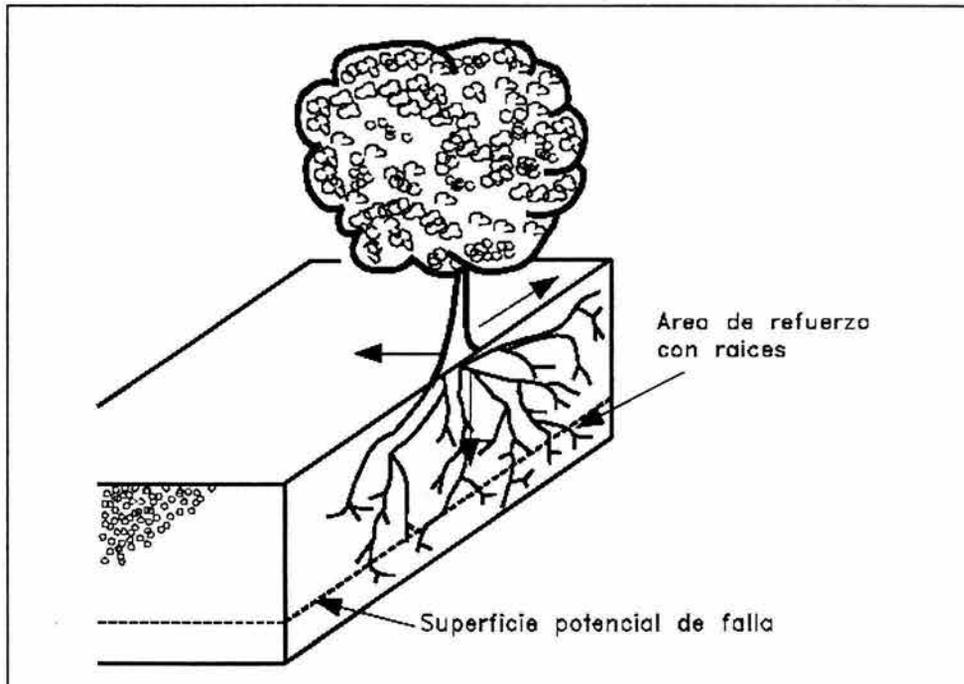


Figura 2.4.2.1 Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles (Greenway, 1987).

La posible relación entre el refuerzo de las laderas y el tipo de raíces está representada en el trabajo elaborado por Tsukamoto y Kusakabe (1984) (Figura 2.4.2.2):

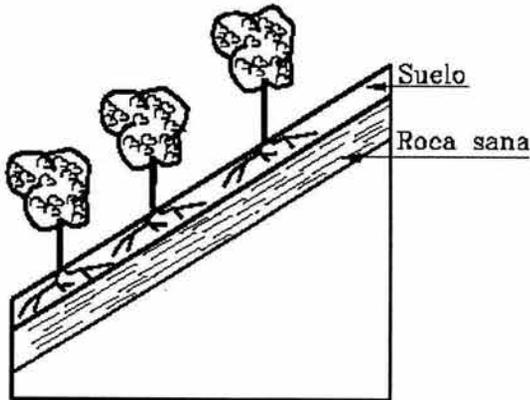
TIPO A: Pendientes que poseen una capa muy delgada de suelo sobre roca masiva y sin defectos que permitan puntos de anclaje para las raíces y una superficie de falla potencial entre el suelo y la roca.

TIPO B: Una capa delgada de suelo sobre una roca con fracturas o defectos que permiten la entrada y anclaje de las raíces.

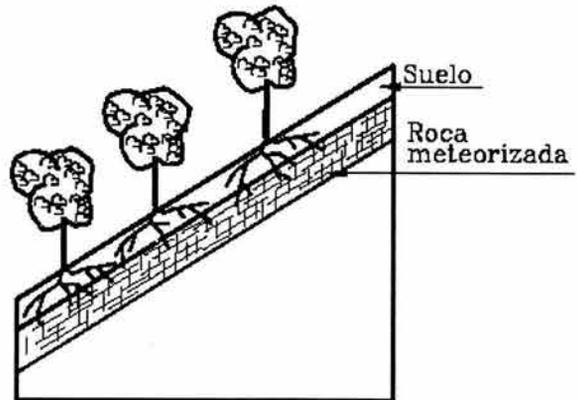
TIPO C: Varias capas de suelo y las raíces penetran normalmente las interfaces reforzando los contactos entre las diversas capas.

TIPO D: Pendientes con una capa gruesa de suelo y raíces a profundidades superiores a las de las superficies potenciales de falla

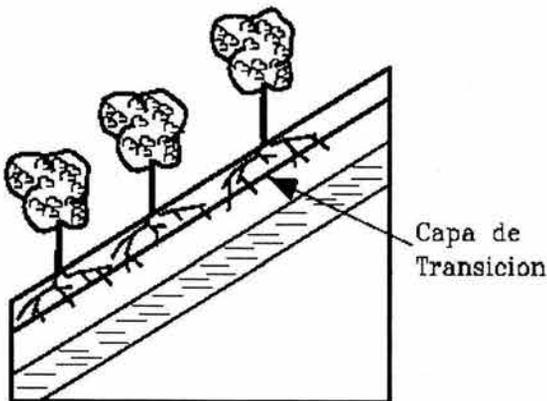
Tipo A
No hay anclaje.



Tipo B
Anclaje del suelo a la roca.



Tipo C
Anclaje entre capas de suelo



Tipo D
Falla por debajo de la profundidad de las raíces.

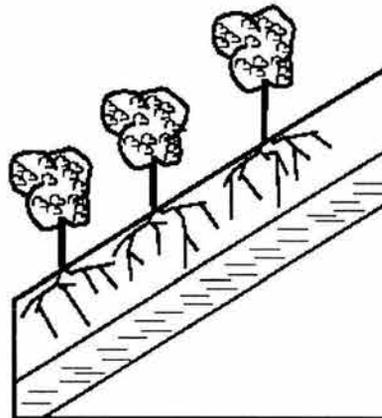


Figura 2.4.2.2. Una clasificación del refuerzo de laderas con las raíces de los árboles, propuesta por Tsukamoto and Kusakabe (1984), tomado de Greenway (1987).

La profundidad de las raíces es un factor muy importante. La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 20 cm. comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos. Se conoce de Eucaliptos con raíces hasta de 27 m. y raíces de bosque tropical hasta de 30 m. de profundidad, pero la mayoría de los árboles tienen raíces de profundidad hasta de tres metros (Greenway, 1987) y esta es la profundidad hasta la que puede confiarse un refuerzo con raíces.

Por consiguiente, las propiedades de la vegetación representan un papel importante en la estabilidad de las laderas y se debe de considerar la deforestación en áreas propensas a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

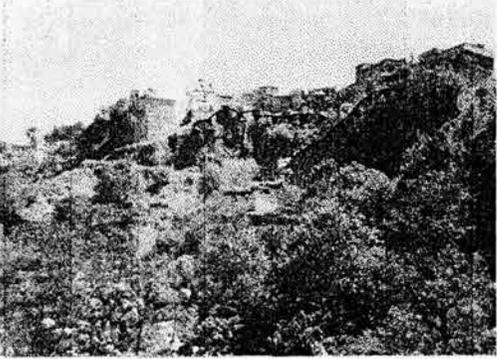
2.4.3. Algunas observaciones en relación con la inestabilidad de laderas y la vegetación en la Sierra Norte de Puebla

Varias campañas de trabajo de campo se efectuaron en diversos municipios de la Sierra Norte de Puebla, tales como Cuetzalan, Chignahuapan, Teziutlán, Pahuatlán, Tlatlauquitepec, Zacatlán, Zacapoaxtla, Zapotitlán de Méndez, y Zaragoza, con la finalidad de por un lado, verificar la información relativa a la vegetación proporcionada a través del inventario nacional forestal del año 2000, y de las imágenes de satélite; y por otro, con el objetivo de identificar zonas sujetas a procesos de remoción en masa (Tabla 2.4.3.1.).

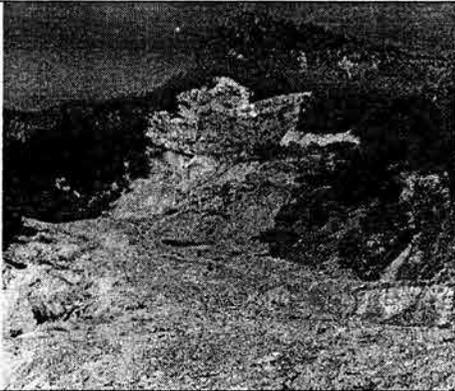
La Sierra Norte de Puebla es una región donde en las últimas décadas la deforestación e introducción de cultivos como el café o frutales, se ha intensificado. Si bien es cierto que la inestabilidad de laderas es un proceso geomorfológico natural del relieve, también es cierto que las actividades antropogénicas han jugado un papel muy importante en el desequilibrio del mismo, de tal manera que no solo los eventos de precipitación extraordinaria juegan un papel fundamental en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, sino que las alteraciones al paisaje realizadas por los seres humanos condicionan el impacto de este tipo de fenómenos, por lo que desafortunada y frecuentemente se convierten en desastres.

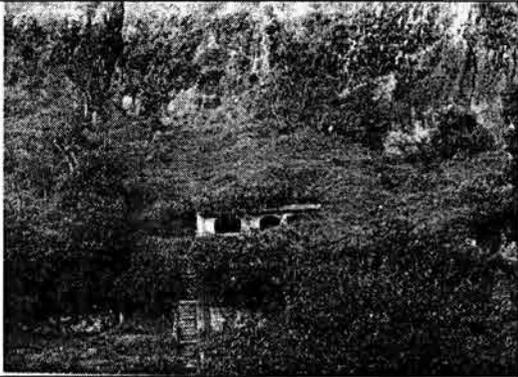
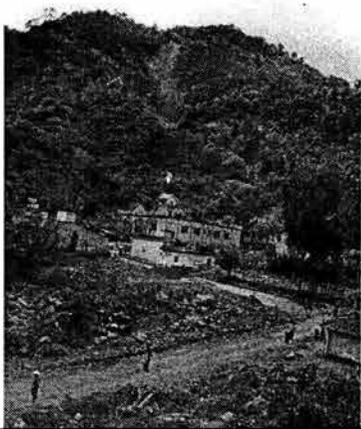
De manera general el efecto de la vegetación en la inestabilidad de laderas esta en función de los materiales involucrados, así como del tipo de movimiento (tabla 2.4.3.2). En particular se pudo observar que en la Sierra Norte los desprendimientos y los vuelcos o desplomes ocurren principalmente en el relieve estructural denudatorio constituido por complejos montañosos de rocas sedimentarias diversas, principalmente de lutitas y calizas. El efecto de la vegetación en este tipo de movimientos es adverso a la estabilidad ya que la penetración de las raíces en las diaclasas y grietas de estos materiales altamente intemperizados facilitan los procesos de remoción. Por lo general el impacto de este tipo de movimientos ocurre a lo largo de las terracerías y carreteras, de tal manera que las consecuencias casi siempre están relacionadas con la interrupción de las comunicaciones, y en algunos casos el aislamiento de poblados.

Tipo de Proceso	Localidad	Tipo de Suelo	Características	Vegetación	Impacto	Proceso de remoción en masa
Deslizamiento traslacional-flujo	Teziutlán, la Aurora	Andosol de textura media	Depósitos de ignimbrita, materiales poco consolidados y con alternancia de permeabilidad	Vegetación secundaria de Pino-Encino	Más de 100 personas perdieron la vida en este movimiento que inició como deslizamiento y posteriormente se convirtió en flujo. Decenas de casas fueron sepultadas.	
Deslizamiento traslacional-flujo	Teziutlán, la Gloria	Andosol de textura media	Depósitos de ignimbrita, materiales poco consolidados y con alternancia de permeabilidad	Pinos, encinos y vegetación secundaria	Algunas casas fueron sepultadas por el movimiento ocasionando pérdidas materiales y humanas	
Caídas o Derrumbes	Teziutlán, Xoloco	Andosol de textura media	Depósitos de ignimbrita, materiales poco consolidados y con alternancia de permeabilidad	Vegetación secundaria de Pino-Encino	Algunas casas fueron dañadas, y la mayor parte de ellas están en áreas potenciales de inestabilidad	

Deslizamientos y flujos	Teziutlán,	Andosol de textura media	Depósitos de ignimbrita, materiales poco consolidados y con alternancia de permeabilidad	Vegetación secundaria de Pino-Encino y cultivos de maíz	Algunas casas fueron dañadas, y la mayor parte de ellas están en áreas potenciales de inestabilidad	
Deslizamientos y flujos	Teziutlán, la Gloria	Andosol de textura media	Depósitos de ignimbrita, materiales poco consolidados y con alternancia de permeabilidad	Pinos y encinos con abundante vegetación secundaria	Colonia ubicada en una ladera muy inestable	
Caídos o derrumbes	Teziutlán, Xoloco	Andosol de textura media	Depósitos de ignimbrita, materiales poco consolidados y con alternancia de permeabilidad	Encinos con abundante vegetación secundaria	Colonia ubicada en una ladera muy inestable	

Deslizamiento traslacional y flujo	La Unión, Tlatlauquitepec	Andosol de textura media	Material: esquistos Observaciones: influencia antrópica debido a al cambio de uso de suelo forestal a agrícola en laderas abruptas.	Zona de cultivos de maíz, en la foto se observan algunos árboles que muy probablemente pertenezcan a la vegetación original	Daños a cultivos y caminos.	
Deslizamiento traslacional con componente rotacional	San José Chagchaltzin	Andosol de textura media	Material: Margas y esquistos. Observaciones: influencia antrópica debido a al cambio de uso de suelo forestal a agrícola.	Zona de cultivos de maíz, en la foto se observan algunos árboles que se encuentran a los costados del proceso	Destrucción de viviendas, la flecha indica donde se ubicaban, daños a cultivos y a la vía de comunicación entre la localidad del canal y la cabecera municipal de Tlatlauquitepec	

Deslizamiento La Estrella, proceso de tipo complejo	Zapotitlán de Méndez.	Luvisol textura de fina	Materiales de origen sedimentario que datan del Jurásico Superior y Medio,	Vegetación de encinos y arbustiva	Daños a vías de comunicación, en específico a la carretera principal.	
Deslizamiento complejo El Salto	Zapotitlán de Méndez de	Luvisol textura de fina	Materiales involucrados: limonitas y areniscas en combinación con depósitos piroclásticos del Terciario Superior.	Cultivos de café y vegetación arbustiva	Daños a viviendas e infraestructura urbana	
Reactivación de antiguo deslizamiento	Zacapoaxtla	Andosol de textura media	Materiales: volcánicos recientes (ignimbritas)	Vegetación formada por encinos y arbustos	Daños estructurales a casas formando grietas en la estructura de las construcciones, daños a vías de comunicación a causa del circo erosivo.	

Flujos de escombros	Zacapoaxtla	Andosol de textura media	Materiales: volcánicos recientes (ignimbritas)	Vegetación secundaria	Viviendas localizadas en áreas altamente susceptibles a procesos de remoción en masa	
Deslizamiento rotacional	Zacapoaxtla	Andosol de textura media	Materiales: volcánicos recientes (ignimbritas)	Vegetación secundaria	Viviendas localizadas en áreas altamente susceptibles a procesos de remoción en masa	
Flujo de lodo	Totomoxtla	Regosol de textura de media	Materiales: lutitas, calizas y limolitas	Cultivos de maíz y de café	Afortunadamente las viviendas no fueron dañadas, pero pueden ser sepultadas si ocurre otro movimiento similar	

Flujo de escombros	Totomoxtlala	Regosol textura de media	Materiales: lutitas, calizas y limolitas	Cultivos de maíz y de café	El impacto es solo en las áreas de cultivo	
Reactivación de deslizamiento de tipo rotacional	Pahuatlán	Regosol textura de media	Lutitas y materiales sedimentarios con alto grado de intemperismo	Vegetación secundaria, cultivos de maíz	Este pueblo está localizado en la corona de un deslizamiento antiguo por lo que el peligro es muy elevado	
Movimiento complejo	Carretera a Cuetzalan	Regosol textura de media	Materiales sedimentarios principalmente del tipo de las calizas cubiertos por depósitos de caída (ignimbríticos)	Pinos, encinos y cultivos de café	Impacto a la infraestructura y vías de comunicación	

Deslizamiento rotacional	Presa Necaxa	Regosol textura de media	Materiales sedimentarios	Pinos y encinos	Impacto a la infraestructura y vías de comunicación	
Deslizamiento traslacional	Zaragoza	Andosol de textura media	Materiales de caída sin consolidar (ignimbritas)	Vegetación secundaria y cultivos de maíz	Posible daño a las viviendas existentes	

Tabla 2.4.3.1. Caracterización de algunos de los procesos de remoción en masa más importantes de la Sierra Norte.

Tipo de movimiento	Tipo de material involucrado	Características geomorfológicas dominantes	Efecto de la vegetación	Observaciones
Desprendimientos	Rocas sedimentarias, principalmente calizas y lutitas	Relieve estructural denudatorio constituido por complejos montañosos de rocas sedimentarias diversas	El efecto de la vegetación en los desprendimientos es fundamentalmente de tipo adverso, ya que las raíces funcionan como palanca al penetrar por las diaclasas de las rocas facilitando la labor de remoción	Este tipo de movimientos esta asociado a la construcción de vías de comunicación como carreteras y terracerías, donde las modificaciones al paisaje crean un desequilibrio constante. En menor proporción también ocurren en laderas montañosas con gran pendiente
Vuelcos o desplomes	Rocas sedimentarias, principalmente calizas y lutitas	Relieve estructural denudatorio constituido por complejos montañosos de rocas sedimentarias diversas	La ocurrencia de este tipo de movimientos esta asociada de manera general a la ausencia de vegetación, o bien influenciada por la acción de las raíces en las diaclasas y grietas de las rocas existentes	Este tipo de movimientos es poco frecuente y en particular se asocia a escarpes con alto grado de intemperización
Deslizamientos	Depósitos de caída principalmente constituidos por ignimbritas Lutitas altamente intemperizadas	Relieve endógeno acumulativo del Cuaternario, principalmente asociado a rampas de ignimbritas Relieve estructural denudatorio constituido por complejos montañosos de rocas sedimentarias diversas	El efecto de la vegetación en los deslizamientos es muy complejo. De manera general se pudo observar que la ausencia de vegetación aumenta la infiltración y por ende la saturación de los materiales ocasionando inestabilidad. Lo anterior en los dos tipos de materiales involucrados	No es posible analizar con mayor detalle esta relación bajo la perspectiva de este trabajo de investigación, sin embargo, cabe mencionar que ya se están iniciando estudios detallados al respecto
Flujos	Depósitos de caída principalmente constituidos por ignimbritas	Relieve endógeno acumulativo del Cuaternario, principalmente asociado a rampas de ignimbritas	De acuerdo a las observaciones de campo, la incidencia de este tipo de movimientos es muy frecuente en zonas sin vegetación, lo cual se explica de igual forma por un incremento en la infiltración, y la consecuente saturación, de tal manera que la formación de fuentes de iniciación de flujos es común.	La movilidad de este tipo de movimientos, y por consecuencia su impacto, dependen de la cantidad de agua disponible, así como de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales involucrados
Complejo	Contactos litológicos entre depósitos volcánicos y rocas sedimentarias	Interacción entre el relieve endógeno acumulativo y el estructural denudatorio	El efecto de la vegetación en estos movimientos involucra procesos adversos en cuanto al incremento de infiltración derivada de la ausencia o modificación de la cobertura vegetal, así como de la acción de las raíces particularmente en la corona del movimiento	Por lo general los movimientos complejos ocasionan un gran impacto en el paisaje, de tal modo que es necesario tratar de analizar las posibles interacciones entre la vegetación y la inestabilidad en este tipo de procesos

Tabla 2.4.3.2. Análisis generalizado de la relación inestabilidad de laderas-vegetación de los movimientos observados en la Sierra Norte de Puebla.

Los deslizamientos ocurren tanto en relieve endógeno acumulativo del Cuaternario primordialmente asociado a rampas de ignimbritas, así como en los complejos montañosos de rocas sedimentarias. En ambos tipos de materiales, el papel de la vegetación se asocia al incremento de la infiltración como consecuencia de la ausencia o cambio de la cobertura vegetal, el cual está determinado por la permeabilidad contrastante de los diferentes depósitos de ignimbritas (asociados a diferentes episodios eruptivos), así como por el alto contenido de arcilla en los suelos derivados de las lutitas. De manera similar la ocurrencia de flujos en los materiales piroclásticos está directamente asociada a concentraciones de humedad derivadas tanto de la morfología existente, así como del contacto entre depósitos con diferente grado de permeabilidad.

Los mecanismos de los movimientos complejos implican la combinación de varios procesos mismos que pueden estar influenciados de manera diversa por el efecto de la vegetación desde una perspectiva mecánica e hidrológica. Mientras la presencia de raíces puede ser factor de inestabilidad mecánica en materiales de tipo rocoso, la presencia de vegetación en las superficies del terreno donde hay desarrollo de suelo puede influir considerablemente en la estabilidad de la zona. Consecuentemente el grado de desarrollo de la vegetación en las áreas correspondientes a contactos litológicos en zonas potencialmente inestables debe ser considerado de manera adecuada con la finalidad de evitar la ocurrencia de procesos de remoción en masa de tipo complejo, ya que las consecuencias asociadas suelen tener gran impacto no solo en los asentamientos humanos, sino también en el paisaje.

Durante los reconocimientos de campo fue posible observar una relación directa entre las áreas deforestadas o sujetas a cambios de uso de suelo, y la incidencia de inestabilidad de laderas.

El municipio de Teziutlán es un punto central de comercio y desarrollo en la Sierra Norte, por lo que el grado de inmigración de las áreas aledañas ha ocasionado el establecimiento de asentamientos humanos sin planeación alguna, por lo que en las zonas periféricas los niveles de vulnerabilidad son muy altos. En este sentido cabe destacar que el uso de suelo ha pasado en gran medida a ser de tipo agrícola, con la idea de cubrir las necesidades locales, además de funcionar como punto focal de venta de diversos productos. Las áreas forestales por consecuencia han disminuido en función de las necesidades y demandas de la población, alterando el paisaje natural y funcionando como factor determinante en la alta incidencia de problemas asociados a la inestabilidad de laderas.

De manera contrastante, en el municipio de Tlatlauquitepec, la tala de árboles esta destinada principalmente a la venta regional, por lo que la tala ilegal se lleva a cabo de manera bien organizada (por parte de los pobladores), de tal forma que es continua, y las autoridades correspondientes difícilmente toman las medidas necesarias para impedir y/o corregir esta situación.

Por otro lado, en el sur de Zapotitlán de Méndez, con la idea de poder utilizar el terreno para la siembra de café, los pobladores dañan con machetes la corteza de los árboles, de tal forma que la salud de estos se ve afectada, hasta que se secan por completo, como consecuencia el hecho de removerlos del terreno, no implica un proceso de deforestación ni tampoco una sanción legal. Lo anterior da pauta a que considerables extensiones de vegetación natural, sean constantemente transformadas en áreas agrícolas, y se conviertan de esta manera, en zonas susceptibles no solo a erosión, sino también a proceso de remoción en masa.

Zacapoxtla se encuentra localizado en el parteaguas de una meseta constituida principalmente de depósitos de ignimbritas derivadas de la actividad de la caldera de los Humeros, que sobreyacen materiales sedimentarios Cretácicos, principalmente del tipo de las calizas. Dicha morfología ha dado lugar al desarrollo de barrancos en las márgenes de la meseta, mismos que han sido objeto de la expansión de asentamientos humanos, de tal forma que la vegetación en el área se ha reducido considerablemente en la región, y de manera contraria, la inestabilidad de laderas se ha intensificado.

De manera similar en el municipio de Zacatlán, el cambio de uso del suelo, así como el crecimiento de los asentamientos humanos ha jugado un papel muy importante en la distribución espacial de procesos de remoción en masa, de tal manera que a pesar de haber considerado la implementación de planes de aprovechamiento forestal, la tala clandestina e irregular ha intensificado el impacto de procesos tanto erosivos como gravitacionales.

Con las observaciones de campo fue posible corroborar los resultados obtenidos a través de las imágenes de satélite en función de la relación espacio-temporal de la inestabilidad de laderas y el cambio de uso del suelo. En particular se resaltó la tendencia general de la región de la Sierra Norte de Puebla a sufrir un proceso de deforestación y cambio de uso del suelo asociado principalmente a la creación de espacios agrícolas derivados de las necesidades de una

población en expansión y con alto nivel de vulnerabilidad. Por otro lado fue posible corroborar la existencia de zonas inestables vinculadas a los cambios de uso del suelo arriba mencionados. Sin embargo, es importante comentar que la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el área de estudio esta determinada de manera natural por el tipo de materiales presentes en la zona, por el relieve local y por el régimen hidrológico imperante, en tanto que la influencia humana ha intensificado este tipo de procesos, lo cual en combinación con el alto grado de vulnerabilidad de la población de los municipios involucrados ha creado condiciones de riesgo alto, y consecuentemente con un gran potencial para la ocurrencia de desastres.

Las observaciones anteriores representan sin lugar a dudas una llamada de atención al papel que juega el ser humano en la modificación del paisaje, el cual no solo rompe el equilibrio natural del mismo, sino que crea las condiciones necesarias para que el impacto de fenómenos naturales de distinta índole, tales como los procesos de remoción en masa, tengan un gran impacto en las poblaciones, lo cual frecuente y desafortunadamente incluye la pérdida de vidas y bienes materiales ocasionando desastres, de los cuales difícilmente comunidades con altos niveles de vulnerabilidad –como las existentes en la Sierra Norte de Puebla- se pueden recuperar.

2.4.4. Aproximaciones en el estudio de la relación inestabilidad-vegetación

Dada la complejidad de la relación vegetación-inestabilidad, existen diferentes técnicas empleadas para analizar dicho proceso. El grado de precisión y complejidad de las mismas está en función de los medios disponibles y los objetivos concretos de cada investigación. Las investigaciones realizadas incluyen correlaciones estadísticas, estudios cuantitativos basados en los conceptos de equilibrio límite de mecánica de suelos, análisis del factor de seguridad considerando la fuerza de las raíces, análisis y simulación de erosión, análisis del papel de reforzamiento de las raíces en la estabilidad del suelo, la influencia de la vegetación en movimientos del suelo afectando cimentaciones de edificios, entre otros (Suárez, 1984). Todas ellas, en función del enfoque disciplinario en cuestión.

Uno de los enfoques más utilizados en el estudio de la relación vegetación-inestabilidad de las laderas es el análisis de los cambios de uso de suelo en una región dada y su relación con los procesos de remoción en masa. Glade (2003), presenta una reseña de la respuesta geomorfológico a procesos antrópicos asociados a cambios de uso del suelo a partir de 1840

población en expansión y con alto nivel de vulnerabilidad. Por otro lado fue posible corroborar la existencia de zonas inestables vinculadas a los cambios de uso del suelo arriba mencionados. Sin embargo, es importante comentar que la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el área de estudio esta determinada de manera natural por el tipo de materiales presentes en la zona, por el relieve local y por el régimen hidrológico imperante, en tanto que la influencia humana ha intensificado este tipo de procesos, lo cual en combinación con el alto grado de vulnerabilidad de la población de los municipios involucrados ha creado condiciones de riesgo alto, y consecuentemente con un gran potencial para la ocurrencia de desastres.

Las observaciones anteriores representan sin lugar a dudas una llamada de atención al papel que juega el ser humano en la modificación del paisaje, el cual no solo rompe el equilibrio natural del mismo, sino que crea las condiciones necesarias para que el impacto de fenómenos naturales de distinta índole, tales como los procesos de remoción en masa, tengan un gran impacto en las poblaciones, lo cual frecuente y desafortunadamente incluye la pérdida de vidas y bienes materiales ocasionando desastres, de los cuales difícilmente comunidades con altos niveles de vulnerabilidad –como las existentes en la Sierra Norte de Puebla- se pueden recuperar.

2.4.4. Aproximaciones en el estudio de la relación inestabilidad-vegetación

Dada la complejidad de la relación vegetación-inestabilidad, existen diferentes técnicas empleadas para analizar dicho proceso. El grado de precisión y complejidad de las mismas está en función de los medios disponibles y los objetivos concretos de cada investigación. Las investigaciones realizadas incluyen correlaciones estadísticas, estudios cuantitativos basados en los conceptos de equilibrio límite de mecánica de suelos, análisis del factor de seguridad considerando la fuerza de las raíces, análisis y simulación de erosión, análisis del papel de reforzamiento de las raíces en la estabilidad del suelo, la influencia de la vegetación en movimientos del suelo afectando cimentaciones de edificios, entre otros (Suárez, 1984). Todas ellas, en función del enfoque disciplinario en cuestión.

Uno de los enfoques más utilizados en el estudio de la relación vegetación-inestabilidad de las laderas es el análisis de los cambios de uso de suelo en una región dada y su relación con los procesos de remoción en masa. Glade (2003) presenta una reseña de la respuesta geomorfológico a procesos antrópicos asociados a cambios de uso del suelo a partir de 1840

en Nueva Zelanda. Investigaciones de Gerrard y Gardner (2002), desarrolladas en Nepal, sugieren que el impacto de la deforestación en la pérdida de suelo por deslizamientos no solo está dada por el proceso en sí mismo, sino por el tipo de manejo del suelo que se desarrolle de manera posterior a la deforestación. De acuerdo con sus resultados, se presentaron mayores problemas en terrazas abandonadas después de la deforestación, que en aquellas donde se cultivó arroz, después de haber sido deforestadas. Otro caso concreto es el presentado para la región de Basilicata en Italia por Oliver (1993), quien sugiere que aunado a las características geológicas, tectónicas y climáticas de esta región, el cambio de uso de suelo ha sido la causa fundamental en la ocurrencia de deslizamientos en áreas urbanas.

En el caso de México, se cuenta con pocas investigaciones que precisen la relación inestabilidad de laderas-vegetación. Entre ellas cabe destacar un análisis de cambio de uso del suelo, y su incidencia en la ocurrencia y distribución de deslizamientos en el área del Tajín, Veracruz (Oropeza *et al.*, 2003).

La introducción del uso de sistemas de información geográfica y percepción remota también se ha implementado con la idea de analizar el impacto de la deforestación en la inestabilidad de las laderas, aunque cabe señalar que de manera similar a los trabajos antes citados, se han enfocado fundamentalmente a resolver dicha tarea en función del análisis del cambio de uso del suelo. Por ejemplo, para la cuenca Tirajana en Gran Canaria, España, Barredo *et al.* (2000), elaboraron un mapa de susceptibilidad a procesos de ladera a partir de técnicas multicriterio en una plataforma de SIG. En este mismo sentido, de acuerdo con Singh (1998), los cambios de cubierta vegetal, en combinación con la presencia de eventos extremos, deben ser analizados de forma adecuada con la finalidad de entender la posible respuesta ecológica e hidrológica al cambio global, a través del manejo integral de cuencas, lo cual incluye, la inestabilidad de las laderas.

Con relación a la percepción remota cabe destacar que diversos autores se han dado a la tarea de analizar la correlación entre diversos factores que determinan la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Entre ellos está el trabajo de De la Ville *et al.* (2002), que a través del empleo de imágenes IKONOS elaboraron un análisis del impacto de distintos deslizamientos desde un enfoque de manejo sustentable de una región en Venezuela. Su y Stohr (2000) desarrollaron un inventario de deslizamientos de las áreas aledañas a los ríos Mississippi y Ohio al sur de Illinois a través de imágenes de radar SLAR, en tanto que Eyers *et al.* (1998),

en Nueva Zelanda. Investigaciones de Gerrard y Gardner (2002) desarrolladas en Nepal, sugieren que el impacto de la deforestación en la pérdida de suelo por deslizamientos no solo está dada por el proceso en sí mismo, sino por el tipo de manejo del suelo que se desarrolle de manera posterior a la deforestación. De acuerdo con sus resultados, se presentaron mayores problemas en terrazas abandonadas después de la deforestación, que en aquellas donde se cultivó arroz, después de haber sido deforestadas. Otro caso concreto es el presentado para la región de Basilicata en Italia por Oliver (1993), quien sugiere que aunado a las características geológicas, tectónicas y climáticas de esta región, el cambio de uso de suelo ha sido la causa fundamental en la ocurrencia de deslizamientos en áreas urbanas.

En el caso de México, se cuenta con pocas investigaciones que precisen la relación inestabilidad de laderas-vegetación. Entre ellas cabe destacar un análisis de cambio de uso del suelo, y su incidencia en la ocurrencia y distribución de deslizamientos en el área del Tajín, Veracruz (Oropeza *et al.*, 2003).

La introducción del uso de sistemas de información geográfica y percepción remota también se ha implementado con la idea de analizar el impacto de la deforestación en la inestabilidad de las laderas, aunque cabe señalar que de manera similar a los trabajos antes citados, se han enfocado fundamentalmente a resolver dicha tarea en función del análisis del cambio de uso del suelo. Por ejemplo, para la cuenca Tirajana en Gran Canaria, España, Barredo *et al.* (2000), elaboraron un mapa de susceptibilidad a procesos de ladera a partir de técnicas multicriterio en una plataforma de SIG. En este mismo sentido, de acuerdo con Singh (1998), los cambios de cubierta vegetal, en combinación con la presencia de eventos extremos, deben ser analizados de forma adecuada con la finalidad de entender la posible respuesta ecológica e hidrológica al cambio global, a través del manejo integral de cuencas, lo cual incluye, la inestabilidad de las laderas.

Con relación a la percepción remota cabe destacar que diversos autores se han dado a la tarea de analizar la correlación entre diversos factores que determinan la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Entre ellos está el trabajo de De la Ville *et al.* (2002) que a través del empleo de imágenes IKONOS elaboraron un análisis del impacto de distintos deslizamientos desde un enfoque de manejo sustentable de una región en Venezuela. Su y Stohr (2000) desarrollaron un inventario de deslizamientos de las áreas aledañas a los ríos Mississippi y Ohio al sur de Illinois a través de imágenes de radar SLAR, en tanto que Eyers *et al.* (1998)

utilizaron imágenes Landsat TM y SPOT con la finalidad de elaborar la cartografía de la tipología de diversos procesos de remoción en masa en el sur de España.

Para el caso de la Sierra Norte de Puebla, en el siguiente capítulo se realiza un análisis espacio-temporal de la cubierta vegetal a través de la comparación de la cartografía de los inventarios forestales nacionales de 1994 y 2000 con la idea de delimitar áreas que presenten deforestación, y posteriormente correlacionarlas con la distribución espacial de los procesos de ladera ocurridos durante octubre de 1999. Todo lo anterior a través del empleo de un sistema de información geográfica.

Finalmente con la idea de precisar de mejor manera el análisis establecido, se hace una evaluación de la relación presencia/ausencia de vegetación con la estabilidad/inestabilidad de laderas a través del análisis de imágenes de satélite de distintos periodos, esto es de fechas anteriores y posteriores al evento de precipitación extraordinaria de octubre de 1999, que desencadenó cientos de procesos de remoción.

CAPITULO III DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA Y SU RELACIÓN CON LA INESTABILIDAD DE LAS LADERAS.

3.1 Introducción

El contar con un seguimiento o cuantificación de las áreas forestales es un factor de suma importancia para analizar el impacto de la distribución y el estado de dichas áreas en distintos procesos de índole geomorfológico tales como inundaciones e inestabilidad de las laderas. Adicionalmente, la administración de los recursos forestales, requiere del conocimiento preciso de localización y cuantía de los cambios existentes.

En el caso de México, debido a su localización geográfica, existen tres ecosistemas mundialmente reconocidos (SARH, 1992): bosques, selvas y desiertos, por lo que es necesario conocer la dinámica de las áreas vegetales en el territorio nacional. Dado lo anterior, en nuestro país se han elaborado diferentes trabajos con la finalidad de tener un conocimiento general de las superficies forestales, dichos trabajos son:

- Primer inventario forestal (1961-1985)
- Cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI (1968-1986)
- Cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI (1990)
- Inventario forestal de gran visión (1990)
- Inventario nacional forestal periódico (1992-1994)
- Inventario nacional forestal periódico (1999-2000)

Desafortunadamente existen muchas dificultades para efectuar comparaciones entre la información resultante de cada trabajo, debido principalmente a la gran variedad de metodologías utilizadas para su elaboración, por lo que en algunos casos la información es imposible de comparar. Por ejemplo, para la elaboración del primer inventario forestal (1961-1985) se necesitaron 24 años, de tal manera que el grado de actualización lo convirtió en obsoleto.

Más adelante, en 1990, se intentó actualizar la información con el proyecto de un nuevo inventario utilizando técnicas innovadoras como la teledetección, siendo el inventario nacional forestal de gran visión a escala 1: 1000 000 el resultado de dicha labor (SARH,

1992). Sin embargo, cabe señalar que el empleo de inventarios sigue teniendo problemas al hacer la comparación de datos.

La cartografía elaborada por INEGI de uso de suelo y vegetación para el año de 1986 se elaboró con base en la interpretación de fotografías aéreas entre los años 1968 y 1986, así como de una intensa labor de campo. (*Idem.*) El sistema clasificatorio es muy detallado, ya que comprende más de 600 clases que consideran los diferentes tipos de vegetación en función a criterios de fisonomía, florística, fenología y estado de conservación, de los tipos del suelo, así como de la presencia de erosión. A pesar de que no existe una evaluación cuantitativa de la confiabilidad de esta cartografía, generalmente se acepta que los datos son de buena calidad, el resultado de esta última (cartografía de INEGI 1968-1986) fue una serie de datos a escala 1: 250,000. Posteriormente, a principios de los 90's, el INEGI efectuó una actualización de la cartografía del año de 1986, a partir de la interpretación visual de espacio mapas. Los espacio mapas fueron derivados de la composición a color de imágenes de satélite LANDSAT TM (combinación de bandas del infrarrojo y visible 4, 3, 2) impresos a escala 1: 250,000, siendo que el sistema clasificatorio es aún más detallado que el anterior con aproximadamente 60 categorías (SARH, 1992).

Después, entre los años de 1992 y 1994 se realizó la cartografía del Inventario Forestal Nacional Periódico bajo la dirección del Instituto de Geografía de la UNAM y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1992). Para la realización de este trabajo se actualizó la cartografía del INEGI con base en el análisis visual de 74 imágenes de satélite LANDSAT TM, no obstante, esta actualización fue parcial ya que no se contaba con la cobertura completa de imágenes para todo el territorio nacional (SARH, 1992)

Por último, se realizó el inventario forestal nacional periódico del año 2000, el cual fue realizado a partir de la interpretación visual de imágenes de satélite LANDSAT ETM+ impresas, dando como resultado una estructura y categoría de la leyenda diferente a la del inventario forestal de 1994 (SARH, 1992).

Consecuentemente, la diversidad de objetivos, criterios y de escalas empleadas en la elaboración de la cartografía de uso de suelo y vegetación o de inventarios forestales ha complicado la realización de comparaciones, por ejemplo, en algunos casos se enfatiza en la vegetación potencial, otros enfatizan en la cobertura vegetal real del terreno. Esta

actividad comparativa, sin embargo, es imprescindible para múltiples fines entre los que destacan, el análisis del cambio de uso de suelo y las políticas de manejo prioritarias, conservación y restauración de los recursos naturales en general (Palacio *et al.*, 2000).

La existencia de este tipo de información es un elemento importante para la realización de diversos trabajos, aunque debido a las técnicas utilizadas no sean del todo compatibles con respecto a la nomenclatura y métodos utilizados. Esto no significa que los trabajos no tengan relevancia, pues son imprescindibles para la obtención de información de distintos procesos tales como el de la deforestación. Con relación al procesos de deforestación importante llevar un seguimiento, ya que su incremento implica el aceleramiento de otros grandes problemas como la reducción de la fauna y la erosión de suelos, entre otros.

En particular, la comparación de la información de los inventarios forestales se convierte en un asunto fundamental para la elaboración de análisis multitemporales en el proceso de deforestación en la Sierra Norte de Puebla.

3.2 Inventario Forestal Nacional (1992-1994)

Al carecer de información actualizada y detallada de la cuantificación y localización de las áreas forestales en nuestro país; se tuvo la necesidad de desarrollar un inventario de los recursos forestales en el año de 1992, SARH, (1992). De esta manera surge el proyecto de construir el Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994 por parte de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en colaboración con la Secretaría Forestal y de Fauna Silvestre y la Universidad Nacional Autónoma de México. Los objetivos y aplicaciones centrales del inventario forestal fueron, actualizar la información estadística y cartográfica de la superficie forestal; determinar la posibilidad de producción de madera en forma sostenible; clasificar y delimitar las zonas de conservación, restauración y producción en los terrenos forestales; y establecer un sistema permanente de actualización de la información. Sin embargo, existen otras aplicaciones de la información proporcionada por los inventarios; como el propósito del presente trabajo, de obtener un monitoreo de la dinámica forestal en un año base; esto con el fin de realizar comparaciones con posteriores inventarios como el elaborado en el año 2000.

El inventario forestal de 1994 consta de un sistema de información en formato digital e impreso en papel, contando con 122 mapas forestales a escala 1: 250, 000 diferenciando 40 tipos de vegetación y uso del suelo; incluye también un atlas con 8 mapas nacionales

de la situación forestal del país. De esta manera se obtienen resultados de una diferenciación de 40 tipos de vegetación (Anexo 1).

Inventario Forestal 1994 para la Sierra Norte de Puebla

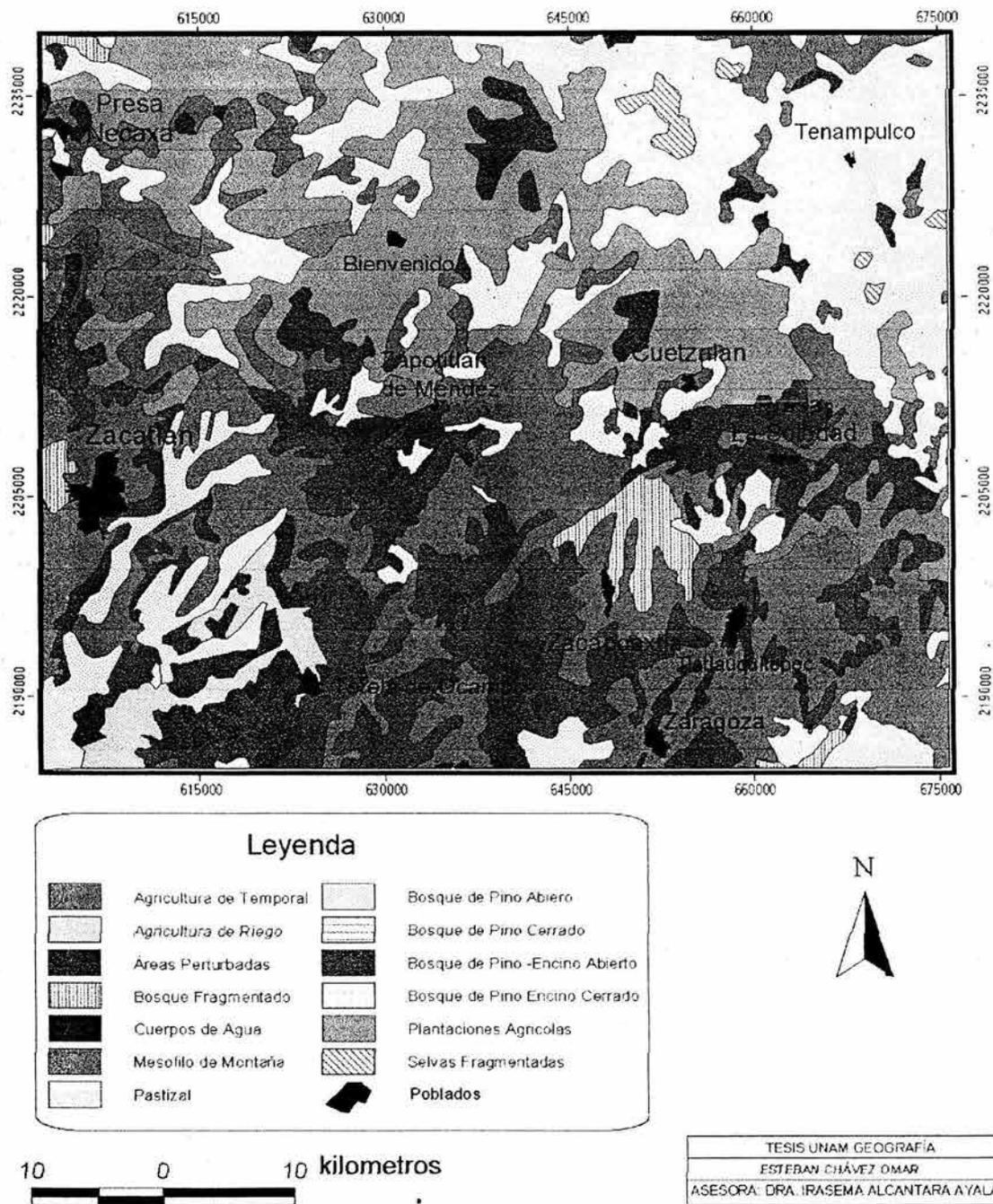


Figura 3.2.1. Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994 (SARH, 1994).

Aunque existen 40 tipos de vegetación que contempla el inventario forestal de 1994, en la Sierra Norte de Puebla solo existen la agricultura de riego, agricultura de temporal, áreas perturbadas, bosques fragmentados, bosque mesofilo de montaña, pastizal, pino abierto, pino cerrado, pino-encino abierto, pino-encino cerrado, plantación agrícola y selvas fragmentadas, esto de acuerdo con dicho inventario; la distribución de estas clases se puede observar en la Figura 3.2.1.

Con la finalidad de conocer la dinámica de la superficie forestal a través de la comparación de los inventarios forestales nacionales existentes, fue necesario hacer una generalización de las clasificaciones de vegetación y de uso del suelo manejadas en dichos documentos, lo anterior en función de la diferencia de nomenclaturas y clasificaciones de la vegetación empleadas. De tal manera que debido a la necesidad de contar con los datos de incremento o disminución de la vegetación durante un período específico de tiempo, de forma visual se realizó una nueva clasificación general (Tabla 3.2.1).

Clasificación del Inventario 1994	Clasificación generalizada
BOSQUES Mesófilo de montaña Encino Pino encino Pino Oyamel Otras coníferas (bosque abierto) (bosque cerrado) Bosque fragmentado	BOSQUE
SELVAS Alta y mediana Baja Selva fragmentada	SELVAS
MATORRALES Subtropical Submontano Xerófito Espinosos tamaulipeco ARBUSTOS Mezquital y huizachal Chaparral	MATORRALES
VEGETACIÓN HIDRÓFILA Manglares Otros tipos de vegetación hidrófila	VEGETACIÓN HIDRÓFILA
OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN Sabana Palmar Vegetación de galería Vegetación halófila Vegetación de desiertos arenosos Vegetación de dunas costeras	OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN
USO AGROPECUARIO Agricultura (riego) y (temporal) Plantaciones (forestal) y (agrícola)	AGRICOLA
Pastizales	PASTIZALES
OTROS Áreas desprovistas de vegetación Cuerpos de agua Zonas urbanas	CUERPOS DE AGUA Y ASENTAMIENTOS HUMANOS

Tabla 3.2.1. Generalización de la clasificación de vegetación para 1994.

La clasificación generalizada que nos muestra la tabla anterior se elaboró con el objetivo de crear una nomenclatura que nos permita tener información sintetizada de los diferentes tipos de vegetación, además de una cierta compatibilidad, con la idea de poder visualizar en el mapa los polígonos que muestren la distribución de bosques, selvas, pastizales, agricultura y asentamientos humanos (figura 3.2.2).

Clasificación Generalizada del Inventario Forestal 1994 para la Sierra Norte de Puebla

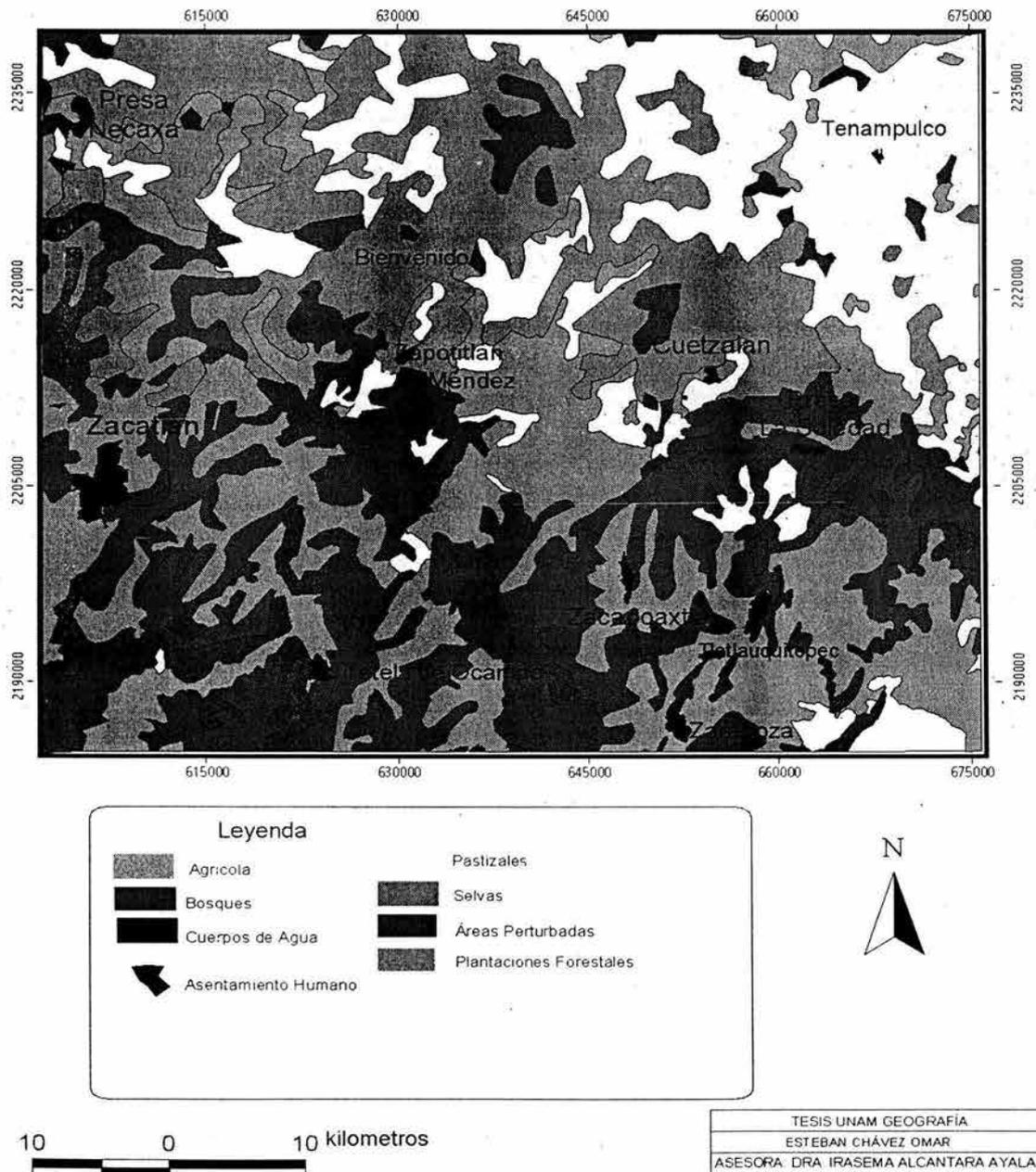


Figura 3.2.2 Clasificación Generalizada del Inventario Forestal 1994, en la Sierra Norte de Puebla.

De acuerdo con el inventario nacional forestal periódico 1994, El área de estudio presenta los siguientes tipos de vegetación arbórea: bosque mesófilo de montaña, pino (bosque cerrado), pino (bosque abierto), pino encino (bosque abierto), pino encino (bosque abierto), bosque fragmentado; estos tipos de vegetación se encuentran principalmente en la parte sur de la Sierra Norte de Puebla y fueron reclasificados como bosques esto con la intención de elaborar comparaciones y observar el avance del proceso de deforestación en el área.

Cabe destacar que algunas de las clasificaciones que realiza el inventario forestal, contemplan cierto grado de deforestación como es el caso de los bosques fragmentados y selvas fragmentadas (Anexo 1). Sin embargo, este grado de afectación es heterogéneo ya que los manchones de la vegetación original se encuentran distribuidos de manera homogénea en el terreno y se vislumbra que puede existir una recuperación de manera natural.

Los restantes tipos de vegetación que presenta el sitio de estudio, según el inventario nacional forestal periódico 1994 son: agricultura de temporal, agricultura de riego y plantaciones forestales; los cuales se clasificaron como áreas agrícolas; pastizales, y áreas perturbadas, este último representa de alguna manera la deforestación, ya sea por el cambio de uso de suelo o por los desmontes de los bosques y selvas (SARH, 1994).

3.3 Inventario Forestal Nacional (1999-2000)

Con el propósito de tener información actualizada y un seguimiento de la dinámica forestal, la SEMARNAP y el Instituto de Geografía de la UNAM, elaboraron el inventario forestal del año 2000. De igual manera que los inventarios anteriores se obtuvo cartografía a escala 1:250 000, la diferencia de este nuevo inventario forestal con la de los demás es que se implementa un sistema jerárquico, el cual permite cambiar del nivel micro (alta resolución) al macro (baja resolución), argumentando la compatibilidad con los mapas realizados por INEGI, tipificación de los ecosistemas, una organización jerárquica de la vegetación que incluye criterios definidos para cada nivel de agregación y una representación objetiva de la dinámica de la vegetación por incluir clases en continua transformación (Palacio *et al.*, 2000).

De acuerdo con Palacio *et al.* (2000), la metodología utilizada en la elaboración del inventario forestal 2000, no solo busca una compatibilidad con los trabajos anteriores, pues el avance de la tecnología proporciona nuevas herramientas y materiales que optimizaron la elaboración del inventario permitiendo una mejor clasificación e interpretación de los datos.

La interpretación de los datos para la realización de este inventario fue de tipo visual y no automatizada, tomando en consideración diversos elementos tales como: la evaluación de la respuesta espectral de los objetos sobre las imágenes; comparación de lo anterior con los datos proporcionados por los mapas digitales de INEGI (serie II), agregados a la leyenda de este inventario, e impresos en acetatos; utilización de criterios provenientes de fuentes complementarias (mapa de clima, suelo, relieve, etc., y publicaciones científicas); actualización de las unidades de INEGI mencionadas, mediante redefiniciones de contactos entre polígonos o reetiquetamiento y definición de la unidad mínima mapeable a comunidades vegetales de aproximadamente 1 km² en el terreno. Este último criterio para la interpretación de las imágenes permite tener una buena resolución espacial, además de una definición de fronteras de vegetación más detallada.

De esta manera se obtuvieron resultados de una diferenciación de varios tipos de vegetación (Anexo 2).

Inventario Forestal 2000 para la Sierra Norte de Puebla

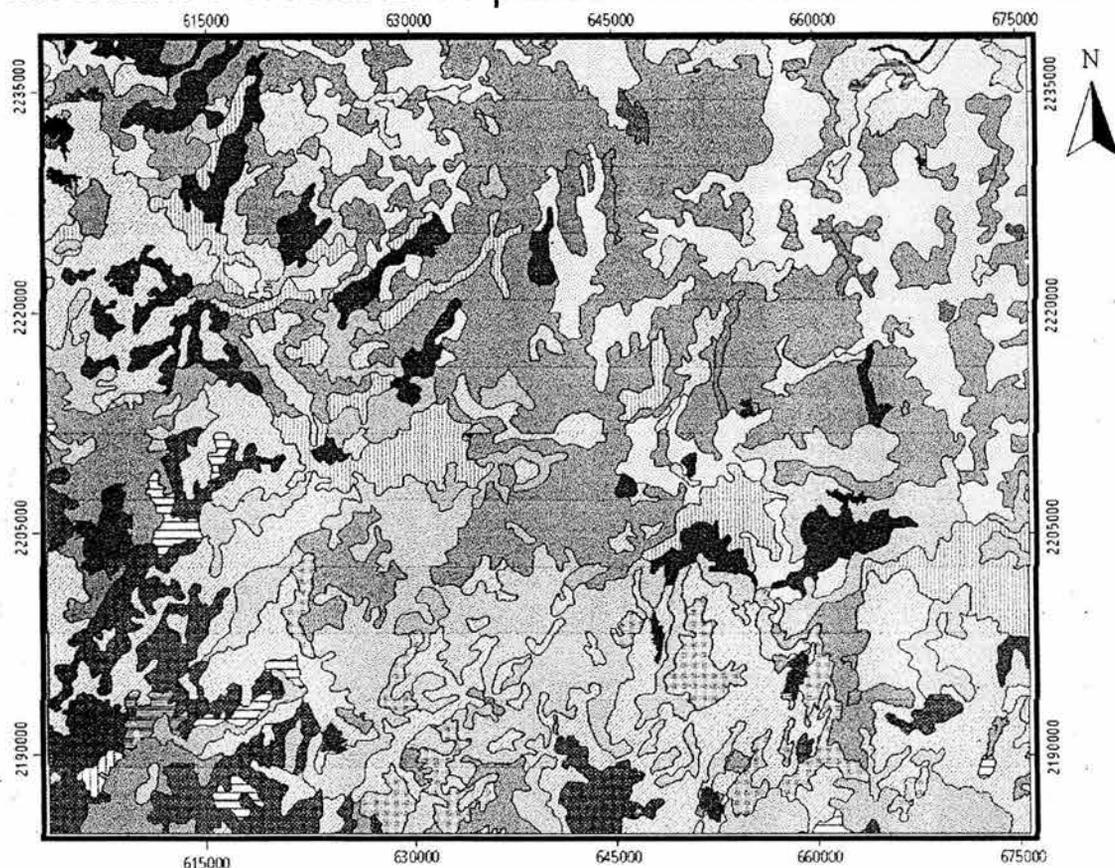


Figura 3.3.1 Inventario Nacional Forestal Periódico 2000.

El nuevo inventario presenta una distribución de la vegetación muy similar a la del 94 (Figura 3.3.1), pero la nomenclatura (Tabla 3.3.1) y las superficies correspondientes a cada clasificación difieren por ser elaborados con distintas metodologías.

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo
I Cultivo	Agricultura (riego y humedad) Agricultura (de temporal) ¹ Plantación forestal
II Bosques	Coníferas ^{2,3} Coníferas latifoliadas ^{2,3} Latifoliadas ^{2,3} Bosque Mesófilo de Montaña ^{2,3}
III Selvas	Perennifolia y subperennifolia ^{2,3} Caducifolia y subcaducifolia ^{2,3}
IV Matorral	Mezquital ^{2,3} Matorral Xerófilo ^{4,5}
V Pastizal	Pastizal
VI Vegetación hidrófila	Vegetación hidrófila
VII Otros tipos de vegetación	Otros tipos de vegetación Áreas sin vegetación aparente
VIII Otras coberturas	Asentamiento humano Cuerpo de agua
1. - Incluye dos categorías: con cultivos anuales o con cultivos permanentes y semi-permanentes. 2. - Incluye vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea en una sola categoría. 3. - Incluye las comunidades con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. 4. - Se refiere a las comunidades de matorrales con vegetación primaria. 5. - Incluye la vegetación secundaria derivada de la alteración de los matorrales	

Tabla 3.3.1. Leyenda utilizada en el inventario forestal 2000. En total se consideraron 75 categorías organizadas en cuatro niveles. Aquí solo se describen los dos niveles superiores.

De acuerdo con el inventario nacional forestal periódico 2000 el área de estudio cuenta con los tipos de vegetación que se muestran en la Tabla 3.3.2

Cultivo	Agricultura de riego (incluye riego eventual). Agricultura de temporal con cultivos anuales. Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes.
Bosques	Bosque de encino. Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. Bosque de oyamel (incluye ayarin y cedro) con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. Bosque de pino. Bosque de pino con vegetación secundaria. Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. Bosque mesofilo de montaña. Bosque mesofilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.
Selvas	Selva alta y mediana perennifolia Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.
Pastizales	Pastizal cultivado Pastizal inducido
Otros	Cuerpos de agua Asentamientos humanos

Tabla 3.3.2 Tipos de vegetación existentes en la Sierra Norte de Puebla de acuerdo al inventario forestal 2000.

La diferencia de metodologías y clasificaciones hacen que los inventarios sean incompatibles pero de acuerdo con Palacio, (2000) puede existir una cierta correspondencia entre ambos (Tabla 3.3.4), aunque esta se debe de manejar con cuidado.

INF 1992-1994	INF 2000-2001
Ecosistema	Formación
Bosques (Bosques y bosque mesófilo) menos (plantación forestal y bosque de galería) 31,730,377ha (16.1%)	Bosques 32850691 ha (16.92%)
Selvas (Selva alta y mediana y selva baja) menos (matorral subtropical) 19672,420 ha (10.0%)	Selvas 30734,896 ha (15.89%)
Matorral (vegetación de zonas áridas menos matorral subtropical) 55542,750 ha (28.2%)	Matorral 55451,788 ha (28.55%)
Vegetación Hidrófila 1115,203 ha (0.1%)	Vegetación Hidrófila (vegetación hidrófila menos manglar y vegetación de galería) 1072,933 ha (0.55%)
Palmar y vegetación halófila 3149,989 ha (1.6 %)	Otros tipos de vegetación (otros tipos de vegetación menos vegetación de dunas costeras) 6065,133 ha (3.1%)

Tabla 3.3.4. Correspondencia entre inventarios 1994 y 2000.

Como se puede observar la correspondencia entre los inventarios está en función de la nomenclatura manejada, ya sea por formación o ecosistema. Otro de los factores que se puede observar claramente es la diferencia de las superficies para cada clasificación, pues el inventario forestal del 94 contempla una menor extensión para cada clasificación. Esto ocasiona que se perciba un aumento en toda la cubierta forestal. No obstante, la realidad es otra, pues las cifras del proceso de deforestación mencionadas en el capítulo anterior demuestran una disminución de los recursos forestales en el ámbito nacional. Sin embargo, esto no quiere decir que la comparación entre los inventarios sea errónea, pues ofrece la posibilidad de tener una primera evaluación de los recursos forestales y de esta manera después contemplar otros factores como la escala en la que se trabaje, distribución de las áreas forestales y la acelerada actividad económica forestal que presentan algunos estados de la república. De esta manera la correspondencia de los inventarios proporciona la posibilidad de aplicar la clasificación generalizada que se

empleó en el inventario del 94, con el fin de observar el cambio y distribución de la cubierta forestal en el área de estudio. De esta manera se clasificó en agrícola, bosque, selva, pastizal, otros tipos de vegetación, asentamientos humanos y cuerpos de agua (tabla 3.3.5).

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Clasificación Generalizada
I Cultivo	Agricultura (riego y humedad) Agricultura (de temporal) ¹ Plantación forestal	Agrícola
II Bosques	Coníferas ^{2,3} Coníferas latifoliadas ^{2,3} Latifoliadas ^{2,3} Bosque Mesófilo de Montaña ^{2,3}	Bosques
III Selvas	Perennifolia y subperennifolia ^{2,3} Caducifolia y subcaducifolia ^{2,3}	Selvas
IV Matorral	Mezquital ^{2,3} Matorral Xerófilo ^{4,5}	Matorral
V Pastizal	Pastizal	Pastizal
VII Otros tipos de vegetación	Otros tipos de vegetación Áreas sin vegetación aparente	Otros tipos de vegetación
VIII Otras coberturas	Asentamiento humano Cuerpo de agua	Asentamientos Humanos y Cuerpos de Agua.
1. - Incluye dos categorías: con cultivos anuales o con cultivos permanentes y semi-permanentes. 2. - Incluye vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea en una sola categoría. 3. - Incluye las comunidades con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. 4. - Se refiere a las comunidades de matorrales con vegetación primaria. 5. - Incluye la vegetación secundaria derivada de la alteración de los matorrales		

Tabla 3.3.5 Generalización de la clasificación de vegetación para el inventario forestal del 2000.

El implemento de esta generalización de las clasificaciones de vegetación permite definir las áreas de cubierta forestal para el año 2000; dicha distribución se aprecia en la Figura 3.3.2 De acuerdo con el mapa obtenido, lo que se considera área forestal (bosques y selvas) ocupó 31.87%, en tanto que la vegetación restante 67.95%. Al comparar estos datos con los obtenidos en el inventario forestal de 1994 se aprecia lo que puede considerarse como una tendencia de desarrollo de áreas forestales, ya que para ese año la superficie forestal fue de tan solo 21.81%, en tanto que en el 2000 se calculó en 31.87%. A este respecto cabe señalar que dichos cálculos tienen un grado de incertidumbre asociado a las metodologías empleadas para la elaboración de ambos inventarios, así como de las fuentes de información utilizadas y la calidad del proceso de

digitación de polígonos que representan la cubierta vegetal. En particular fue posible observar que las áreas de los polígonos variaron considerablemente aún en los cuerpos de agua para ambas fechas, siendo la del 2000 la más detallada y precisa.

Clasificación Generalizada del Inventario Forestal 2000 para la Sierra Norte de Puebla

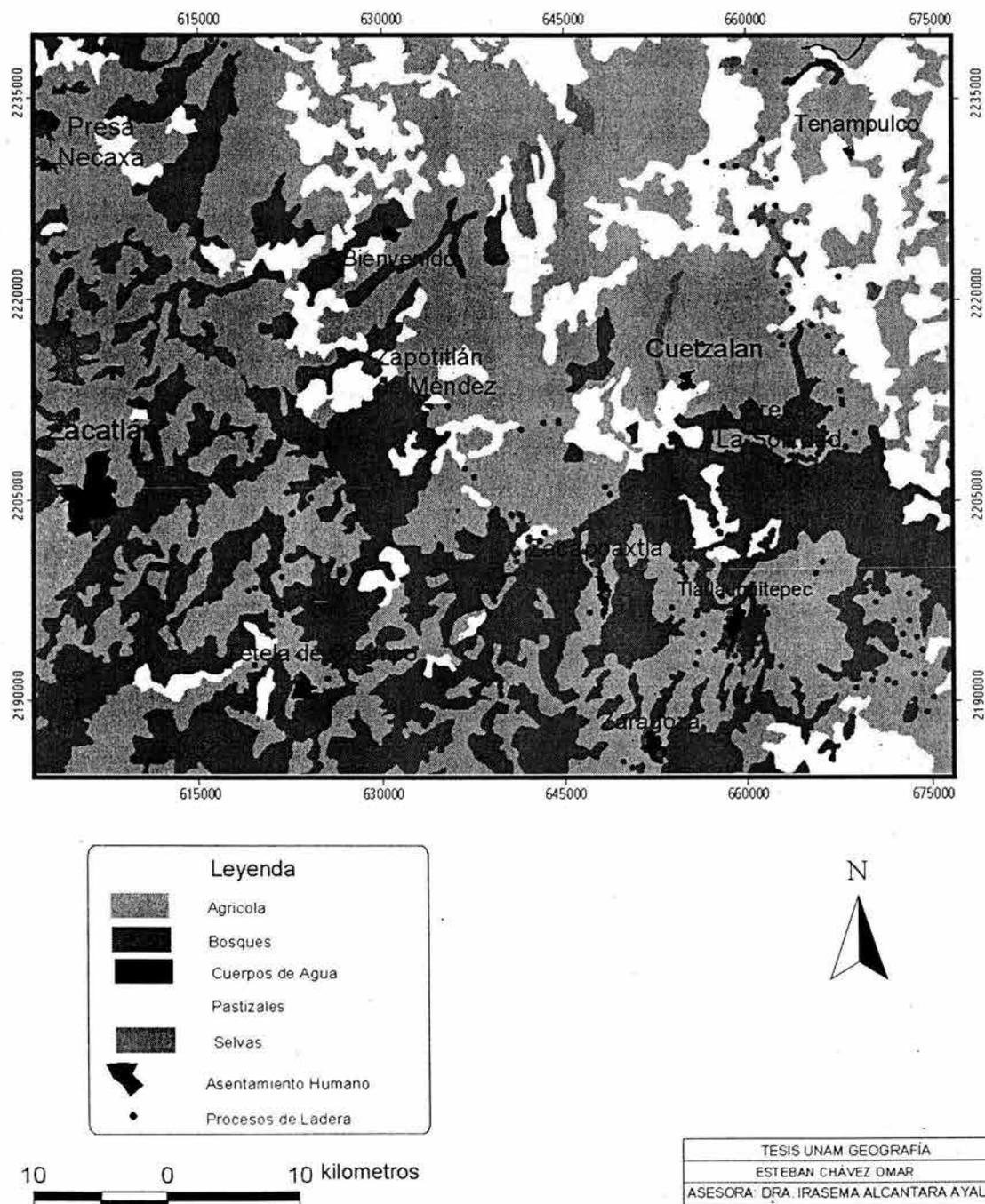


Figura 3.3.2 Generalización de la vegetación en la Sierra Norte de Puebla del año 2000.

3.4 Distribución espacial y movimientos del terreno.

La combinación entre los diferentes factores que determinan la inestabilidad de las laderas y el relieve montañoso que presenta la Sierra Norte de Puebla, ocasionan la frecuente ocurrencia de procesos de ladera.

Durante las intensas lluvias de octubre de 1999 el estado de Puebla se vio seriamente afectado por una gran cantidad de procesos de ladera, como deslizamientos, flujos de lodo y la combinación de ambos, presentando mayores daños la Sierra Norte de Puebla particularmente en los municipios de Teziutlán, Zacapoaxtla, Zapotitlán de Méndez y Tlatlauquitepec.

Con el objetivo de interpretar la posibilidad de futuros procesos de remoción en masa es necesario conocer y comprender los factores que controlan su ocurrencia en el área de interés. Esto se puede lograr examinando y cartografiando los procesos ocurridos durante octubre de 1999. De esta manera se elaboró una base de datos mediante puntos obtenidos con GPS durante las visitas a campo, que fue enriquecida con el análisis de las fotografías aéreas y la integración de la información de bases de datos proporcionadas por el Sistema Estatal de Protección Civil (SEPROCI) del estado de Puebla. La base de datos resultante contiene un total de 301 procesos de remoción en masa registrados (Figura 3.5).

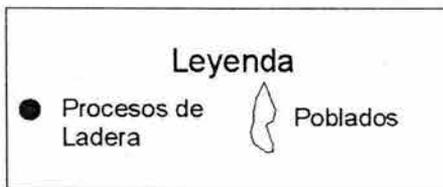
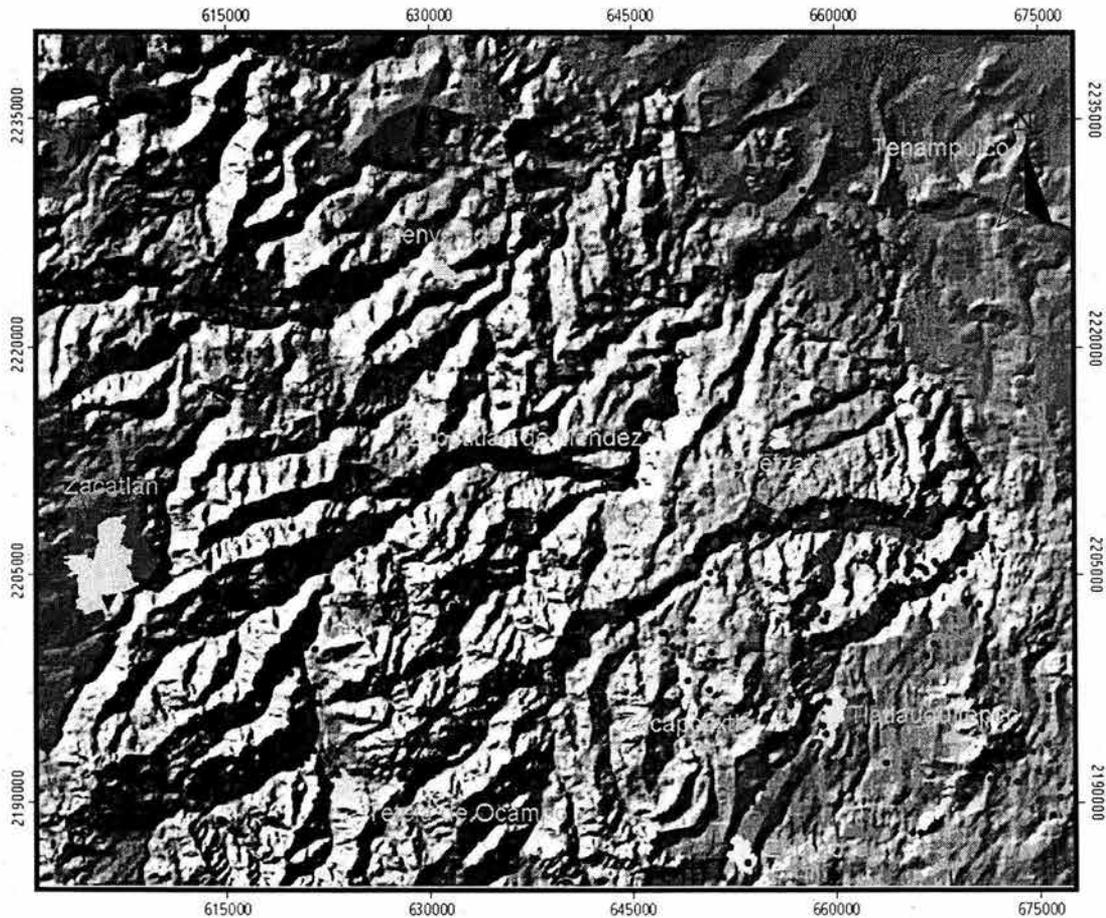
El objetivo de contar con una base de datos que proporcione información sobre la ocurrencia de anteriores procesos gravitacionales, persigue el objetivo de poder interpretar los posibles agentes que controlan la inestabilidad de las laderas.

Desafortunadamente nuestro país no cuenta con una base de datos que proporcione información de los procesos de ladera que han ocurrido en el territorio nacional, de tal manera que el análisis y entendimiento de este tipo de procesos ha sido difícilmente considerado en la elaboración de estrategias adecuadas e inmediatas de prevención de desastres. De esta manera es importante comenzar a realizar una base de datos de los procesos de ladera que han afectado a la población y comenzar a llevar un seguimiento de los mismos, por posibles reactivaciones.

Existen diversas formas de elaborar cartografía de información espacial de la inestabilidad de las laderas, entre las más comunes y sencillas se encuentra la de delimitar áreas de

ocurrencia a partir de la interpretación de fotografías aéreas, imágenes de satélite o trabajo de campo, para lo anterior es importante considerar algunos factores como el tiempo y los recursos económicos disponibles.

Distribución Espacial de los Procesos de Ladera en la Sierra Norte de Puebla



TESIS UNAM GEOGRAFÍA
ESTEBAN CHÁVEZ OMAR
ASESORA: DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA



Figura 3.4.1 Distribución espacial de los movimientos del terreno ocurridos en octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla.

El mapa de la Figura 3.5 muestra la distribución espacial de los movimientos del terreno ocurridos en octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla; en él se observa claramente que existe una mayor concentración de procesos en el sector sureste del mapa. Cabe mencionar que debido al trabajo de campo desarrollado en el municipio de Tlatlauquitepec, una de las áreas más afectadas, de manera particular fue posible identificar un gran número de deslizamientos de tierra en esa área. Aunado a ello, la utilización de la base de datos proporcionadas por SEPROCI de Puebla demuestra el impacto regional de procesos de remoción en masa en toda la Sierra Norte.

La información correspondiente a la ubicación de los deslizamientos que proporciona el mapa antes descrito, se utilizó posteriormente como una capa de información a relacionar con las áreas forestales delimitadas para los distintos periodos establecidos, con el objetivo de demostrar el grado de correlación entre la cubierta forestal y la inestabilidad de las laderas.

3.5 Análisis comparativo

La utilización de análisis comparativos es muy frecuente en el seguimiento de la dinámica forestal, éste consiste en equiparar la cartografía de diferentes fechas con la idea de identificar el aumento o disminución de la cubierta forestal. Existen diferentes materiales para llevar a cabo los análisis multitemporales de vegetación; entre ellos cabe destacar las fotografías aéreas, inventarios forestales, imágenes de satélite y de radar.

En este apartado se presenta una comparación de la información cartográfica correspondiente a los inventarios nacionales forestales periódicos de 1994 y del 2000, ya que a pesar de que algunos autores consideran la incompatibilidad entre dichos inventarios como consecuencia de las metodologías y materiales empleados, éstos son fuente de información valiosa que no es ofrecida por algún otro tipo de material cartográfico. Cabe destacar que para realizar esta comparación, se tuvo mucho cuidado en la digitalización de los polígonos de forma detallada.

Sin lugar a dudas sería muy difícil comparar los inventarios si se quisieran analizar detalladamente algunas especies vegetales específicas, sin embargo, el grado de complejidad disminuye cuando el objetivo fundamental se centra en hacer una

comparación general de la cubierta vegetal, sin importar las especies vegetales, donde se busca de manera particular la relación entre los procesos de ladera y la deforestación. Dentro de la Sierra Norte de Puebla existen Bosques, selvas, pastizales y áreas agrícolas, con diferentes subdivisiones, lo cual disminuye la problemática de la comparación al realizar esta generalización.

La asociación entre la deforestación y la inestabilidad de las laderas consiste en la aceleración de la erosión en relieves escarpados o montañosos, así como el aumento de la infiltración, y por ende la más rápida saturación del suelo, ya que la vegetación representa una capa protectora, que al no existir, acelera los procesos antes mencionados.

En los mapas de las Figuras 3.5.1 y 3.5.2 es posible apreciar la diferencia de superficie vegetal y la ocurrencia de procesos de remoción en masa. De acuerdo con los resultados, existe una mayor área forestal en el año 2000. Sin embargo, 203 procesos de ladera ocurrieron en áreas no forestales, es decir el equivalente a 67.5% del total registrado. Si tomáramos en cuenta el estado de la cubierta de la vegetación en 1994 y los procesos gravitacionales registrados en 1999, se tendría que tan solo el 16% de los movimientos ocurrió en áreas forestales, mientras que el restante 84% tuvo lugar en superficies no forestales. Esta comparación no posee un argumento sólido ya que el estado de la cubierta vegetal en 1999, cuando ocurrieron los procesos, no era similar al representado en el inventario forestal de 1994. Sin embargo el contar con antecedentes del estado de la vegetación previos a la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en 1999, proporciona elementos clave para comprender la ocurrencia de los mismos.

Clasificación Generalizada del Inventario Forestal 2000 para la Sierra Norte de Puebla

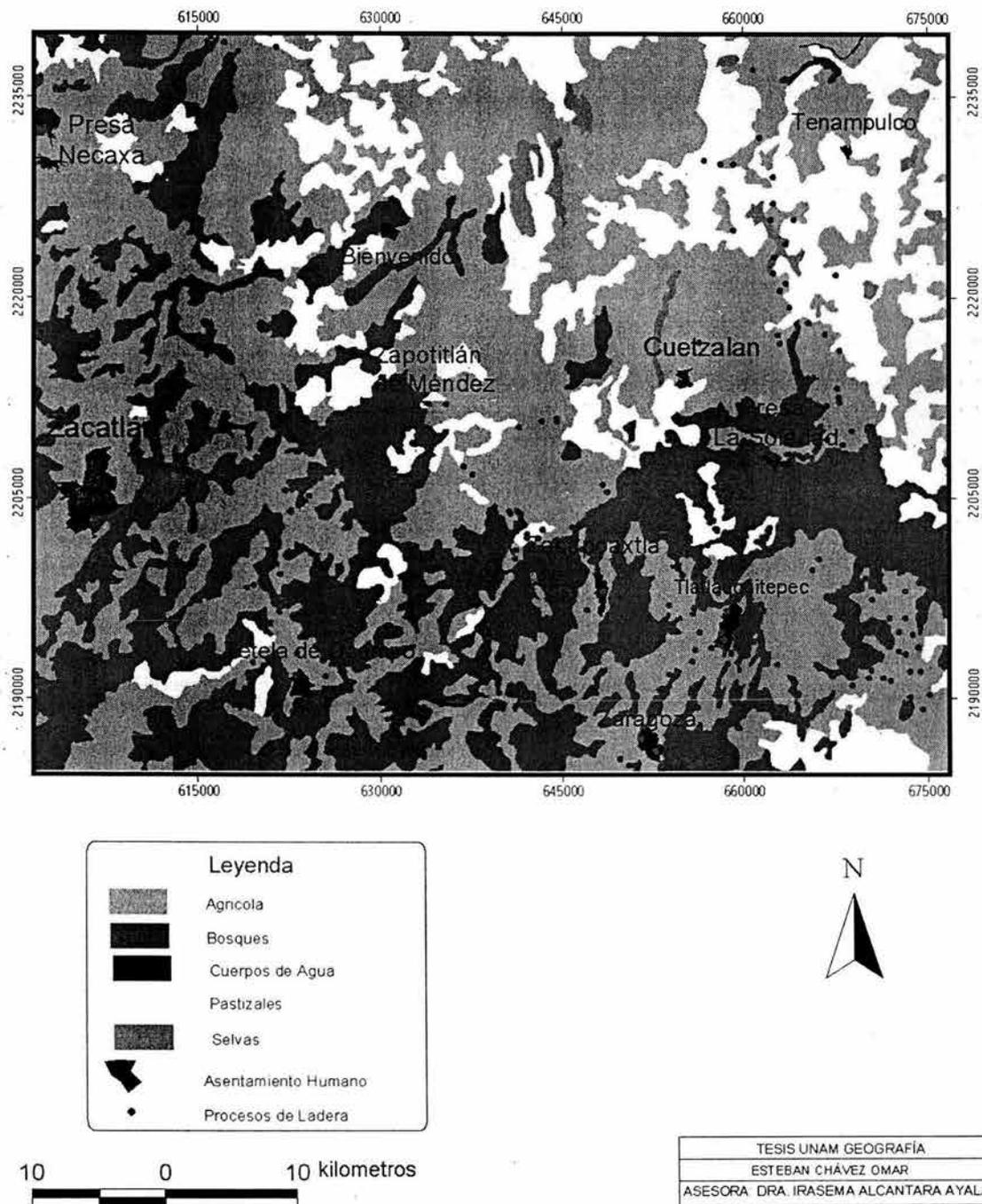


Figura 3.5.2 Áreas forestales y distribución de los procesos de ladera desencadenados por las lluvias de octubre de 1999.

CAPITULO IV. VEGETACIÓN E INESTABILIDAD; UNA PERSPECTIVA DE LA TELEDETECCIÓN.

4.1 Conceptualización.

A la ciencia de los sensores remotos o percepción remota también se le conoce en México como teledetección, estos dos vocablos en español son el resultado de la traducción del término en inglés Remote Sensing.

El término se refiere a la ciencia para obtener una imagen de la superficie terrestre mediante un sensor, sin tener contacto directo entre ambos. Diferentes autores tienen su propia definición del término; para Chuvieco (1995), la teledetección es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. Sabins (1997) considera al término teledetección como el método de emplear la energía electromagnética tal como la luz, calor y ondas de radio para la detección y medición de ciertas características del objeto. La definición elaborada por Richards (1986) se refiere a las técnicas para obtener imágenes de objetos sin que el sensor esté en contacto directo con los objetos o con la escena en sí. Sin embargo para Ruiz (1984) la detección de un objeto o fenómeno se realiza sin que el sensor esté en contacto directo con el objeto o fenómeno en cuestión. Finalmente, de acuerdo con el glosario de los términos oficiales de la teledetección aeroespacial, la teledetección es el conjunto de conocimientos y técnicas utilizadas para definir las características físicas y biológicas de los objetos con medidas remotas, sin contactos materiales con dichos objetos.

La mayoría de los términos coinciden en considerar a la teledetección como una técnica y hacer notar que el sensor involucrado no debe tener contacto directo con los objetos, sin embargo, el adquirir imágenes a distancia también implica la utilización de ondas acústicas como es el caso del sonar. De acuerdo con Scanvic (1989), la teledetección es una técnica que permite detectar a distancia, en forma de fotografías, registros que dan lugar a imágenes o perfiles, las variaciones de absorción, reflexión y emisión de las ondas electromagnéticas. Cabe destacar que a diferencia del sonar, la teledetección está basada principalmente en la noción del espectro electromagnético (Scanvic, 1989).

El espectro electromagnético es el conjunto de la radiación electromagnética de todas las longitudes de onda. En función a esto se puede considerar que la luz o el visible no es más que radiación electromagnética en un rango de frecuencias a las que el ojo humano (y el de la mayoría de las especies dotadas de visión) es sensible. El hecho de estar dotados para la visión en el rango visible, nos permite aprovechar gran cantidad de emisión del Sol que se produce en este rango; seguramente, si el Sol tuviera su máximo en el infrarrojo, nuestros ojos estarían condicionados para ese tipo de visión (Sabins, 1997).

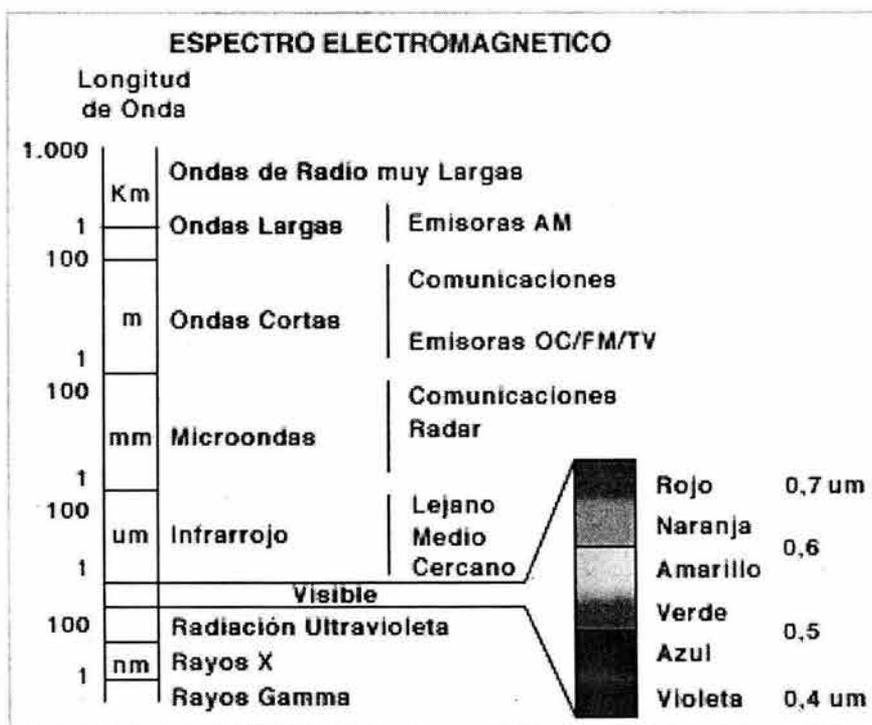


Figura 4.1.1 Espectro Electromagnético. Fuente: Aguirre, 2002

El espectro electromagnético no tiene una frecuencia máxima o mínima, sino que se extiende indefinidamente, más allá de los estrechos límites de sensibilidad del ojo humano. En orden creciente de frecuencias el espectro está compuesto por las ondas de radio, el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Estos nombres distinguen distintas frecuencias de un mismo fenómeno: la radiación electromagnética.

La energía o radiación electromagnética se representa como una onda (Figura 4.1.2) y los parámetros que la definen son, la longitud de onda, la frecuencia y la amplitud. La longitud de onda es la distancia entre dos máximos consecutivos de la onda; Se mide en unidades de distancia: por ejemplo, metros (m) o cualquiera de sus submúltiplos, como el ángstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

m). La frecuencia, es definida como el número de máximos que pasan por un punto en un tiempo determinado, sus unidades son los hertz (Hz), de forma que 1 Hz equivale a un ciclo por segundo. La amplitud es la distancia que hay entre el punto de inflexión de la onda y el máximo (Scanvic, 1989).

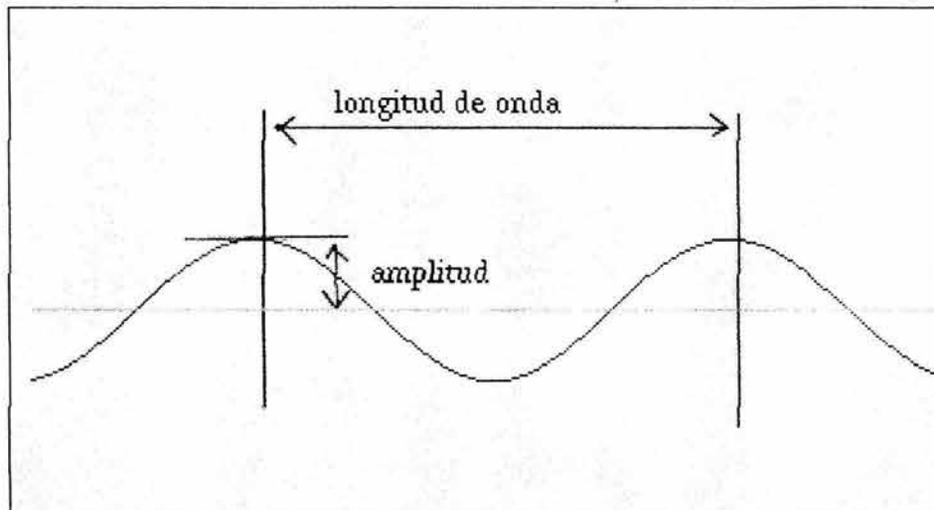


Figura 4.1.2. Parámetros de un onda. Fuente: Chuvieco, 1996.

Todo en la naturaleza está emitiendo, absorbiendo, transmitiendo y reflejando constantemente ondas electromagnéticas (energía). Estas emisiones de radiación electromagnética, se clasifican en las diversas zonas del espectro electromagnético, dependiendo de la longitud y amplitud de onda.

Todos los instrumentos que captan y transforman esa energía pueden ser clasificados como sensores: radio, televisión, cámara fotográfica, por citar algunos. Por lo tanto, los sensores remotos son sistemas fotográficos u óptico-electrónicos capaces de detectar y registrar, en forma de imágenes o no, el flujo de energía radiante reflejado o emitido por objetos distantes (Lira, 1999).

Cualquier sistema receptor de energía radiante o electromagnética se considera un sensor y presenta los siguientes componentes necesarios para captar dicha energía (Figura 4.1.3).

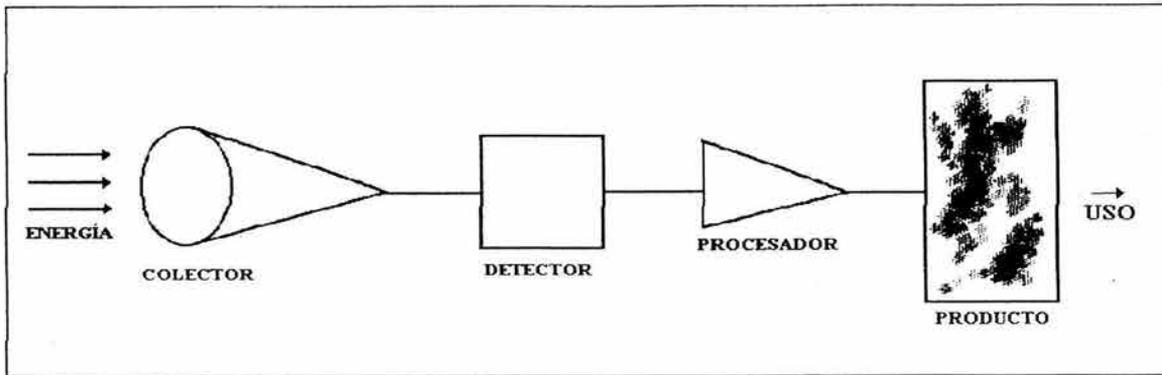


Figura 4.1.3. Componentes del sistema sensor. Fuente: Chuvieco, 1996.

El colector recibe la energía a través de una lente, espejo, antenas, etc. El detector capta la energía colectada de una determinada franja del espectro; el procesador somete la señal registrada a un procesamiento como el revelado, a través del cual se obtiene el producto que contiene la información necesaria para el usuario.

Los sensores pueden ser clasificados en función de la fuente de energía o en función del tipo de producto que produce.

1) En función de la fuente de energía se clasifican en pasivos y activos; los pasivos son aquellos que no poseen una fuente propia de radiación. Miden la radiación solar reflejada o la radiación emitida por los objetos, por ejemplo los sistemas fotográficos. Los sensores activos poseen su propia fuente de radiación electromagnética, trabajando en fajas restringidas del espectro, como ejemplo se pueden citar los radares (Lira, 1999).

2) En función del tipo de producto se dividen en sensores que obtienen imágenes y los que no, es decir obtienen datos. Los que solo obtienen datos no generan una imagen de la superficie observada. Por ejemplo, los radiómetros (salidas en dígitos y gráficos) y los espectrorradiómetros (firma espectral), son esenciales para la adquisición de informaciones minuciosas sobre el comportamiento espectral de los objetos de la superficie terrestre.

Durante la fase de adquisición de datos por los sensores, se pueden distinguir los siguientes elementos básicos: energía radiante, fuente de radiación, objeto, trayectoria y sensor.

La Figura 4.1.4 presenta los elementos y ejemplifica de manera gráfica los diferentes caminos que la radiación electromagnética (energía) puede tomar antes de ser captada por el sistema sensor.

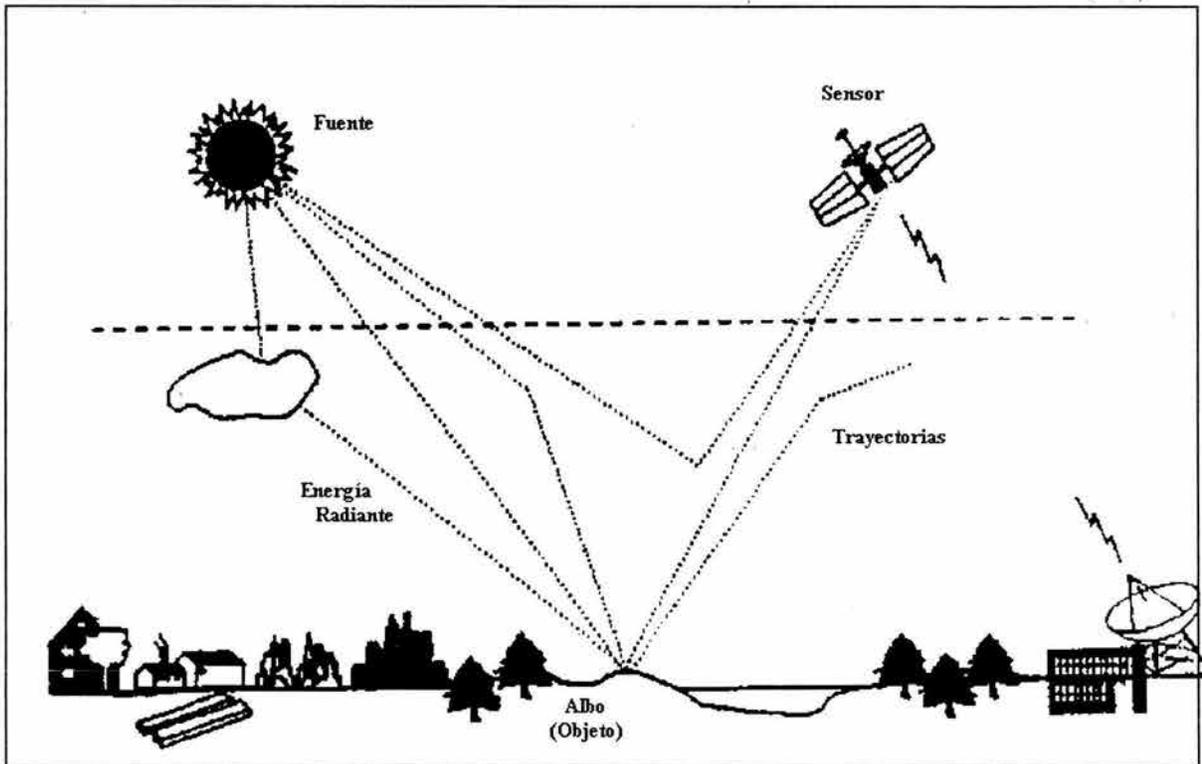


Figura 4.1.4. Trayectoria de la energía radiante. Fuente: Chuvieco, 1996.

Lo anterior refleja el hecho de que la teledetección no solo trata de la obtención de imágenes digitales, ya que en el análisis de la información obtenida, se incluyen los siguientes elementos: fuente de energía, cubierta terrestre, sistema sensor, sistema de recepción, comercialización, interprete y usuario final (Chuvieco, 1995).

Las primeras prácticas de teledetección se remontan al año de 1859 cuando Gaspar Félix de Tournachon obtiene las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo (Hyatt, 1988). Después hasta 1860 King y Black toman las primeras escenas de Boston también desde globos cautivos. Este procedimiento se siguió utilizando en 1862 durante la guerra civil, para estudiar las defensas de Richmond; después en 1866 en Kovanka en Rusia, para fotografiar las fortalezas de Cronstadt y Petesburgo (Scanvic, 1989).

A partir de esta fecha la tecnología ha tenido grandes avances, por tal razón, la teledetección se ha desarrollado de igual manera, aumentando la calidad y variedad de la información, ya que años más tarde se comenzaron a tomar fotografías desde plataformas aéreas, las primeras experiencias fueron realizadas en los años de 1842 y 1870 por el francés Laussedat quien efectuó un levantamiento de 70,000 ha en Francia (Scanvic,1989).

Esta nueva ciencia tiene un gran desarrollo durante la Segunda Guerra Mundial por la importancia estratégica; hoy en día la fotografía aérea sigue siendo una técnica de teledetección muy importante y en muchos casos imprescindible, ya que es una forma original de los sensores remotos. En los años sesenta se creó una técnica de sensores remotos para adquirir imágenes de satélite y procesarlas en computadoras (Sabins, 1997) .

Hoy en día los actuales sensores remotos son capaces de producir imágenes digitales y analógicas de gran calidad y alta resolución. Los diversos tipos de sensores como los SPOT y Landsat, entre muchos otros, tienen variaciones en la resolución espectral y espacial, por ejemplo en la Tabla 4.1.1 se muestra la evolución del sensor Landsat, en cuanto a la resolución espacial.

Sensor	Bandas	Resolución
Landsat 4	4	80 m
Landsat 4 TM	7	30 m (120 m infrarrojo térmico)
Landsat 5 MSS	4	80 m
Landsat 5 TM	7	30 m (120 m infrarrojo térmico)
Landsat 6 ETM	7	30 m (visible, infrarrojo, infrarrojo cercano) 120 m (infrarrojo térmico) 15 m pancromático
Landsat 7 ETM+	7	30 m (60 m infrarrojo térmico, 15 m pancromático)

Tabla 4.1.1. Características de resolución espacial del sensor Landsat.

El desarrollo de tecnología para mejorar la resolución espacial y las avanzadas técnicas de la teledetección de los sensores remotos han tenido recientemente un amplio crecimiento debido a las aplicaciones científicas en diversas áreas como se puede observar en la Figura 4.1.5.

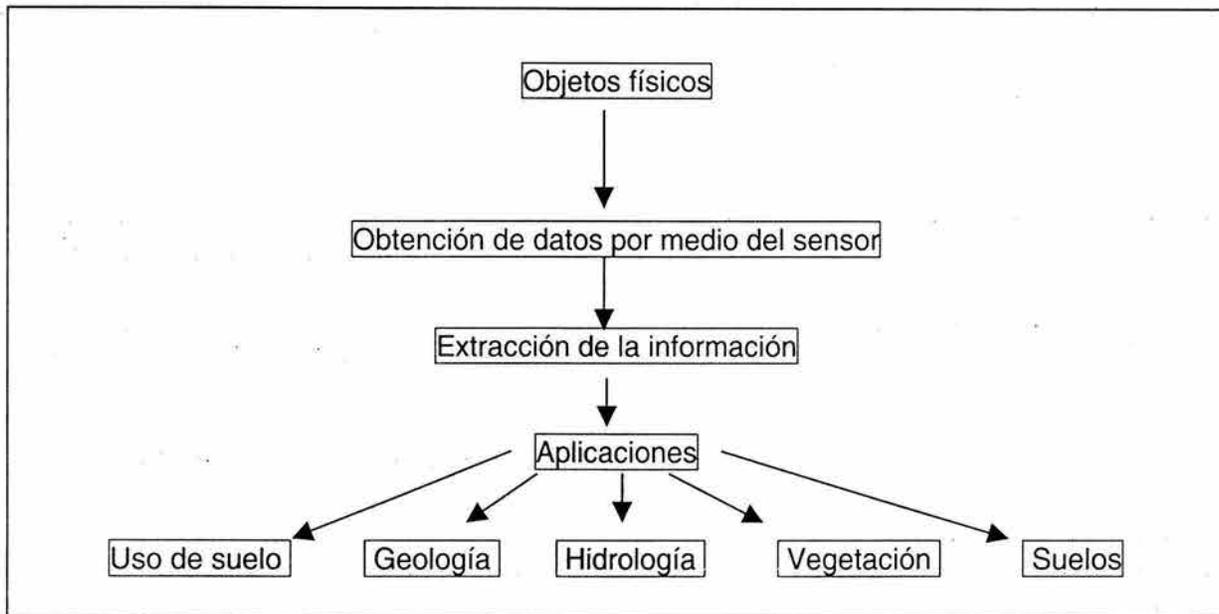


Figura 4.1.5. Áreas de aplicación de los sensores remotos.

En las diversas aplicaciones de los sensores remotos se han desarrollado sensores aún más especializados en cada disciplina, por ejemplo en el campo de la climatología, existen sensores especializados en el monitoreo de fenómenos meteorológicos como los huracanes. Estos sensores tienen ciertas características para desarrollar dicha labor, y en el campo de ciencias de la tierra también existen sensores especiales para elaborar trabajos de geología, hidrología, vegetación, suelos, etc.

4.2 Imágenes Landsat

El avance de la tecnología ha permitido tener satélites artificiales en órbita. Esto incrementa un desarrollo en las técnicas de teledetección, pues de esta manera se comienza a obtener información detallada de la superficie terrestre.

Existen diversos satélites como SPOT, LANDSAT, TERRA, etc., pero dependiendo de los objetivos del trabajo que se desee realizar, se deben de tomar en cuenta las características de cada tipo de sensor de los diferentes satélites.

Para analizar las imágenes Landsat, es necesario conocer la evolución y características generales del sensor. En el año de 1972 se lanzó el primer satélite Landsat (land satélite), llamado entonces ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite). Este primer satélite fue diseñado para la observación a alta resolución de la cubierta terrestre (Scanvic, 1989).

Esta primera generación de satélites funcionó de manera continua hasta 1982 (Scanvic, 1989) proporcionando a investigadores de todo el mundo, miles de imágenes, de una calidad no perfecta pero que por primera vez permitían acceder al mundo de las imágenes multiespectrales. A medida que la tecnología avanza los sensores remotos evolucionan como es el caso de los sensores Landsat que cuenta con 7 tipos diferentes de sensores, siendo el más reciente el sensor Landsat 7 ETM+ y los primeros los Landsat MSS (Tabla 4.2.2.1).

La utilización de imágenes Landsat en el presente trabajo es debido a sus características de resolución espectral, dichas características se describen en los apartados 4.2.1 y 4.2.2 donde se mencionan los rangos espectrales de cada banda para los diferentes tipos de sensores que posee el satélite Landsat (TM, ETM+ y MSS), dichos rangos nos permiten obtener un índice de vegetación a partir de las bandas 3 y 4 con el cual se analiza el proceso de forestación en la Sierra Norte de Puebla. La resolución espacial es otro de los factores a tomar en cuenta, pues tienen una resolución de 30m, aunque existen imágenes con mayor resolución espacial como las IKONO con una resolución de 1m, sin embargo la accesibilidad a estas es un poco restringida debido a sus costos económicos, de esta manera con los medios que se contó para la realización de este trabajo fueron las imágenes Landsat ETM+ del año 2000 y las TM de 1989 proporcionados por el Instituto de Geografía.

4.2.1 Sensor Landsat MSS

A lo largo de la historia los satélites Landsat han tenido diferentes tipos de sensores y uno de los primero fue el MSS. El sensor MSS (Multi-Spectral Scanner) es un equipo de barrido óptico-electrónico con un campo total angular de visión de 11.56° , lo que a la altura orbital del satélite, le permite explorar una franja de terreno de 185 km., divididos a ambos lados de la vertical de la traza (Sabins, 1997). Los sensores MSS a diferencia de los recientes ETM+, contaban un sistema de cámaras que trabajaban en forma pancromática o multibanda; este conjunto de cámaras es conocido como RBV (Return Beam Vidicon).

Con objeto de acoplar la secuencia de barrido a la velocidad del satélite, el sensor MSS registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiación recibida por el sistema focal se transmite a un sistema óptico que la descompone en cuatro bandas, y la envía a distintos detectores. Por tanto, el MSS dispone de 24 detectores (6 líneas x 4 bandas), compuestos por foto-diodos de silicio (banda 7), y por tubos foto-multiplicadores (banda 4 a 6). En el caso del Landsat 3, se añadió una banda térmica (banda 8), registrada por detectores de mercurio-cadmio-telurio (Sabins, 1997).

Una escena adquirida por el sensor MSS comprende 2.340 líneas de barrido y 3,240 columnas por línea. Cada pixel corresponde a una superficie real de 79 m de lado (0.62 ha), si bien en la transformación digital se le asigna un formato nominal de 57 x 79 m, lo que explica la disimetría final entre el número de líneas y de columnas en la imagen. En los primeros MSS la resolución espectral era de 7 bits (0 a 127) para las bandas 4 a 6, 6 bits (0 a 63) para la banda 7. Los MSS de la segunda generación codificaban las cuatro bandas con 8 bits (0 a 255). Los sensores MSS cubrían 4 bandas de análisis. Las bandas visibles (4 y 5) permitían la detección de aspectos antrópicos, como áreas urbanas o vías de comunicación a la vez que podían proporcionar información sobre la calidad de la aguas. Las dos bandas del infrarrojo cercano (6 y 7) permitían registrar parámetros vitales en la actividad de las plantas, además de ser especialmente sensibles a la humedad (Sabins, 1997).

4.2.2 Sensor Thematic Mapper (TM) y el ETM+

En la segunda generación del programa Landsat se introdujo un nuevo tipo de sensor, denominado Thematic Mapper (TM), diseñado para la cartografía temática. Al igual que su predecesor, el MSS, el Thematic Mapper es un equipo de barrido multi-espectral. A diferencia del MSS, el TM aumenta el número de detectores, de 24 a 100, a la vez que se reduce el IFOV, se aumenta los niveles de codificación y se realiza el barrido en dos direcciones. Todo ello le permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica: de 79 a 30 m, de 4 a 7 bandas, y de 6 a 8 bits (Chuvieco, 1995).

En el TM, cada oscilación del espejo supone 16 líneas de barrido, frente a 6 en el MSS. De esta forma se precisan 16 detectores por banda, salvo la banda térmica que registra una menor resolución (120 m) y solo requiere cuatro detectores. Este aumento en el número de detectores complica el proceso de calibración, a la par que aumenta el volumen de datos a procesar (6

veces superior al MSS). Los detectores están formados por tubos de silicio, para las bandas 1 a 4, indio-antimonio para las bandas 5 y 7, y mercurio-cadmio-telurio para la banda 6.

El diseño del TM pretendió aminorar las deficiencias observadas en las imágenes MSS, incorporando información de cuatro bandas del espectro no contempladas en el MSS (azul, dos en el infrarrojo medio y una en el térmico), mientras se sustituían las bandas 6 y 7 del sensor, ambas en el infrarrojo cercano, por una sola.

Con esta nueva configuración, los Landsat de segunda generación permitieron una sensible mejora en las aplicaciones terrestres y marinas sobre el sensor MSS: detección de turbideces y contaminantes en el agua (banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y suelo (infrarrojo medio), detección de focos de calor (infrarrojo medio y térmico) además de mantener las ya existentes para el MSS.

Entre los inconvenientes de este sensor con relación al MSS se puede destacar su costo y el gran volumen de datos que se generaban. A modo de ejemplo decir que una sola imagen del TM era 6 veces más cara que una adquirida por el MSS (sobre el mismo territorio). Por otro lado la cantidad de datos suponía 231 millones de píxeles, frente a los 28 millones de una imagen MSS, lo que para la época suponía un problema ya que se requerían computadoras de elevados costos para poder manipularlas.

En la actualidad el Landsat 7 está equipado con una versión mejorada del TM denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) por lo que todo lo explicado en este apartado para el TM es de aplicación para el ETM+. El ETM+, además de que se incorpora una banda pancromática (0.5 a 0.9 μm) con una resolución espacial de 15 m, lo que permite obtener ampliaciones a una escala de hasta 1:25,000.

Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (Km.)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: intervalo espectral	Resolución Espacial (m)
Landsat 1	23/07/72 06/01/78	917	18	RBV	(1) 0.48 0.57 (2) 0.58 0.68 (3) 0.70 0.83	80 80 80
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	79 79 79 79
Landsat 2	22/01/75 25/02/82	917	18	Idéntico al Landsat 1		
Landsat 3		917	18	RBV	(1) 0.5 0.75	40
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1 (8) 10.4 12.6	79 79 79 79 240
Landsat 4	16/07/82 (83)	705	16	MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	82 82 82 82
				TM	(1) 0.45 0.52 (2) 0.52 0.60 (3) 0.63 0.69 (4) 0.76 0.9 (5) 1.55 1.75 (6) 10.4 12.5 (7) 2.08 2.35	30 30 30 30 30 120 30
Landsat 5	Idéntico al Landsat 4					
Landsat 6	05/10/93	705	16	FALLOS EN EL SISTEMA		
Landsat 7	15/04/99	705	16	ETM+	(1) 0.45 0.52	30
					(2) 0.53 0.61	30
					(3) 0.63 0.69	30
					(4) 0.78 0.9	30
					(5) 1.55 1.75	30
					(6) 10.4 12.5	15
					(7) 2.09 2.35	30
					PAN 0.5 0.90	15

Tabla 4.2.2.1 Características generales de los distintos sensores Landsat.

4.3 Proceso de deforestación en la Sierra Norte de Puebla.

Con la idea de interpretar la relación vegetación-inestabilidad de laderas se desarrolló en el capítulo anterior un análisis de los inventarios nacionales forestales de 1994 y 2000, sin embargo, debido a la inexactitud de los datos y a la poca compatibilidad de la metodología empleada, y por ende de su correlación con la distribución espacial de procesos de remoción en masa, fue imposible obtener resultados confiables. Dado lo anterior, se consideró oportuno hacer un análisis de dicha relación mediante la utilización de imágenes de satélite tomadas antes y después del evento de 1999, a partir de la aplicación del Índice de vegetación (NDVI).

La teledetección se basa en la interacción del espectro electromagnético y la cubierta terrestre, cuando hace un gráfico en el que se representa la cantidad de radiación reflejada por una superficie y se relaciona con la longitud de onda de la onda electromagnética, se obtiene la patrón espectral.

Gracias a que la patrón espectral de la vegetación es distinta a la de otros cuerpos como el agua, nieve y suelo, se pueden realizar distintos tipos de mediciones (Figura 4.3.1) además de que recientemente se han desarrollado técnicas para el análisis cualitativo y cuantitativo del estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites.

De manera puntual se puede señalar que el objetivo del presente capítulo es conocer la dinámica del proceso de deforestación en la Sierra Norte de Puebla, por lo que las medidas espectrales se convierten en un instrumento fundamental que proporciona la teledetección, para definir índices de vegetación.

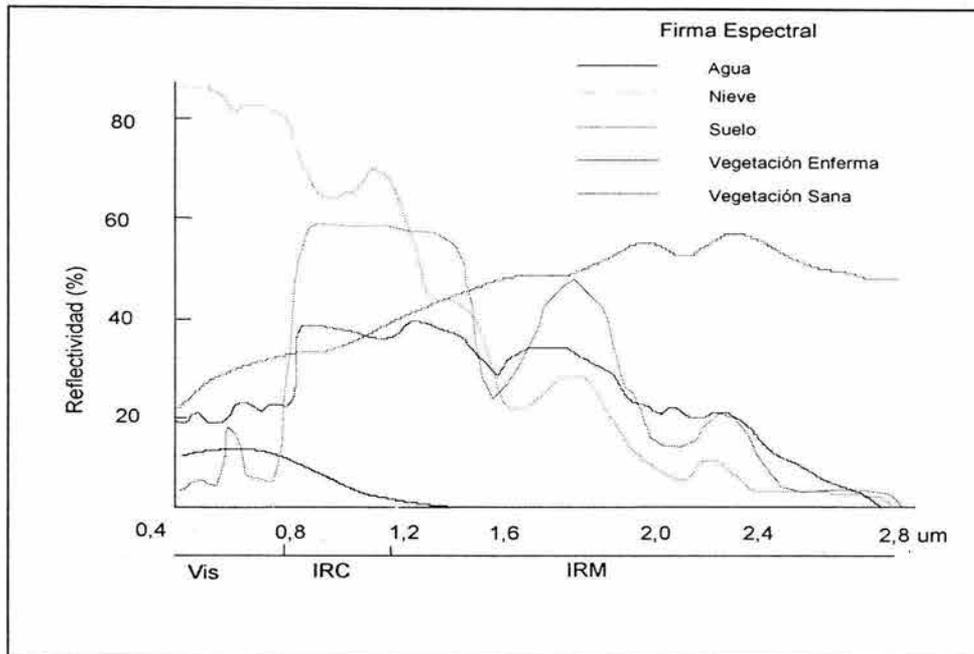


Figura 4.3.1 Diferenciación de las firmas espectrales en distintos cuerpos (Chuvieco,1996).

Los índices de vegetación son cocientes de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc. Uno de los índices de vegetación más usado y conocido es el índice normalizado de vegetación (NDVI), cuya ecuación es:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIRC} - \text{PR}}{\text{PIRC} + \text{PR}}$$

Donde PIRC y PR indican la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente. La diferencia de reflectividad entre el infrarrojo cercano y el rojo es lo que nos da como resultado el índice de vegetación, en la Figura 4.8 la vegetación sana esta representada con una línea de color verde y se observa como esta línea marca menos del 10% de reflectividad cuando pasa por los valores correspondientes a el rojo visible (0.63 a 0.76 um aprox.), esta línea aumenta su valor hasta un 60% de reflectividad al pasar por los valores del infrarrojo cercano (0.766 a 1.5 um aprox.), la diferencia de estos valores es lo que nos da como resultado el índice de vegetación.

El NDVI se basa en la diferencia de reflectancia que la vegetación muestra en las bandas 3 y 4 de Landsat TM. Las bandas que utilizan los diferentes sensores Landsat son las siguientes:

- Landsat MSS -- bandas 5 (0.6-0.7 μm) y 6 (0.7-0.8 μm) o 7 (0.8-1.1 μm); bandas 2, 3, y 4, respectivamente, para Landsat 4 y Landsat 5
- Landsat TM -- bandas 3 (0.63-0.69 μm) y 4 (0.76-0.90 μm)
- Landsat ETM+ -- bandas 3 (0.63-0.69 μm) y 4 (0.78-0.90 μm)

Las bandas de los diferentes sensores satelitales que se utilizan para calcular el NDVI se enlistan a continuación:

- NOAA AVHRR -- bandas 1 (0.58-0.68 μm) y 2 (0.72-1.0 μm)
- Terra MODIS -- bandas 1 (0.62-0.67), 2 (0.841-0.876)

Generalmente, la mayoría de los índices de vegetación son los cocientes que eliminan ciertos efectos de sombra. El retiro de la sombra puede ofrecer mejoras en los índices de la vegetación (Huemmrich, 1996; Qi *et al.*, 1995). Existen diferentes factores que pueden alterar el valor del NDVI; como las estaciones del año (primavera, invierno, otoño, etc.), situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona; este índice de vegetación también puede ser utilizado como una herramienta para supervisar cambios en la vegetación en un cierto plazo. Por lo tanto la aplicación del índice de vegetación normalizado es un elemento clave en el análisis multitemporal del procesos de eliminación de la cubierta vegetal.

4.3.1 Análisis comparativo de los índices de vegetación normalizados de los años de 1989 y 2000.

La utilización de los diferentes índices de vegetación a partir de las imágenes de satélite es utilizada para la estimación de abundancia de vegetación, así como para hacer una comparación de los mismos en diferentes periodos de tiempo y así poder conocer la dinámica de la vegetación. En el presente trabajo se utilizaron imágenes de satélite Landsat de los sensores ETM+ y TM de las fechas: 1989 y 2000. Dichas imágenes fueron en primer lugar georeferenciadas para posteriormente obtener los recortes que cubren el área de interés incluyendo el mismo número de columnas, renglones y un igual tamaño de píxel, esto con el objetivo de realizar los cruzamientos de las imágenes y obtener información de la dinámica

forestal. Una vez obteniendo el área específica de estudio se le aplicó el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) considerando la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{b3 - b4}{b3 + b4}$$

En donde b3 corresponde a la banda del rojo y b4 a la banda del infrarrojo cercano. Para la aplicación de la fórmula en las imágenes de satélite se utilizó el programa Index (Parrot, 2003).

Sin embargo, cabe señalar que la fórmula indicada no es aplicable a los distintos tipos de sensores Landsat de manera homogénea, ya que los rangos espectrales de cada banda varían de acuerdo al tipo de sensor (Tabla 4.3).

Sensor	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
TM	0.45	0.52	0.63	0.76	1.55	10.4	2.08	
	0.52	0.60	0.69	0.90	1.75	12.5	2.35	
ETM+	0.45	0.53	0.63	0.78	1.55	10.4	2.09	0.52
	0.52	0.61	0.69	0.90	1.75	12.5	2.35	0.90

Tabla 4.3.1.1 Diferencia de rangos espectrales de cada banda de acuerdo al tipo de sensor.

En la Tabla 4.3.1.1, se observa que la banda tres en ambos sensores posee el mismo rango espectral, sin embargo, en el caso de la banda cuatro existe una diferencia de dos micrómetros; no obstante esto significa que el sensor TM en la banda cuatro abarca un rango mayor dentro de el espectro electromagnético. Lo anterior se puede observar de una manera más clara en los histogramas de la banda cuatro de ambos sensores (Figuras 4.3.1.1 y 4.3.1.2).

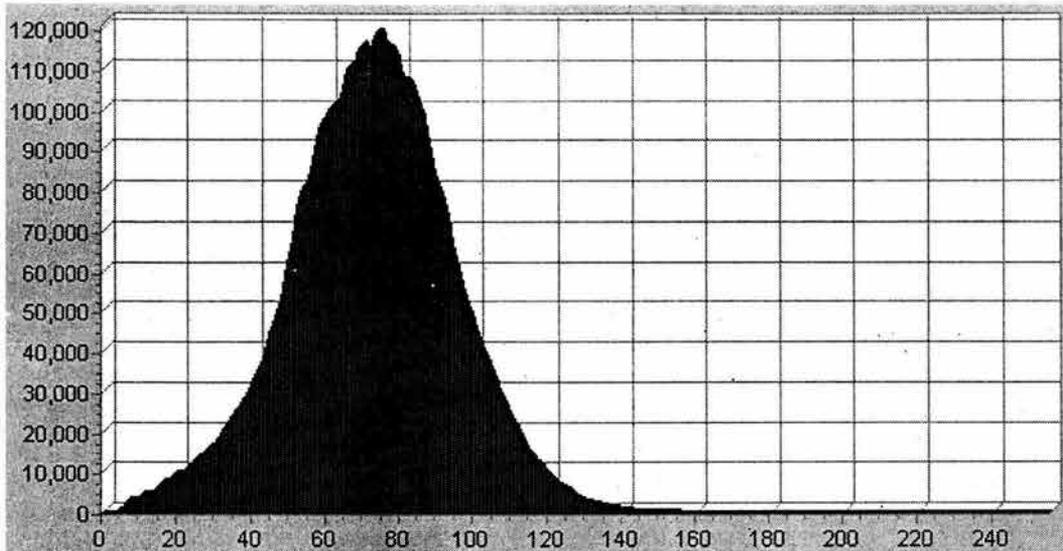


Figura 4.3.1.1 Histograma de la banda cuatro del sensor Landsat MSS.

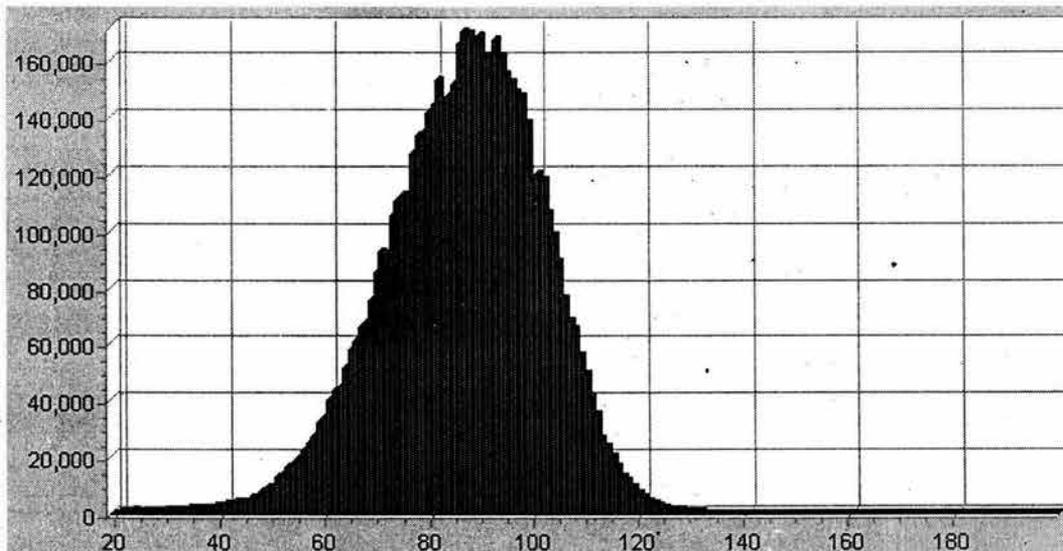


Figura 4.3.1.2 Histograma de la banda cuatro del sensor Landsat ETM+.

Dichos histogramas muestran la diferencia de rango espectral en la banda cuatro en los distintos sensores ya que en la figura 4.3.1.1, los datos comienzan en 0 y terminan en 150 en el eje de las X; a diferencia de la figura 4.3.1.2 en donde los datos están de 20 a 135.

Debido a lo anterior fue necesario reducir el rango espectral de la banda cuatro en la imagen correspondiente al sensor TM, dicha reducción se llevó a cabo mediante la utilización del

programa adapt_TM_ETM+ (Parrot, 2003), el cual realiza la transformación de rangos espectrales en las bandas correspondientes a los sensores TM y ETM+.

Una vez hechas las correcciones de transformación fue posible obtener los índices de vegetación normalizado a partir del programa Index (Parrot 2002), con las mismas características espectrales para las diferentes fechas, es decir 1989 y 2000 (Figuras 4.3.1.3 y 4.3.1.4).



Figura 4.3.1.3 Índice de vegetación Normalizado en Imagen Landsat TM de 1989.

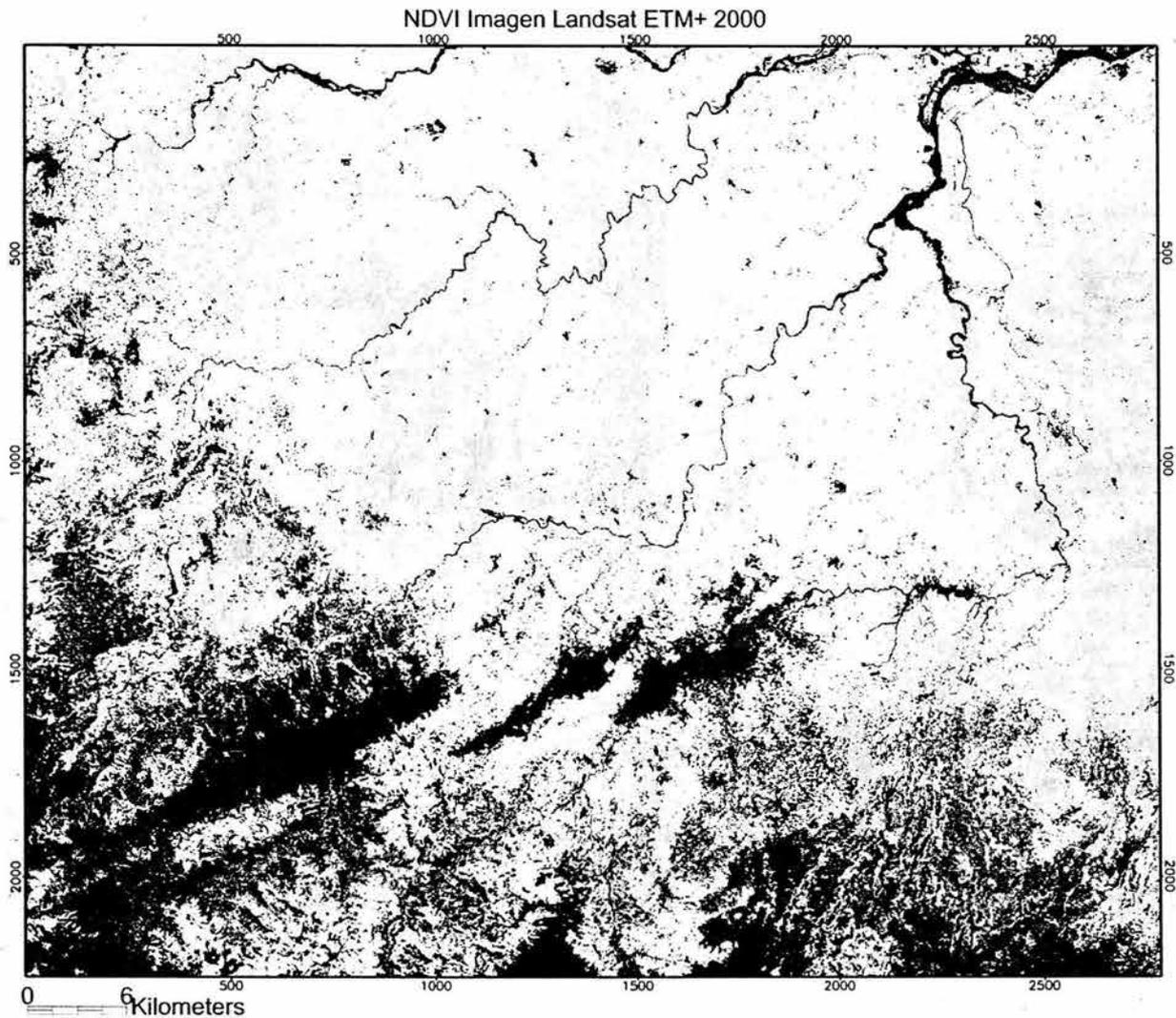


Figura 4.3.1.4 Índice de vegetación Normalizado en Imagen Landsat ETM+ del 22 de octubre de 2000.

Con base en la información que proporcionan los índices de vegetación en las fechas consideradas es posible conocer el estado de la vegetación. Con la idea de comparar los NDVI resultantes fue necesario aplicar distintos programas entre ellos cabe destacar Binar 3, Homo y Cross_item, el primero de ellos hace una separación de valores, en tanto el segundo los homogeneiza y el último sirve para efectuar el cruzamiento final.

La aplicación de dichos programas se realizó en función de la utilización de valores representativos de vegetación, es decir los que corresponden al pie de curva y de ruptura de curva que presentan los histogramas de los índices de vegetación en los diferentes periodos.

Cabe señalar que se seleccionaron los valores que van de 170 a 255, pues son los más representativos de la vegetación para el año de 1989, de 230 a 255 para el año 2000, las imágenes resultantes se pueden observar en las Figuras 4.3.1.5 y 4.3.1.6

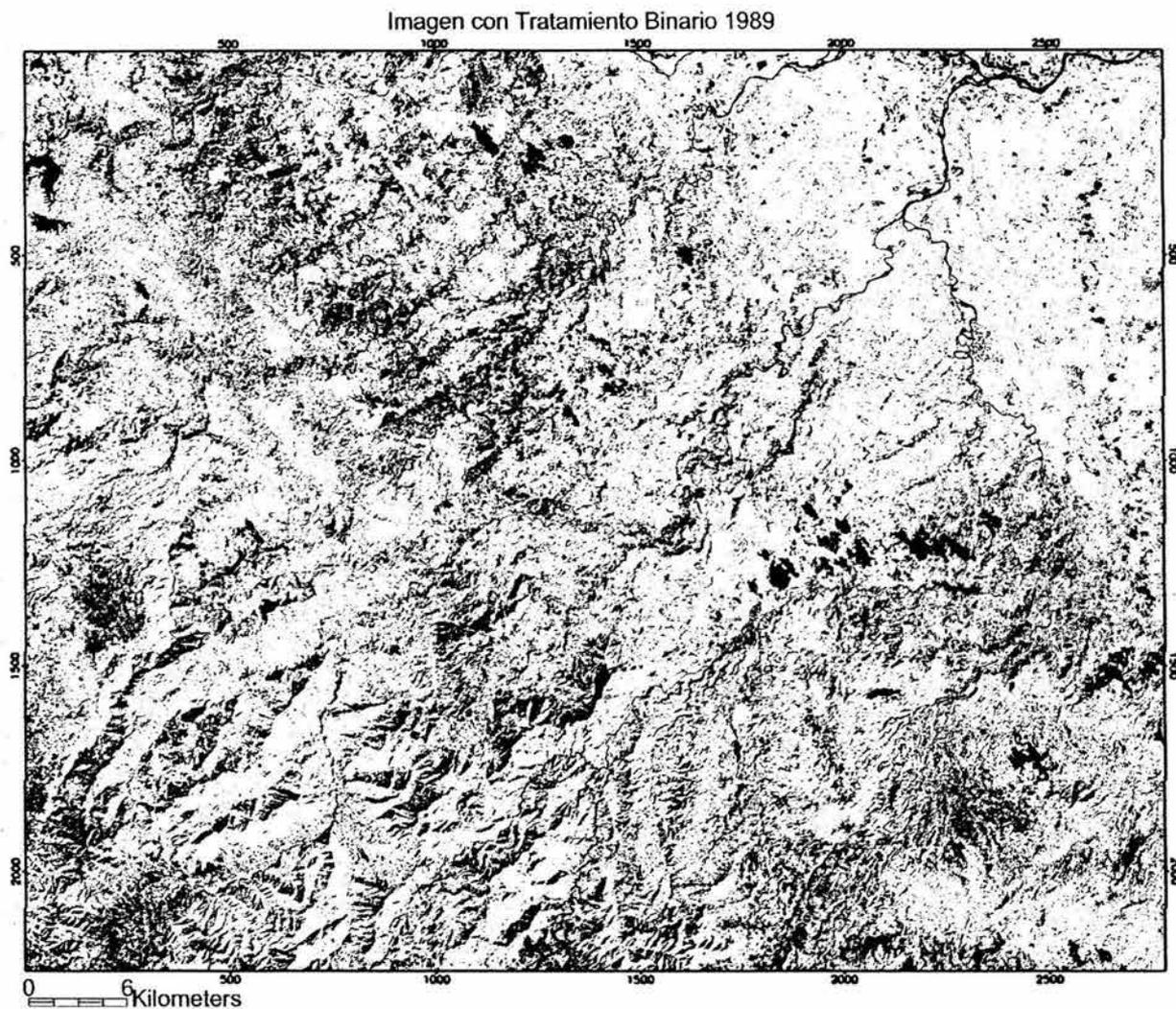


Figura 4.3.1.5 Imagen con tratamiento binario de 1989.

En la Figura 4.3.1.5 se puede observar que los píxeles en color negro representan un valor ajeno a los valores correspondientes a la vegetación y el color blanco representa de alguna manera la vegetación con respecto al NDVI.

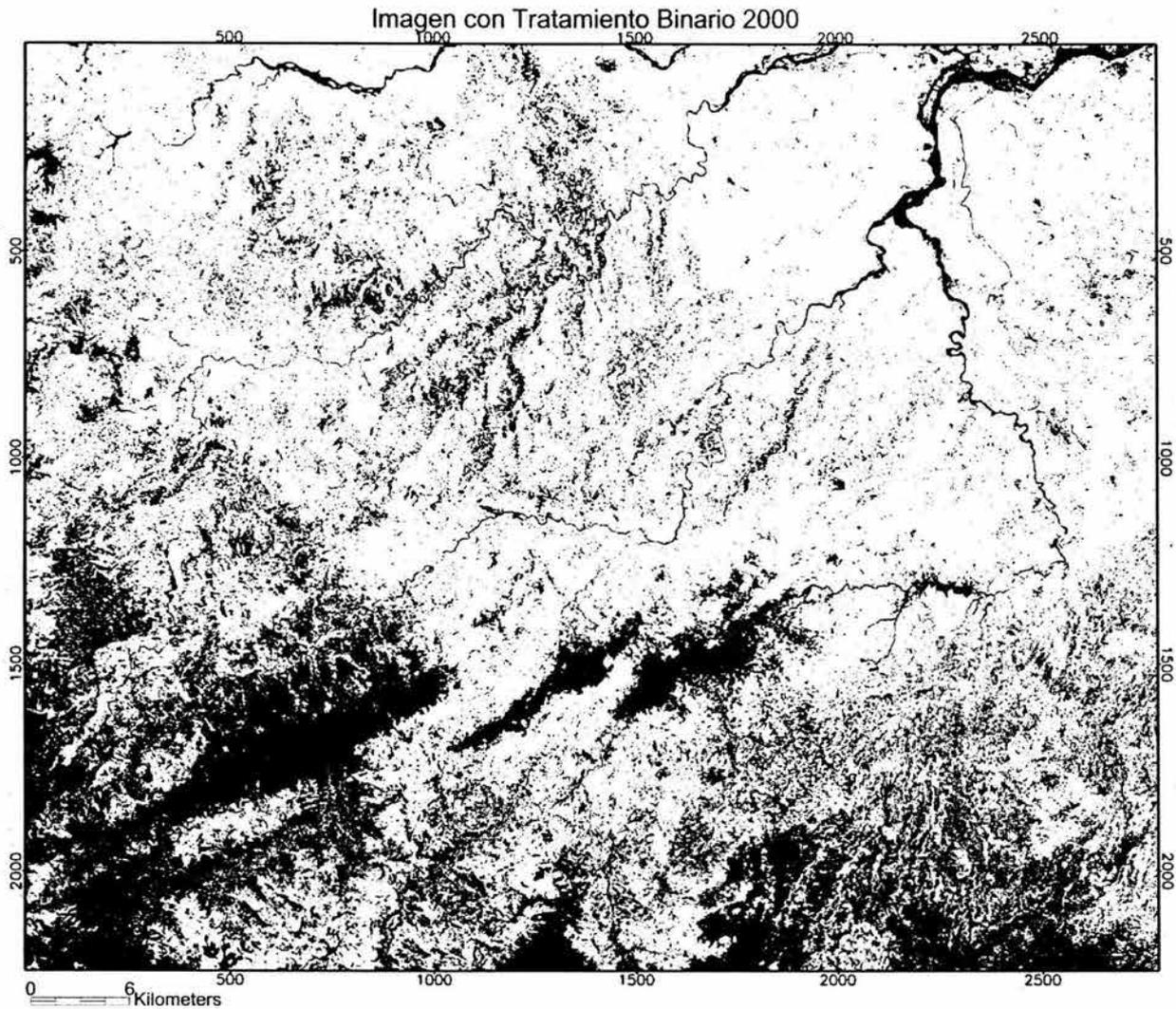


Figura 4.3.1.6 Imagen con tratamiento binar para el año 2000.

En la Figura 4.3.1.6 el color blanco representa las áreas con vegetación y el color negro las áreas desprovistas de vegetación. Sin embargo, las áreas en color blanco que representan a la vegetación contienen cierto grado de degradación, es decir no existe áreas totalmente homogéneas, por lo tanto, fue necesario delimitar las áreas de menor y mayor densidad de vegetación. Para la realización de dicha delimitación se utilizó el programa Homo (Parrot, 1998), el cual delimita las áreas homogéneas a partir de los valores de los píxeles, es decir se seleccionan las zonas homogéneas con respecto a un cierto valor del píxel a partir del NDVI, esto se realiza por medio de la aplicación de una ventana móvil de un tamaño de 3x3 píxeles, de tal manera que se necesita encontrar un conjunto de 9 píxeles con el mismo valor para marcarlo como una área homogénea con una dinámica del 100% (Figura 4.3.1.7)

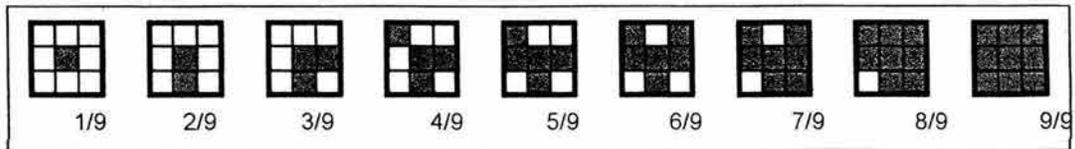
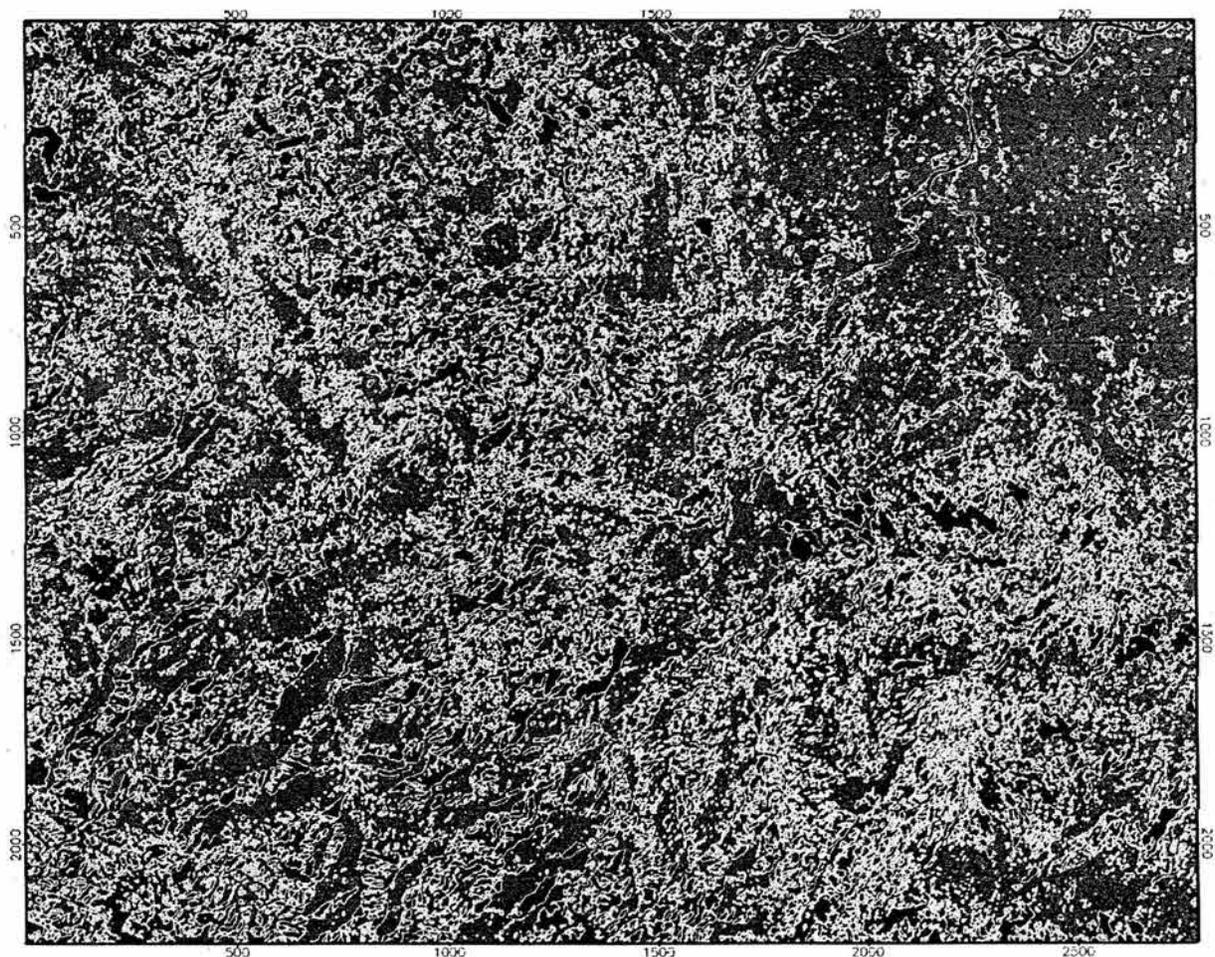


Figura 4.3.1.7 Parámetros de homogeneidad.

En el caso de las imágenes del área de estudio se seleccionó una ventana de 7 x 7, ya que después de una serie de pruebas con distintos tamaños y comparaciones realizadas en campo, se consideró lo más adecuado, los resultados se pueden observar en las Figuras 4.3.1.8 y 4.3.1.9.

Imagen con Tratamiento de Homogeneidad 1989



Valores de Homogeneidad de vegetación con Respecto a NDVI.

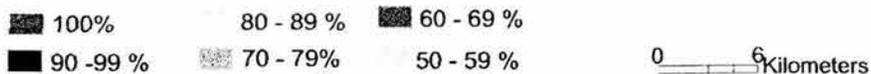
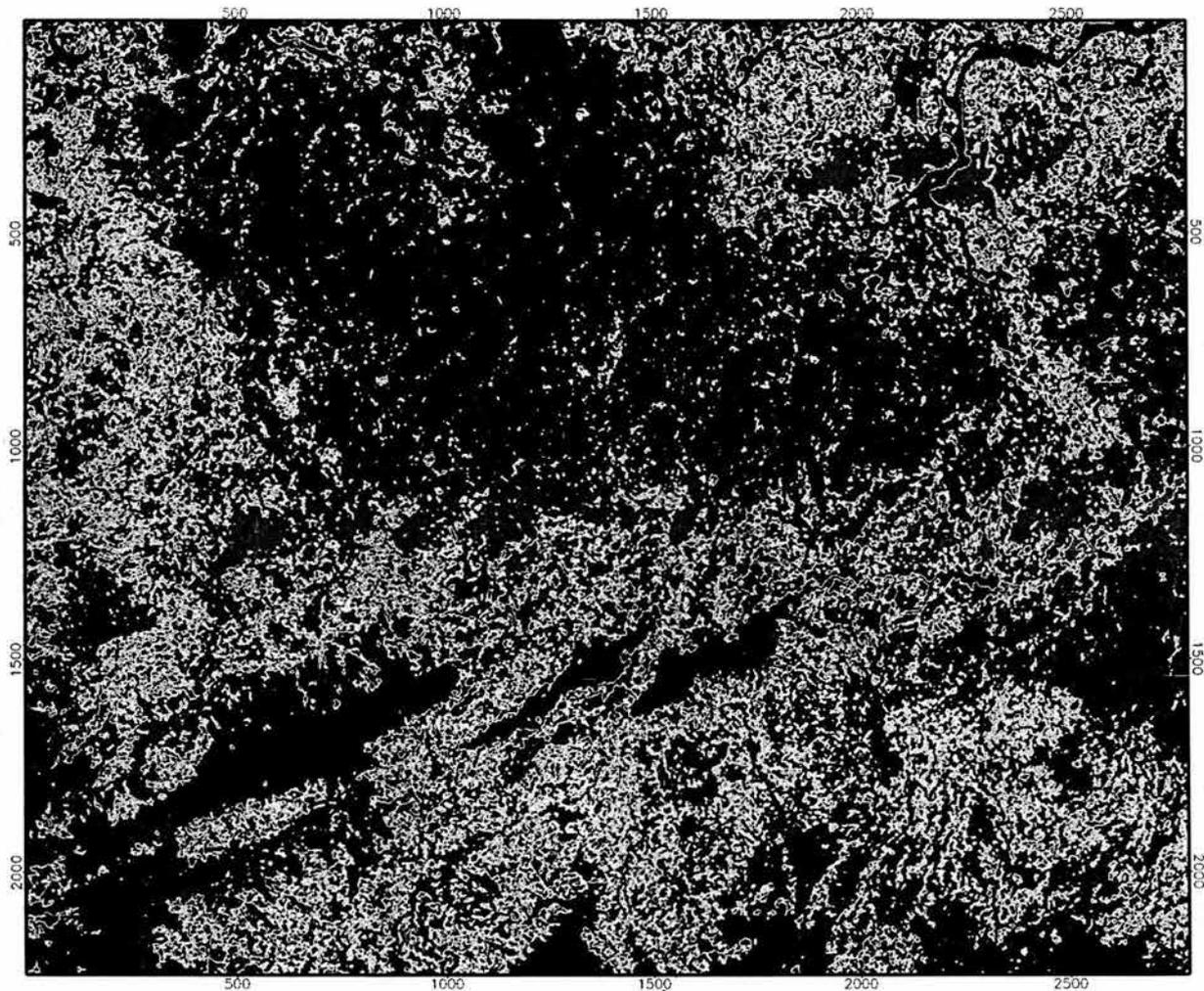


Figura 4.3.1.8 Homogeneidad de densidad de vegetación a partir del NDVI.

Imagen con Tratamiento de Homogeneidad 2000



Valores de Homogeneidad de vegetación con Respecto a NDVI.

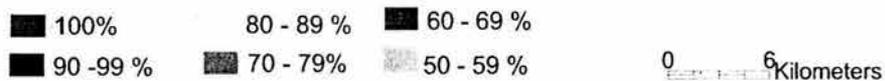


Figura 4.3.1.9 Homogeneidad de densidad de vegetación a partir del NDVI.

Después de haber obtenido la homogenización de la vegetación fue necesario agruparla en áreas desprovistas de vegetación y áreas con vegetación, para dicha agrupación se utilizó nuevamente el programa Binar 3 con la idea de obtener una imagen con datos binarios, es decir una imagen con dos valores. Una vez obtenida la clasificación de densidad de vegetación para las dos fechas especificadas se llevó a cabo un cruzamiento de los datos mediante el programa

cross_item (Parrot, 2003), con la idea de reconocer la dinámica de la vegetación a partir del NDVI, durante el período de 1989 – 2000. El resultado se puede observar en la Figura 4.3.1.10.

Evolución de la Vegetación Durante el periodo 1989 - 2000

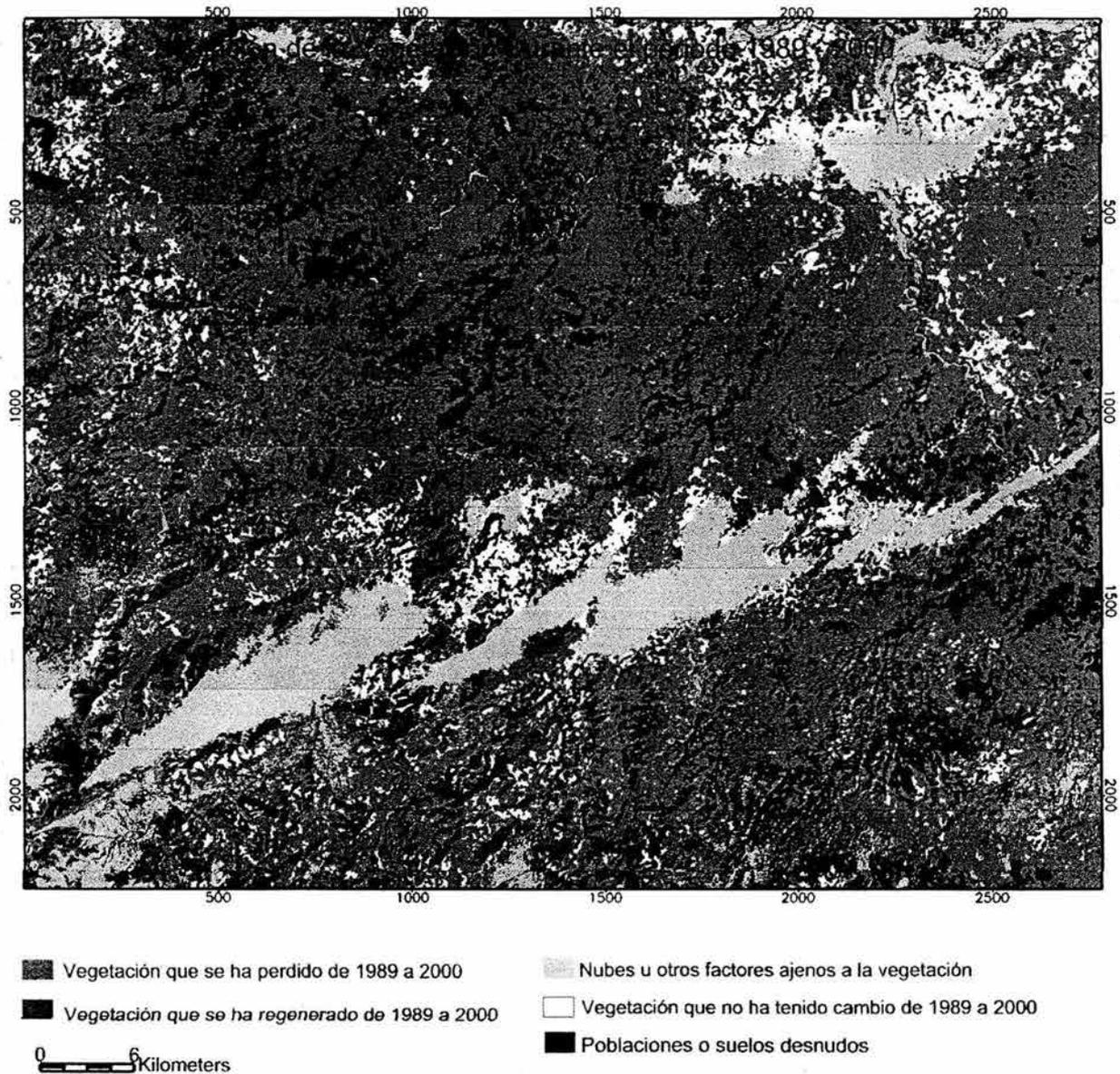


Figura 4.3.1.10 Cruzamiento de los valores correspondientes a vegetación partir del NDVI de los años 1989 y 2000.

Una vez obtenido el cruzamiento de los datos espectrales del NDVI y de haber obtenido las áreas desprovistas de vegetación y de aquella vegetación que no presenta dinámica cambiante, se realizó una sobreposición de los datos de procesos de remoción en masa desencadenados por

las lluvias extraordinarias de octubre de 1999 (figura 4.3.1.11), con el objetivo de demostrar la relación de la inestabilidad de laderas y la deforestación.

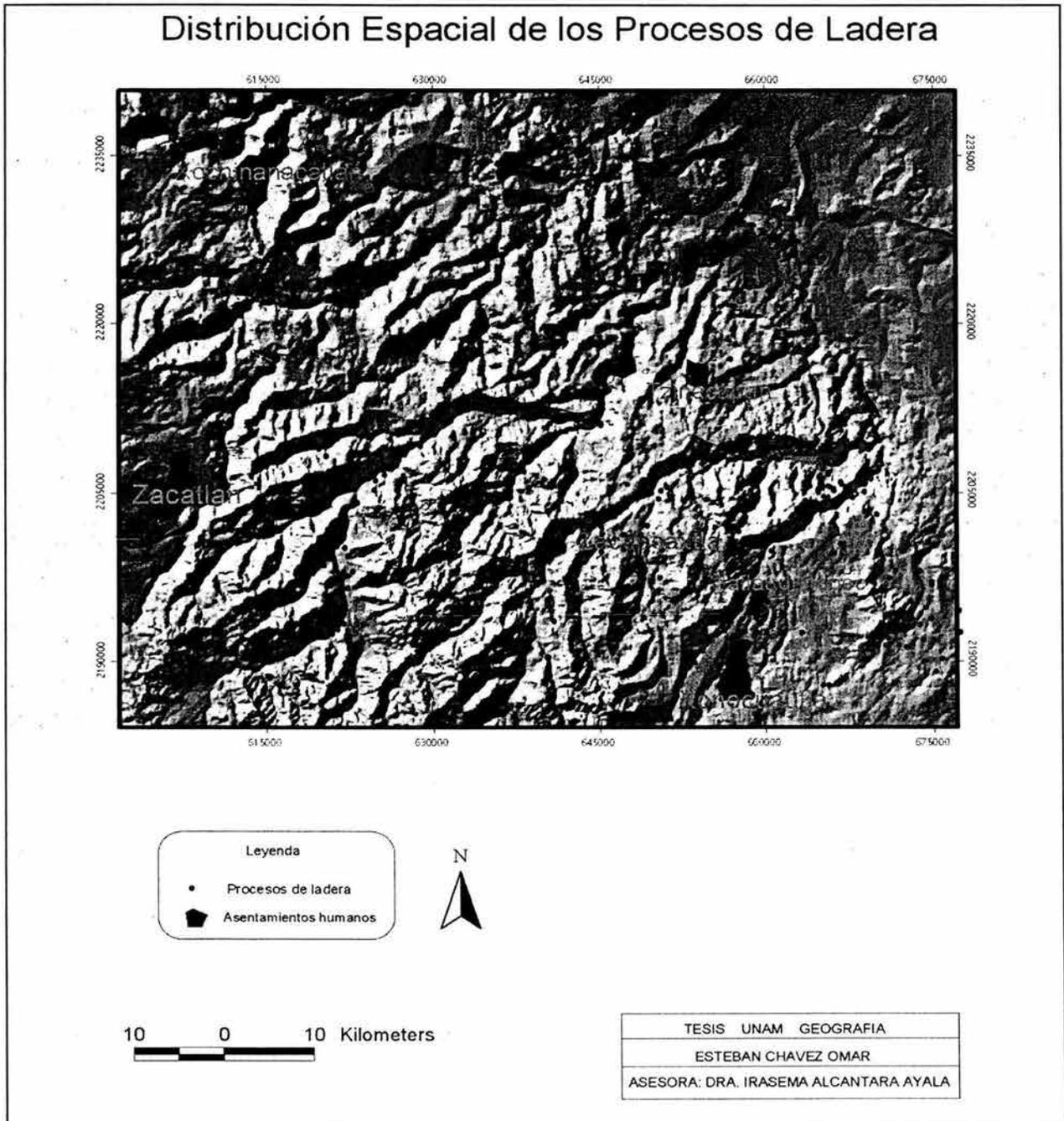


Figura 4.3.1.11 Distribución de los procesos de remoción en masa, asociados a las lluvias extraordinarias de 1999.

Para encontrar el número de procesos de ladera que ocurrieron en las diferentes superficies vegetales se utilizó el programa `stat_points` (Parrot, 2003), en donde se cuantificó el número de

procesos de remoción en masa en relación con la imagen final. El resultado que se obtuvo fue una tabla que nos muestra la cantidad de procesos que ocurrieron en las diferentes superficies (Tabla 4.3), así como el porcentaje de los mismos.

Superficie de Vegetación	Número de Procesos de Ladera	Porcentaje de Procesos
Vegetación que se ha perdido de 1989 a 2000	104	34.5
Vegetación que se ha generado de 1989 a 2000	6	1.99
Vegetación que no ha tenido cambio de 1989 a 2000	18	5.98
Poblados o suelos desnudos	88	29.2
Nubes	85	28.23
Total	301	99.9%

Tabla 4.3.1.2 relación entre el tipo de superficie forestal y la ocurrencia de procesos de ladera.

De acuerdo con la tabla anterior el 34.5% de los procesos ocurrieron en las zonas que han perdido vegetación, en tanto que el 5.98 % en superficies que no han perdido vegetación de 1989 a 2000, mientras que los poblados o suelos desnudos contienen el 29.2% de los procesos y el 1.99 % de los procesos de ladera se encuentran ubicados en lo que se considera como Poblados o suelos desnudos y por último el 28.23% pertenece a una zona de incertidumbre debido al contenido de nubes.

Los resultados del trabajo efectuado demuestran cierto nivel de correlación entre los procesos de remoción en masa y los cambios de uso del suelo. En particular, el análisis derivado de los inventarios nacionales forestales reflejó una incompatibilidad de asociación de metodologías, por lo que la validez de la comparación entre los periodos 1994 y 2000 es bastante cuestionable. Asimismo, el empleo de imágenes de satélite producidas por diferentes sensores, y por ende de distinta resolución espectral, jugó un papel importante en la determinación de las zonas afectadas tanto por cambios en el uso del suelo, como por inestabilidad de laderas. A pesar de haber tomado en cuenta algunas metodologías con la idea de comparar las imágenes disponibles (Landsat MSS, 1989 y Landsat ETM+, 2000), los datos obtenidos no pueden ser considerados como totalmente representativos, ya que la comparación entre dichas imágenes no correspondió en su totalidad a un rango espectral definido, esto se asocia principalmente a que cada tipo de sensor posee características particulares en cuanto al número de bandas. Sin embargo, cabe

destacar que aun considerando tales situaciones, fue posible establecer que el 37.5% de los procesos de remoción en masa que afectaron la Sierra Norte, el área de estudio, estuvieron relacionados con las modificaciones del ser humano en el paisaje natural, por lo que este trabajo, sin lugar a dudas desempeña una llamada atención en el posible impacto del inadecuado manejo de los recursos forestales en la incidencia de desastres naturales.

Dado lo anterior se encuentra una relación entre la ocurrencia de los procesos de remoción en masa y la ausencia de vegetación ya que el mayor porcentaje de procesos ocurridos se presenta en las áreas que tuvieron una perdida de la cubierta forestal y en los poblados o suelos desnudos, comparado con el porcentaje de procesos de ladera que han ocurrido en áreas con vegetación, es un resultado que nos muestra la relación, a pesar de los inconvenientes que existen al hacer comparaciones de imágenes de distintos sensores.

4.3.2 Metodología

En el presente trabajo se utilizaron imágenes de satélite Landsat de los sensores ETM+ y TM de las fechas: 1989 y 2000, con el objetivo de realizar un análisis comparativo de la vegetación. Dichas imágenes fueron en primer lugar georeferenciadas con el programa ENVI 3.2 , esto es, a partir de un píxel en la imagen, se dan las coordenadas correspondientes y la proyección cartográfica a ese píxel , de manera simultanea la imagen queda georeferenciada, para posteriormente obtener los recortes a partir de coordenadas, las cuales cubren el área de interés. Estos recortes deben de tener características especificas como el mismo número de columnas, renglones y un igual tamaño de píxel, para efectuar las sobre posiciones de las imágenes.

En la Figura 4.3.2.1. Se muestra de forma grafica los pasos a seguir en el tratamiento de las imágenes, para poder llegar a una comparación de la vegetación a partir del índice de vegetación NDVI.

Una vez georeferenciadas las imágenes de los distintos periodos, el siguiente paso fue obtener el índice de vegetación (NDVI), el cual básicamente es demostrar la diferencia de reflectancia de la vegetación entre el rango espectral del rojo y el infrarrojo cercano. De esta manera la formula que se utiliza es la siguiente:

$$\text{NDVI} = \frac{b3 - b4}{b3 + b4}$$

Donde b3 representa la banda 3 de las imágenes Landsat que cubre el rango espectral del rojo y b4 simboliza la banda cuatro, la cual cubre el rango del infrarrojo cercano.

Sin embargo no se puede aplicar la misma fórmula para los diferentes sensores de Landsat, pues la diferencia de rangos espectrales de la banda 4 en ambos, causa que la información de los índices de vegetación no sea similar, pues en el caso del sensor ETM+ la banda 4 considera un rango de 0.78 a 0.90 μm y el sensor TM de 0.76 a 0.90 μm . Esto ocasiona que los histogramas de los índices de vegetación de las diferentes fechas consideren valores diferentes y por lo tanto no se puede hacer una comparación.

Para la solución a este problema se utilizó el programa ADAPT_TM_ETM (Parrot, 2003), el cual reduce el rango espectral de la banda cuatro para poder hacer comparaciones de imágenes Landsat TM y ETM+, más confiables.

De esta manera se obtienen imágenes similares y se prosigue a obtener los índices de vegetación (NDVI) a partir del programa INDEX (Parrot, 2002).

Después se agrupa la información de los índices de vegetación por medio del programa Binar 3 (Parrot, 1997), el cual transforma los valores de los índices que van de 0 a 255, en solo dos valores, en esta parte existe un umbral, es decir, se deben de hacer una serie de pruebas para determinar que valores quedaran agrupados.

Los valores que se tomaron en cuenta después de una serie de pruebas fueron de 170 a 255, ya que son los más representativos de la vegetación para el año de 1989 y de 230 a 255 para el año 2000. La diferencia de valores proviene de la comparación de imágenes de diferentes sensores, con esto se verificó cierto error, sin embargo existe una aproximación que nos proporciona información sobre el estado de la vegetación. Después de seleccionar los valores en el umbral, el siguiente paso fue encontrar áreas con mayor densidad de vegetación, es decir, áreas homogéneas esto se realizó con el programa homo (Parrot, 1998) el cual delimita las áreas homogéneas a partir de los valores de los píxeles, es decir se seleccionan las zonas homogéneas con respecto a un cierto valor del píxel a partir del NDVI, utilizando una ventana móvil de 3x3 es decir se necesitan 9 píxeles con el mismo valor para marcarlo como un área homogénea; después de encontrar las áreas homogéneas en ambas imágenes se realizó un cruzamiento de las mismas de tal manera que se encontró la vegetación que no ha cambiado, la vegetación que se perdió y la vegetación que se regeneró, aunque se tomó en cuenta otros

factores como las nubes, suelos desnudo o poblados, de esta manera se llego a los resultados que se mencionan el apartado 4.3.1 de este capítulo.

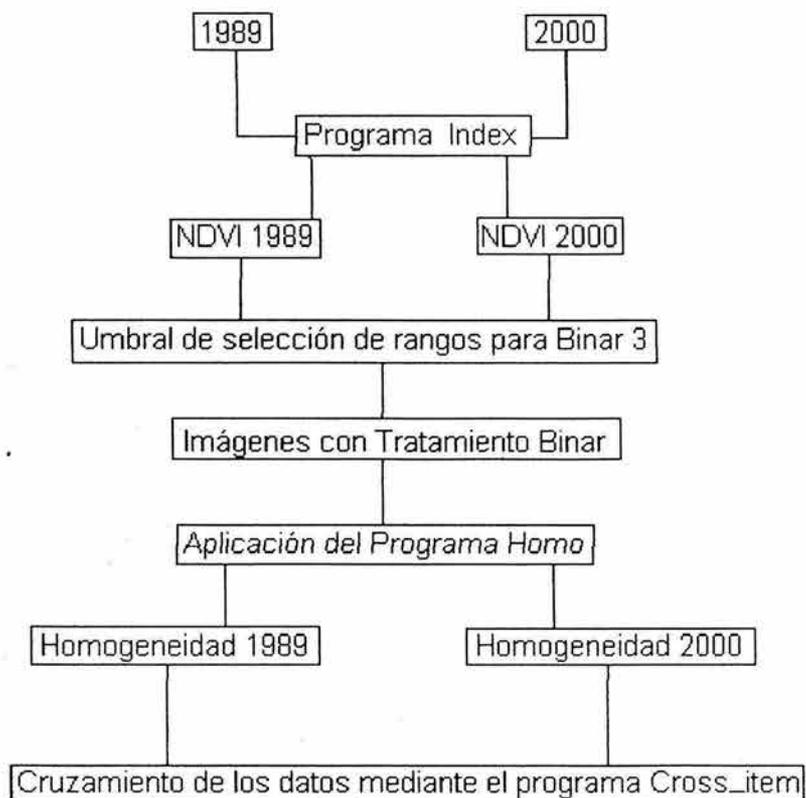


Figura 4.3.2.1 Procesos para la obtención de la dinámica vegetal.

CAPITULO 5. Conclusiones.

Las características geológicas, edafológicas y el relieve montañoso que conforman a la Sierra Norte de Puebla determinan la ocurrencia de procesos de remoción en masa de forma natural. Sin embargo existen otros factores también importantes en la distribución espacial y temporal de dichos procesos, tal es el caso de los agentes antrópicos. En particular se habían hecho observaciones en campo que sugerían que para el área de estudio la deforestación jugaba un papel importante en la incidencia de dichos procesos, de tal manera que el presente trabajo se dio a la tarea de investigar tales interacciones.

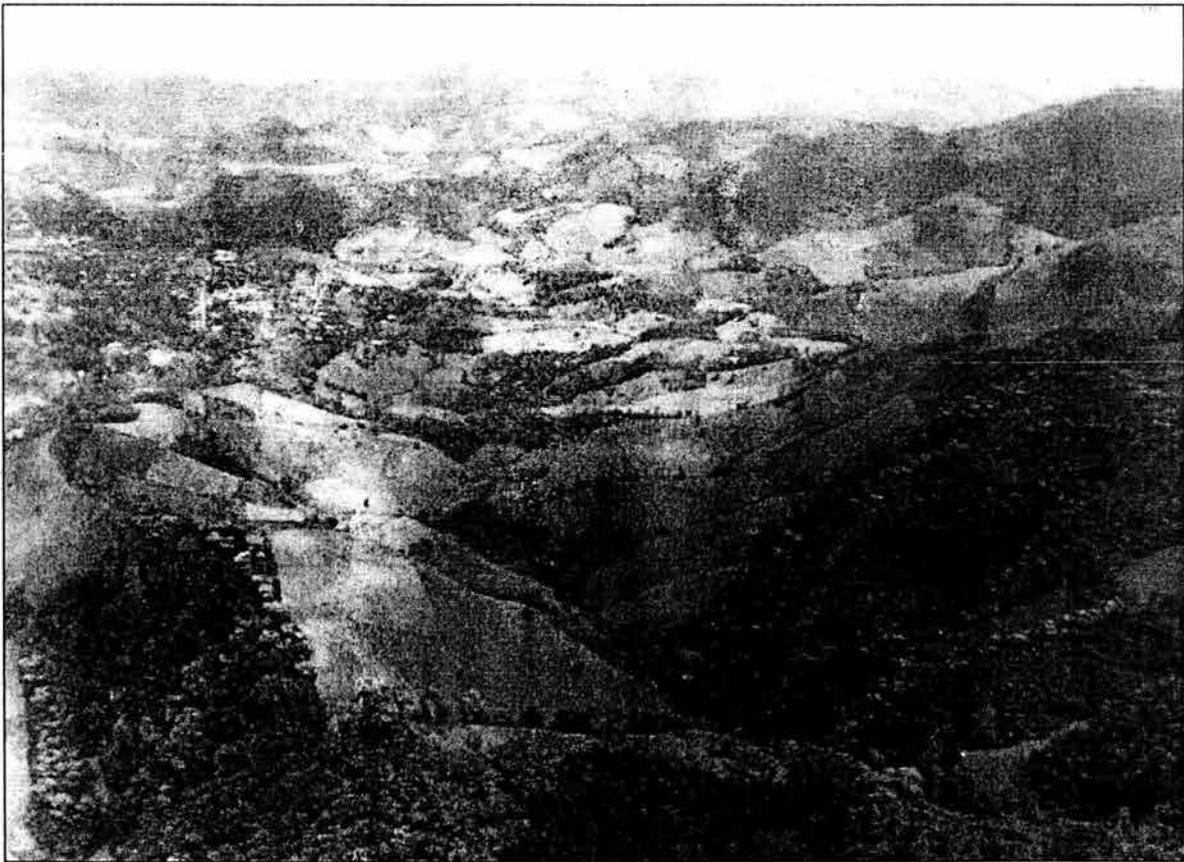


Figura 5.1 Cambio de uso de suelo en la región de Necaxa.

De acuerdo con los resultados obtenidos corroboraron la conjetura arriba mencionada. La principal causa de la deforestación en la Sierra Norte de Puebla está asociada al cambio de uso de suelo de suelo forestal a agrícola (Figura 5.1), ya que los suelos de los bosques proporcionan fertilidad para la actividad agrícola, sin embargo, después de un cierto

número de cosechas éstos se vuelven infértiles y por lo tanto son abandonados, dejando extensiones de terreno sin cubierta forestal y propensos a la dinámica de erosión de suelos e infiltración de agua. Aunado a ello, las características de los materiales y el relieve abrupto de la Sierra Norte de Puebla, favorecen la ocurrencia de los procesos de remoción en masa. De esta manera la actividad antrópica y muy en particular la deforestación son mecanismos detonadores de la inestabilidad de laderas.

Dado lo anterior es necesario contar con un monitoreo del comportamiento de la cubierta vegetal, pues así es posible localizar las áreas desprovistas de vegetación, las cuales son susceptibles a presentar movimientos del terreno; de esta manera los análisis espacio temporales se convierten en una herramienta fundamental. De acuerdo con los resultados del análisis comparativo de los inventarios forestales de 1994 y 2000 pareciera que la superficie con vegetación aumento, pues en 1994 el 21.81% de la superficie en la Sierra Norte de Puebla estaba cubierta por bosques, selvas y plantaciones forestales; y para el 2000 era el 31.87%. El calculo de estas superficies se llevo acabo sumando las áreas de los polígonos de bosques, selvas y plantaciones forestales en ambos inventarios. En realidad es difícil de asegurar que dicho cambio tuvo lugar ya que las metodologías utilizadas en la elaboración del inventario difirieron en cuanto a precisión, fuentes de información, clasificación de la cubierta vegetal, etc. No obstante, lo que si es importante resaltar, es el hecho de que al relacionar las áreas desprovistas de vegetación con la inestabilidad de laderas, se obtuvieron que indican que el 37% de los procesos de ladera (principalmente deslizamientos) desencadenados por lluvias de octubre de 1999, ocurrieron en las zonas como consideradas no forestales.

A pesar de que los resultados anteriormente descritos pueden ser considerados como una primera aproximación en cuanto a la relación vegetación-procesos de remoción en masa, fue necesario hacer otro tipo de análisis para poder sustentar de mejor manera el argumento del presente trabajo.

El avance de la tecnología a proporcionado nuevas herramientas para la realización de análisis multitemporales como los sensores remotos, los cuales proporcionan imágenes de satélite a un espacio y tiempo determinado. Dado lo anterior se utilizaron imágenes de satélite Landsat TM del 26 de octubre de 1989 y Landsat ETM+ del 22 de octubre del

2000, es decir de una fecha anterior y una fecha posterior a la ocurrencia de los movimientos de ladera en octubre de 1999.

Dichas imágenes fueron sometidas a un tratamiento para obtener el índice de vegetación de las diferentes fechas y realizar comparaciones, de tal manera que se observara la disminución de cubierta forestal en dicho periodo.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 34.5% de los procesos de ladera registrados, ocurrió en zonas que perdieron la cubierta vegetal durante el periodo de 1989-2000, en tanto que el 5.98% ocurrieron en superficies con vegetación. De igual manera al identificarse, a través de las imágenes, superficies que corresponden a suelos desnudos o bien con núcleos de población, se obtuvo que 29.2% de los procesos tuvo lugar en ellas. Finalmente cabe destacar que debido a la presencia de nubes en algunas áreas de las imágenes, 28.23% de los procesos gravitacionales se ubicaron en áreas de incertidumbre.

Los resultados anteriores sugieren que existe una relación entre la inestabilidad de las laderas y las zonas con ausencia de vegetación, resultado del proceso de deforestación suscitado por el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola, por lo que es importante llevar a cabo una investigación más detallada que establezcan de manera precisa cuál es el impacto de éste tipo de actividades antrópicas en la ocurrencia de peligros por remoción en masa.

La utilidad de este trabajo versa en el hecho de haber obtenido resultados que muestran como la distribución espacial y temporal de la inestabilidad de las laderas está influenciada por las transformaciones que los seres humanos hacen en el paisaje, en particular a través de la deforestación. Con los resultados obtenidos es posible mostrar la relación entre las áreas desprovistas de vegetación y la inestabilidad de las laderas, también es posible la identificación de sitios críticos, que sin lugar a duda requieren de una atención adecuada.

En el caso de las zonas como la Sierra Norte de Puebla, donde existe un nivel de vulnerabilidad muy alto de las comunidades, y la población se encuentra en zonas de riesgo potencial, es muy importante contar con este tipo de trabajos, ya que a través de

una aplicación adecuada, y de la realización de trabajos complementarios; es posible elaborar estrategias de prevención de desastres.

Finalmente es importante destacar que los cambios de uso de suelo y la constante expansión de asentamientos humanos crean las condiciones necesarias para propiciar situaciones de riesgo, y lamentablemente en muchos casos, que éstos se conviertan en desastres, tal como ocurrió en octubre de 1999.

ANEXO 1
INVENTARIO FORESTAL 1994
BOSQUES

BOSQUE MESOFILO DE MONTAÑA: Superficie: 1411,879 hectáreas.

Este tipo de vegetación incluye comunidades vegetales clasificadas como bosque caducifolio, "selva nublada" y "selva mediana" en áreas de transición. Las principales especies son: *Nyssa sylvatica*, *Ostrya virginiana*, *Alnus arguta*, *Junglas mollis*, *Magnolia dealbata*, *Podocarpus matudae*, *Dussia mexicana*, *Turpinia insignis*, *Cornus disciflora*, *Ficus velutina*, *Liquidambar styraciflua* y *Ulmus mexicana*. El bosque mesófilo de montaña abierto es aquel cuya cobertura de su copa oscila entre el 10 y el 40%; el bosque mesófilo de montaña cerrado es mayor al 40%.

BOSQUE DE PINO: Superficie: 5238,681 hectáreas.

Se caracteriza por la presencia del genero *Pinus spp* en un porcentaje mayor al 80%. Se localiza principalmente en las regiones montañosas del país, en climas donde la temperatura media anual fluctúa entre 6 a 28°C, y en altitudes entre 1,500 y 3,000 metros sobre el nivel de l mar; aunque se da el caso de *Pinus caribea*, que se desarrolla al nivel del mar o del *Pinus hartwegii* que se encuentra en altitudes superiores a los 3000 metros. Las especies de *Pinus* de mayor valor económico por su aprovechamiento con fines maderables en el país son: *Pinus engelmanni*, *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* y *Pinus arizonica* entre otros. El bosque de pino abierto es aquel cuya cobertura de copa oscila entre 10 y 40%. Las coberturas mayores al 40% constituyen el bosque de pino cerrado.

BOSQUE DE OYAMEL: Superficie 193,717 hectáreas.

Se encuentra formando masas puras y mezcladas con *Pinus spp* y *Quercus spp*, a una altitud que fluctúa entre 2,400 y 3,600 msnm, en climas ligeramente húmedos sin estaciones frías y calientes bien diferenciadas, con una temperatura entre 7 y 15°C y precipitación media anual de 1,000 mm. En México se han identificado cuatro especies del genero *Abies*: *Abies religiosa*, *Abies concolor*, *Abies arizonica* y *Abies guatemalensis*.

El bosque de oyamel abierto es aquel cuya cobertura de copa oscila entre 10 y 40%. En el bosque de oyamel cerrado es mayor del 40%.

BOSQUE DE OTRAS CONÍFERAS: Superficie: 867,880 hectáreas.

Dentro de este grupo vegetativo se incluyen los bosques de los géneros *Juniperus spp*, *Pseudotsuga spp*, *Cupessus spp* y *Picea spp*.

BOSQUE DE PINO ENCINO: Superficie: 10937,964 hectáreas.

Comprende las comunidades mezcladas de los géneros *Pinus* y *Quercus* en proporciones diversas, siendo difícil separar un componente de otro debido a la heterogeneidad con que se presenta se distribuye en casi todas las montañas y sierras del país en áreas cuyas altitudes están desde casi el nivel del mar hasta los 3,100 metros, con una temperatura media anual que varía entre 10 y 26°C y un precipitación media anual entre 600 y 1,200 mm. Las combinaciones de las especies tanto de pino como encino, varían de acuerdo al suelo y altitud de la región. Las especies más importantes de este tipo de bosque son: *Pinus herreraei*, *P. Teocote*, *P. Patula*, *P. Arizonica*, *P. Engelmanni*, *P. montezumae*, *P. Pseudostrobus*; y en el caso de los encinos son: *Quercus resinosa*, *Q. Castanea*, *Q. Arizonica*, *Q. Rugosa*, *Q. Crassifolia* y *Q. Mexicana*. El bosque de pino encino abierto es aquel cuya cobertura de copa oscila entre 10 y 40%, bosque de pino encino cerrado la cobertura es mayor del 40%.

BOSQUE DE ENCINO: Superficie: 9518,561 hectáreas.

Esta asociación vegetal se localiza en las zonas montañosas del país, junto con los pinares constituyen la mayor cubierta vegetal de las áreas de clima templado frío y semi-húmedo. Su distribución es casi toda la república, en altitudes que van casi desde el nivel del mar hasta 3,100 metros, aunque la mayoría se encuentra entre 800 y 1,200 msnm.

Las principales especies son: *Quercus tuberculata*, *Q. Devia*, *Q. Chihuahuensis*, *Q. Arizonica*, *Q. Crassifolia*, *Q. Aristata*, *Q. Resinosa* *Q. Mexicana*.

SELVAS

SELVA ALTA Y MEDIANA: Superficie: 5793,910 hectáreas.

Esta clase incluye las selvas altas, que se presentan como comunidades vegetales arbóreas densas y de composición compleja, consideradas como el tipo de vegetación más exuberante de climas tropicales. El estrato superior mide por lo general más de 30 metros. Con frecuencia se presentan individuos de más de 45 m de alto. Los otros dos o tres estratos arbóreos ocupan los espacios correspondientes a alturas de 5 a 20m. por lo común no todos los componentes son estrictamente perennifolios, pues algunos pierden sus hojas durante una corta temporada en la parte seca del año, que a menudo coincide con la época de la floración del árbol. A pesar de ello y debido sobre todo a la falta de coincidencia del periodo de caída de las hojas entre las diferentes especies que la realizan, el bosque nunca pierde totalmente su verdor. También se incluyen las selvas medianas que son comunidades arboladas con alturas promedio que van de 20 a 30 metros, habitan en climas cálido-húmedos y son muy parecidas, en cuanto a componentes y condiciones ecológicas de presencia, a las selvas altas.

Tienen como componentes a *Hymenaea courbaril* (guapinol), *Enterolobium cyclocarpum* (guanacastle), *Cedrela odorata* (cedro), *Licania arborea* (totoposte), *Roseodendron donell-smithii* (primavera), *Hura polyandra* (jabilla), etc. Cubren áreas importantes, tanto en las vertientes del golfo de México, como del océano pacífico, así como porciones de la península de Yucatán. Respecto a la clasificación del INEGI, en esta clase se incluyen los siguientes tipos de vegetación:

Selva alta y mediana perennifolia – más del 75% de las especies conservan la hoja todo el año.

Selva alta y mediana subperennifolia – en la época más seca del año entre el 25 y 50% de los árboles tiran las hojas.

Selva mediana caducifolia – más del 75% de los árboles tiran las hojas en la época más seca del año. Se distribuyen frecuentemente sobre laderas de cerros.

Selva mediana subcaducifolia- entre el 50 y 75% de las especies tiran la hoja en la época mas seca del año.

SELVA BAJA: Superficie: 10948,862 hectáreas.

Se caracterizan por que sus componentes arbóreos varían en alturas de 4 a 15 metros, mas frecuentemente entre 8 y 12 metros. Casi todas sus especies pierden sus hojas por periodos largos durante el año. Se incluyen en esta clase las selvas bajas perennifolias, subperennifolias, subcaducifolias, caducifolias y selvas bajas espinosas. Sus principales especies son: *Bursera simaruba*, *Lysiloma divaricata*, *Phoebe tampicensis*, *Acacia cuolteri*, *Beaucarnea inermis*, *Lysiloma acapulcensis* y *zuelania guidonia*.

BOSQUES Y SELVA FRAGMENTADOS

BOSQUE FRAGMENTADO: Superficie: 3561,695 hectáreas.

Bosque de clima templado que se encuentran afectados por actividades agropecuarias al grado de quedar solo manchones de la vegetación original, distribuidos homogéneamente sobre el terreno, a partir de los cuales se puede dar una recuperación de la vegetación clímax.

SELVA FRAGMENTADA: Superficie: 6785,674 hectáreas.

Vegetación arbórea de clima cálido-húmedo, representada por selvas parcialmente desmontadas. Permanecen acahuals conformados por comunidades vegetales secundarias, donde la dinámica de población se encuentra en vías de recuperación hacia el tipo de vegetación clímax.

Su distribución se ubica en todas las áreas con vegetación de clima tropical húmedo y seco, particularmente en la península de Yucatán y en las franjas costeras de ambos litorales.

MEZQUITAL Y HUIZACHAL: Superficie: 4092,178 hectáreas.

Las comunidades vegetales que agrupan a esta clasificación, se caracterizan por ser árboles bajos espinosos de 4 a 15 metros de altura predominando los géneros *Prosopis spp.* y *Acacia spp.*; se desarrollan en climas más secos que las selvas bajas caducifolias y más húmedos que los matorrales xerófilos.

CHAPARRAL: Superficie: 2846,434 hectáreas.

Asociación generalmente densa de arbustos resistentes al fuego, de 1 a 2 metros de altura, que se desarrolla principalmente en laderas de cerros por arriba del nivel de los matorrales de zonas áridas y semiáridas, de pastizales naturales y en ocasiones mezclada con bosques de pino y encino.

Esta formada por especies arbustivas de *Quercus spp.*, *Adenostoma spp.*, *Arctostaphylos spp.*, *Cercocarpus spp.*, entre otros.

MATORRALES

MATORRAL SUBTROPICAL: Superficie: 2929,648 hectáreas.

Comunidad vegetal formada por arbustos o árboles bajos inertes o espinosos, que se desarrollan en una amplia zona de transición ecológica entre la selva baja caducifolia y los bosques templados (de pino o pino-encino), y el matorral de zonas áridas y semiáridas. La mayor parte de las plantas que la constituyen pierden su follaje durante un periodo prolongado del año. Algunas de las especies más frecuentes en este tipo de matorrales son: *Ipomoea spp.*, *Burserra spp.*, *Eysenhardtia polystachya*, *Acacia pennatula*, *Forestiera spp.*, *Erythrina spp.*

MATORRAL SUBMONTANO: Superficie: 2925,055 hectáreas.

Este tipo de matorral se encuentra generalmente entre los límites de los matorrales áridos, bosques de encino y la selva baja caducifolia, principalmente en las partes bajas de ambas vertientes de la sierra Madre Oriental, desde Nuevo León, San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro. Rara vez se encuentra por arriba de los 2,000 msnm. También se encuentran en pequeñas elevaciones en Durango, Coahuila y Nuevo León. Las especies más frecuentes que forman este matorral son: *Heletta parviflora*, *Cordia boissieri*, *Mimosa leucaenoides*, *Gochnatia hypoleuca*, *Quercus fusiformis*, *Neopringlea integrifolia* y *Pithecellobium brevifolium*.

MATORRAL ESPINOSO: Superficie: 4399,626 hectáreas.

Este tipo de matorral se caracteriza por la dominancia de especies espinosas y caducifolias una gran parte del año o áfilas (sin hojas). Se desarrolla en una amplia zona de transición entre el matorral desértico microfilo, el matorral submontano, el mezquital y la selva baja espinosa del noroeste de la república. Algunas de las principales especies son: *Acacia spp.*, *Cercidium spp.*, *Leucophyllum spp.*, *Prosopis spp.*, *Condalia spp.* y *Castela tortuosa*.

MATORRAL XERÓFITO: Superficie: 41279,457 hectáreas.

La cubierta vegetal de los climas áridos es tan variada desde un punto de vista fisiológico que la superficie que cubre representa aproximadamente el 21% del territorio nacional. Los tipos de vegetación que se identifican en esta clase son los siguientes:

Matorral crasicaule- agrupan a las comunidades como nopaleras (*Opuntia spp.*) cardonales (*Lemaireocereus spp.*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Neobuxbaumia tetetzo*, *Carnegiea gigantea* y *Cephalocereus senilis*) y tetecheras.

Matorral sarcocaulo- comunidad vegetal caracterizada por la dominancia de arbustos de tallos carnosos, algunos de corteza papirácea. Dentro de este matorral se encuentran especies como la *Jatropha cinerea*, *Bursera microphylla* y *B. Odorata*.

Matorral sarco-crasicaule- las especies mas conspicuas son el cirio *Fouquieria columnaris*, *Pachycereus pringlei*, *Pachycormus discolor*, *Pedilanthus macrocarpus*.

Matorral sarco-crasicaule de neblina- se le considera semejante a los desiertos de neblina. Las especies mas comunes que constituyen este tipo vegetativo son: *Pachycereus pringlei*, *Machaerocereus gummosus*, *M. eruca*, *Lophocereus schoottii*, *Llemairocereus thurberi*, *Opuntia ssp.*, *Jatrpha cinerea*, *Bursera ssp.*, *Fouquieria peninsularis* y *Pachycormus discolor*.

VEGETACIÓN HIDRÓFILA.

VEGETACIÓN HIDRÓFILA: Superficie: 1115,203 hectáreas.

Se constituyen por comunidades vegetales que viven en lugares pantanosos e inundables de aguas dulces o salobres poco profundas. Incluye los tipos de vegetación popal y tular. Las especies mas frecuentes que forman este tipo de vegetación son en popales: *Talía geniculata*, *Calathea spp.*, *Heliconia spp.*, y en tulares: *Typha spp.*, *Scirpus spp.*, *Cladium Jamaicense*, *Phragmites communis*, *Arundo donax* y *Cyperus spp.*

MANGLAR: Superficie: 721,554 hectáreas.

Comunidades vegetales densas frecuentemente arbustivas o bien arborescentes de 3 a 5 metros de altura generalmente, pueden alcanzar hasta 25 metros. Habitan en orilla bajas y fangosas de la costa son característicos de esteros y desembocaduras de ríos. Sus componentes son: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Leguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo).

OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN

SABANA: Superficie: 512,524 hectáreas

Son praderas de gramíneas y ciperáceas con vegetación arbórea espaciada en las regiones de clima cálido húmedo con drenaje deficiente, se encuentra la mayor extensión en el sureste del país. Las especies de árboles de mayor importancia son: *Byrsonima crassifolia*, *Curatella americana*, *Crecentia alata* y *Crecentia cujete*. Las especies herbáceas presentes son importantes para el pastoreo del ganado.

PALMAR: Superficie: 101,849 hectáreas

Asociación a plantas monopódicas comúnmente conocidas como palmas que crecen en zonas tropicales del país. Se les encuentra frecuentemente dentro del área de las selvas o como resultado de la perturbación de las mismas; también formando vegetación de galería en regiones semiáridas. Algunos de los palmares mas conocidos son los formados por: *Sabal spp.*, *Scheelea spp.*, *Washingtonia spp.*, *Orbignya guacuyule*, *Erythea spp.*, *Brahea spp.*, *Paurotis spp.* y *Wrightii spp.*

SELVA DE GALERIA: Superficie: 163,809 hectáreas.

Este tipo de vegetación se desarrolla en los márgenes de río y arroyos debido a la mayor humedad existente en áreas de clima tropical. Se presenta como vegetación arbórea diferente a la circundante y puede estar compuesta de especies arbóreas como *Pachira acuatica* y *Picus spp.*

BOSQUE DE GALERIA: Superficie: 52,144 hectáreas.

Este tipo de vegetación se desarrolla en los márgenes de ríos y arroyos, debido a la mayor humedad existente en áreas del clima templado frío. Se presenta como vegetación arbórea diferente a la circundante y puede estar compuesta de especies arbóreas como *Taxodium mucronatum*, *Salís spp.*, *Fraxinus spp.*, *Populus spp.*, *Platanus spp.*, o de especies como la *Baccharis spp.* (jarrilla) o el *Chilopsis linearis* (mimbre).

VEGETACIÓN HALOFILA: Superficie: 3048,140 hectáreas.

Se constituyen por comunidades vegetales arbustivas o herbáceas que se desarrollan sobre suelos con alto contenido de sales, en las partes bajas de cuencas cerradas de las zonas áridas y semiáridas, así como cerca de las lagunas costeras en áreas de marismas. Son comunes las asociaciones de *Atriplex spp.*, *Suaeda spp.*, *Distichlis spp.*, *Salsola spp.*, *Opuntia spp.*, *Frankenia spp.*, *Batis maritima* y *limonium californicum*.

VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS: Superficie: 2168,755 hectáreas.

Manchones de vegetación que invaden las dunas de las zonas áridas y semiáridas y las van fijando progresivamente. Esta vegetación se integra de especies propias de las áreas circunvecinas y con frecuencia están formadas por: *Prosopis spp.*, *Larrea tridentata*, *Opuntia spp.*, *Atriplex spp.*, *Ambrosia dumosa* y *Ephedra trifurca*. La mayor parte no tiene un uso aparente, aunque es importante para la actividad ganadera. Cuando existe agua de riego se puede convertir en zonas agrícolas.

VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS: Superficie: 131,783 hectáreas.

Comunidad vegetal que se establece en dunas localizadas a largo de las costas. Algunas de las especies que pueden presentarse son el *Batis maritima*, *Abronia maritima*, *Chrysobalanus icaco*, *Opuntia dillenii*, *Cocoloba spp.*, *Bromelia pinguin*, y otras arbustivas o arbóreas que pueden proceder de la vegetación continua. Cabe hacer notar que estas áreas en general tienden a ser ocupadas por plantaciones agrícolas de cocoteros.

AREAS FORESTALES PERTURBADAS: Superficie: 22235,474 hectáreas.

Áreas que han sido deforestadas con fines diversos tales como agricultura, ganadería, infraestructura y centros de población. Mientras que en los bosques y selvas fragmentadas persisten entremezclados manchones de vegetación arbórea que no es posible separar, en las áreas perturbadas solo se encuentran relictos de la vegetación natural.

AGRICULTURA DE RIEGO

Se refiere a las tierras dedicadas a la agricultura en las cuales se dispone de agua para irrigación por lo menos una vez durante el ciclo agrícola, mediante riego de punteo, auxilio o completo.

AGRICULTURA DE TEMPORAL

Este concepto comprende todas las tierras abiertas a la agricultura tanto en regiones de relieve uniforme, como irregular, que se encuentran en explotación actual en descanso o abandono, condicionadas desde luego a la precipitación pluvial. Incluye las clases de agricultura nómada, de humedad y de riego suspendido. Este uso del suelo constituye la actividad económica más importante del medio rural y aunque esta ampliamente distribuida en el país, existe una mayor concentración en la altiplanicie central y en las costas del golfo de México.

PLANTACIONES AGRÍCOLAS

Terrenos cultivados con especies como el hule, cocotero, palma aceitera, cafetales, cítricos, etc.

PLANTACIONES FORESTALES: Superficie: 63,251 hectáreas.

Son todas las áreas que actualmente están artificialmente reforestadas con especies arbóreas en terrenos que en la mayoría de los casos se encontraban con escasa vegetación. En las cartas de tipos de vegetación y uso del suelo de INEGI escala 1:250,000 aparecían en usos agropecuarios y en las imágenes de satélite se aprecian como vegetación de bosques.

PASTIZALES

En esta clase se consideran las áreas que sustentan una cobertura de gramíneas que puede ser natural, inducida o cultivada, cuyo destino principal es el uso pecuario. Existen grandes extensiones distribuidas en todo el país, incluye los pastizales natural, halófilo, gipsófilo, inducido, cultivado, de alta montaña y los de condiciones sábanoides.

OTROS

ÁREAS SIN VEGETACIÓN APARENTE: Superficie: 915,441 hectáreas.

La mayor extensión se localiza en la región desértica del Noroeste, en los desiertos de Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango y en pequeñas superficies que se encuentran dispersas a lo largo del país, formando dunas litorales, corrientes de lava en zonas volcánicas y en las cimas rocoso-arenosas de las altas montañas.

CUERPOS DE AGUA

Se refiere a los mayores depósitos de aguas interiores como son lagos, lagunas, presas y bordos posibles de detectar en las imágenes de satélite.

ZONAS URBANAS

Se refiere a las principales ciudades y localidades urbanas, tanto de las zonas habitacionales como las industriales y de recreo. Cabe hacer notar que únicamente se tomo en cuenta las ciudades que en los mapas topográficos 1:250,000 de INEGI se indican como de más de 40,000 habitantes (SARH, UNAM, Inventario Nacional Forestal Periódico, 1994). El inventario forestal se realizo a partir del análisis visual de 74 imágenes Landsat TM y la cartografía elaborada por INEGI. De esta manera se puede observar en la figura 3.1, la distribución de los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo en la Sierra Norte de Puebla durante el periodo de 1992-1994.

ANEXO2
INVENTARIO FORESTAL 2000

CULTIVOS

Superficie en la que el suelo es utilizado para la siembra de cultivos agrícolas o de árboles (plantaciones).

USO DE SUELO: Se define la forma predominante de la utilización del suelo, de acuerdo con la presencia o no de cultivos agrícolas o forestales, y la utilización o no de sistemas de riego.

DOMINIO DE VALORES: Agricultura (riego y humedad): Superficie en la que el suelo es utilizado para cultivos agrícolas, mismos que reciben agua mediante algún sistema de riego o que aprovechan la humedad residual del suelo, ya sea antes de empezar, o después de haber terminado la temporada de lluvias.

Agricultura (de temporal): Superficie en la que el suelo es utilizado para cultivos agrícolas que reciben agua de lluvia únicamente (aplica para la categoría "otras coberturas").

Plantación forestal: Superficie en donde se siembran árboles en terrenos no forestales y/o de aptitud preferentemente forésta, usualmente de la misma especie (nativas o introducidas), con fines productivos, generalmente en masas coetáneas, casi siempre homogéneas.

OTRAS COBERTURAS: Se definen las superficies agrícolas de acuerdo con la forma en que los cultivos reciben agua durante el ciclo agrícola.

DOMINIO DE VALORES: Riego y riego eventual: Los cultivos reciben agua mediante algún sistema de riego durante parte o todo su ciclo agrícola.

Humedad: Los cultivos aprovechan la humedad residual del suelo en zonas inundables al final de la temporada de lluvias, o antes de ésta.

Riego suspendido: Superficies cuya infraestructura de riego no está siendo utilizada actualmente.

Pastizal cultivado: Comunidad dominada por gramíneas y graminoides, establecida por el hombre mediante la siembra de semillas y subsecuentes labores de cultivo.

SUBCOMUNIDAD. Se define de acuerdo con la duración del ciclo agrícola.

Permanente y semipermanente: Los cultivos permanecen en el terreno más de 2 años (por ejemplo aguacate, cítricos, caña de azúcar).

Anual: La duración del ciclo de cultivo es menor a un año.

Nota: El tipo de agricultura "pastizal cultivado" se incluye en la formación cultivos sin considerar la forma en que los cultivos reciben agua durante el ciclo agrícola. Sin embargo, se trata de un uso asociado a la agricultura de riego.

BOSQUES

Vegetación predominantemente arbórea, principalmente de zonas templadas a semifrías, en climas subhúmedos a muy húmedos. Se caracterizan por tener especies arbóreas dominantes con afinidad boreal.

TIPO. Se define el tipo de bosque considerando la presencia o no de conos y la forma de las hojas en las especies dominantes del dosel, o de acuerdo con la presencia o no de alta humedad atmosférica durante la mayor parte del año.

DOMINIO DE VALORES: Coníferas: Predomina árboles que tienen frutos en forma de cono (gimnospermas) y hojas aciculiformes (en forma de aguja) o escuamiformes (en forma de escama).

Coníferas y latifoliadas: La dominancia es compartida por árboles que tienen frutos en forma de cono (gimnospermas) y hojas aciculiformes, y árboles cuyos frutos generalmente no toman la forma de cono (angiospermas), de hoja ancha y plana.

Latifoliadas: Predominan árboles cuyos frutos generalmente no toman la forma de cono (angiospermas), de hoja ancha y plana.

Mesófilo de montaña: Bosques medianos a altos (de entre 15 y 35 m) densos, principalmente caracterizado por árboles de los géneros *Magnolia*, *Fagus*, *Oreomunnea*, *Clethra*, *Liquidambar*, *Podocarpus*, *Styrax*, *Symplocos* y *Chiranthodendron*, entre otros. En climas de templado a semicálido húmedo y subhúmedo, pero con alta humedad atmosférica durante todo el año.

COMUNIDAD: Se definen las comunidades del bosque de acuerdo con su fisonomía, dominancia, taxa dominantes del dosel y factores ecológicos.

DOMINIO DE VALORES:

Bosque de táscate: Bosques bajos (preferentemente de 2 a 6 m de altura), abiertos, formados por táscate; género *Juniperus*; en climas templados a semifríos y subhúmedos.

Bosque de oyamel (incluye ayarín y cedro): Bosque alto de entre 20 y 40 m, cerrados, dominados por *Abies*, *Pseudotsuga*, *Picea* y *Cupressus*. En climas templados domina *Cupressus*, y en climas semifríos y húmedos domina *Abies*.

Bosque de pino: Bosques bajos a altos preferentemente entre 8 y 25 m dominado por *Pinus*, de abiertos a cerrados, de amplia distribución desde climas templados a semifríos (*Pinus hartwegii*) a climas tropicales (*P. oocarpa*).

Matorral de coníferas: Comunidad arbustiva densa, de 1 a 5 m de altura, cerca del límite altitudinal de los bosques, formada por algunas especies de *Pinus* (*P. culminicola*) y *Juniperus*; en climas templados subhúmedos.

Bosque bajo abierto: Comunidad arbórea (preferentemente de *Quercus*, *Pinus* y *Juniperus*), baja (de entre 5 y 10 m) y abierta, con un estrato de gramíneas bien definido.

Se encuentra en algunas zonas de transición entre bosques y pastizales (principalmente en el norte del país). En climas templados subhúmedos.

Bosque de pino-encino (incluye encino-pino): Bosque mixto de pino-encino (*Pinus-Quercus*) o encino-pino (*Quercus-Pinus*), mediano (preferentemente entre 5 y 20 m), denso, sin importar la dominancia de uno u otro género. En climas templados húmedos y subhúmedos.

Bosque de encino: Bosques de estructuras variadas, con alturas que oscilan entre 2 y 30 m, dominados por especies del género *Quercus*, distribuidos ampliamente en zonas de climas templado húmedo a subhúmedo, hasta zonas de climas semicálidos subhúmedo a seco.

SUBCOMUNIDAD. Se define por la presencia de vegetación secundaria. Indica alguna fase de transformación en donde la vegetación original (primaria) ha sido eliminada o perturbada.

DOMINIO DE VALORES:

Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea: Incluye áreas con vegetación original (primaria) y áreas con vegetación secundaria arbórea. La fisonomía original permanece. Se considera como una fase sucesional madura. Con el tiempo y en condiciones naturales favorables se puede restablecer la vegetación original.

Vegetación secundaria arbustiva y herbácea: Incluye áreas con vegetación secundaria donde predominan arbustos y hierbas. Se considera como una fase sucesional temprana que con el tiempo y en condiciones naturales se puede restablecer la vegetación original.

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Coníferas, Bosque de táscate, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Coníferas, Bosque de táscate, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Coníferas, Bosque de oyamel (incluye ayarín y cedro), Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Coníferas, Bosque de oyamel (incluye ayarín y cedro), Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Coníferas, Bosque de pino, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Coníferas, Bosque de pino, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Coníferas, Matorral de coníferas, Ninguno.

Coníferas, Matorral de coníferas, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Coníferas y latifoliadas, Bosque bajo abierto, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Coníferas y latifoliadas, Bosque bajo abierto, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Coníferas y latifoliadas, Bosque de pino-encino (incluye encino-pino), Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Coníferas y latifoliadas, Bosque de pino-encino (incluye encino-pino), Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Latifoliadas, Bosque de encino, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Latifoliadas, Bosque de encino, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Bosque mesófilo de montaña, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Bosque mesófilo de montaña, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

SELVAS

Vegetación predominantemente arbórea en climas cálido-húmedos a cálido-subhúmedos.

Se caracterizan por tener especies arbóreas de afinidad tropical.

TIPO: Se define de acuerdo con la permanencia del follaje un en porcentaje determinado, a lo largo del año (fenología).

DOMINIO DE VALORES:

Perennifolia y subperennifolia: menos del 50% de los árboles pierden el follaje en la estación de sequía.

Caducifolia y subcaducifolia: más del 50 % de los árboles pierden el follaje en la estación de sequía.

COMUNIDAD: Se definen las comunidades de selva de acuerdo con la altura de la vegetación, la permanencia del follaje a lo largo del año y taxa dominantes.

DOMINIO DE VALORES:

Selva alta y mediana perennifolia: Vegetación arbórea de entre 20 y 35 m de altura en climas cálido-húmedos sin o con estación seca de corta duración; menos del 25 % de los árboles pierden follaje a lo largo del año. Los taxa más conspicuos son: *Terminalia*, *Swietenia*, *Brosimum*, entre otros.

Selva baja perennifolia: Vegetación arbórea de entre 4 y 15 m de altura, en climas cálido-húmedos, generalmente en terrenos inundados permanentemente. Sus especies características son *Pachira acuatica*, *Chrysobalanus icaco* y *Calophyllum brasilense*, entre otras.

Selva alta y mediana subperennifolia: Vegetación arbórea de 20 m o más de altura; durante la estación seca del 25 al 50 % de los árboles pierden el follaje. Algunos de los taxa más representativos son: *Alseis*, *Pterocarpus*, *Carpodiptera*, *Manilkara*, entre otros.

Selva baja subperennifolia: Vegetación arbórea de 15 a 20 m de altura. Del 25 al 50 % de los árboles pierden el follaje durante la estación seca. Se encuentran en suelos con drenaje deficiente. Algunos taxa característicos son *Haematoxylum campechianum*, *Metopium brownei*, *Byrsonima crassifolia* y *Crescentia*.

Selva mediana caducifolia y subcaducifolia: Vegetación arbórea de entre 15 y 20 m de altura. Más del 50 % de los árboles pierden el follaje durante la estación seca. Se desarrolla en climas cálido semisecos. Los géneros típicos son: *Enterolobium*, *Hymenaea*, *Orbignya*, entre otros.

Selva baja caducifolia y subcaducifolia: Vegetación arbórea de entre 4 y 5 m de altura, en climas cálido-semisecos. Más del 50% de los árboles pierden el follaje durante la estación seca. Los géneros típicos son: *Plumeria*, *Bursera*, *Gyrocarpus*, *Spondias*, *Pseudosmodingium*, entre otros.

Matorral subtropical: Vegetación formada por arbustos o árboles bajos espinosos e inermes, caducifolios en la estación de sequía. Constituye una comunidad de transición entre bosques o selvas de clima subhúmedo y la vegetación de zonas áridas y

semiáridas. Sus taxa más comunes son: *Ipomoea murucoides*, *Heliocarpus*, *Eysenhardtia*, principalmente.

Selva baja espinosa: Vegetación dominada por árboles espinosos de 4 a 15 m de altura; principalmente en terrenos planos. Los géneros típicos son: *Cercidium*, *Olneya*, *Pithecellobium* [entre muchos otros compartidos con el mezquital (*Prosopis*)].

SUBCOMUNIDAD: Se define por la presencia de vegetación secundaria. Indica alguna fase de transformación en donde la vegetación original (primaria) ha sido eliminada o perturbada.

DOMINIO DE VALORES:

Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea: Incluye áreas con vegetación original (primaria) y áreas con vegetación secundaria arbórea. La fisonomía original permanece. Se considera como una fase sucesional madura. Con el tiempo y en condiciones naturales favorables se puede restablecer la vegetación original.

Vegetación secundaria arbustiva y herbácea: Incluye áreas con vegetación secundaria donde predominan arbustos y hierbas. Se considera como una fase sucesional temprana o intermedia que con el tiempo y en condiciones naturales se puede restablecer la vegetación original.

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Perennifolia y subperennifolia, Selva alta y mediana perennifolia, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva alta y mediana perennifolia, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva baja perennifolia, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva baja perennifolia, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva alta y mediana subperennifolia, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva alta y mediana subperennifolia, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva baja subperennifolia, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Perennifolia y subperennifolia, Selva baja subperennifolia, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea

Caducifolia y subcaducifolia, Selva mediana caducifolia y subcaducifolia, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Caducifolia y subcaducifolia, Selva mediana caducifolia y subcaducifolia, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Caducifolia y subcaducifolia, Selva baja caducifolia y subcaducifolia, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Caducifolia y subcaducifolia, Selva baja caducifolia y subcaducifolia, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Caducifolia y subcaducifolia, Matorral subtropical, Ninguno.

Caducifolia y subcaducifolia, Matorral subtropical, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Caducifolia y subcaducifolia, Selva baja espinosa, Vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea.

Caducifolia y subcaducifolia, Selva baja espinosa, Vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

Notas: En esta formación (Selvas) se incluye la comunidad "matorral subtropical" por su afinidad fitogeográfica, mas que por su fisonomía.

La composición florística puede ser compartida entre dos comunidades diferentes; lo que cambia es la dominancia de taxa y permanece la estructura típica.

MATORRAL

Vegetación predominantemente arbustiva, de densidad, composición florística y altura variable. Se desarrolla generalmente en zonas de clima árido y semiárido.

TIPO: Se define el tipo de matorral de acuerdo con la forma biológica de los taxa predominantes.

DOMINIO DE VALORES:

Mezquital (incluye Huizachal): Vegetación arbórea o arbustiva, dominada por mezquites (género *Prosopis*) o huizaches (género *Acacia*), y que se desarrolla de preferencia en planicies con suelos profundos.

Matorral xerófilo: Matorrales dominados por plantas arbustivas, cactáceas u otras suculentas, espinosas o inermes, que se desarrollan en las zonas áridas y semiáridas del país.

COMUNIDAD: Se definen las comunidades de matorral xerófilo de acuerdo con su fisonomía, formas de vida, taxa dominantes y factores ecológicos.

DOMINIO DE VALORES: Matorral crasicaule: Vegetación con predominancia de cactáceas (sobre todo cactus columnares o candelabroiformes). Géneros típicos incluyen: *Pachycereus*, *Myrtillocactus*, *Lemaireocereus*, *Cephalocereus* y *Opuntia*, entre otros.

Matorral sarcocrasicaule: Vegetación con abundancia de plantas de tallos semi-suculentos (sarcocaulales) y cactáceas (crasicaules). Géneros típicos incluyen: *Fouquieria*, *Yucca*, *Pachycereus* y *Stenocereus*.

Matorral sarcocaulale: Vegetación con abundancia de plantas de tallos semi-suculentos (sarcocaulales). Algunas especies típicas son: *Bursera hindsiana*, *Jatropha cinerea* y *Pachycereus pringlei*, entre otras.

Matorral sarcocrasicaule de neblina: Vegetación con abundancia de tallos semi-suculentos (sarcocaulales) y cactáceas (crasicaules); que se desarrolla únicamente en la

costa del Pacífico de Baja California, con influencia de neblina de origen marino. Especies típicas incluyen: *Fouquieria diguetii*, *Euphorbia misera*, *Lycium californicum*, *Lophocereus schottii* y *Tillandsia recurvata*, entre otras.

Matorral desértico micrófilo: Vegetación que se desarrolla en las zonas más áridas del país, en el cual predominan arbustos con hojas o folíolos pequeños. Especies típicas incluyen: *Larrea tridentata*, *Fouquieria splendens*, *Cercidium microphyllum*, *Ambrosia dumosa*, *Acacia* spp. y *Prosopis* spp., entre otras.

Matorral desértico rosetófilo: Vegetación dominada por plantas con hojas en forma de roseta, con o sin espinas. Géneros típicos incluyen: *Agave*, *Hechtia*, *Dasyliirion* y *Yucca*, principalmente.

Matorral rosetófilo costero: Vegetación dominada por plantas con hojas en forma de roseta más algunos arbustos, que se desarrolla únicamente en la costa del Pacífico de Baja California, con influencia de vientos marinos. Taxa típicos incluyen: *Agave*, *Fouquieria columnaris*, *Pachycormus discolor*, *Machaerocereus gummosum* y *Ambrosia bryantii*, entre otros.

Vegetación de desiertos arenosos: Vegetación arbustiva y herbácea, mas bien rala, distribuida en forma de manchones sobre dunas de arena en zonas muy áridas. Especies típicas incluyen: *Hilaria rigida*, *Opuntia wrightiana*, *Ephedra trifurca*, *Eriogonum deserticola*, *Petalonyx thurberi* e *Hymenoclea monogyra*, entre otras.

Matorral espinoso tamaulipeco: Vegetación dominada por plantas espinosas, caducifolias o áfilas (sin hojas), que se desarrolla en la planicie costera de Tamaulipas y en la Gran Llanura de Norteamérica.

Géneros típicos incluyen: *Cercidium*, *Acacia*, *Leucophyllum*, *Condalia* y *Castela*.

Matorral submontano: Vegetación dominada por arbustos o árboles bajos, predominantemente inermes y caducifolios, que se desarrolla entre bosques de encino y selva baja caducifolia en el noreste del país. Taxa típicos incluyen: *Helietta parvifolia*, *Neopringlea integrifolia*, *Gochnatia hypoleuca*, *Pithecellobium brevifolium*, *Quercus fusiformis*, *Cordia boissieri*, *Montanoa xanthifolia*, *Garrya ovata* y *Acacia*.

típicas incluyen: *Fouquieria diguetii*, *Euphorbia misera*, *Lycium californicum*, *Lophocereus schottii* y *Tillandsia recurvata*, entre otras.

Matorral desértico micrófilo: Vegetación que se desarrolla en las zonas más áridas del país, en el cual predominan arbustos con hojas o folíolos pequeños. Especies típicas incluyen: *Larrea tridentata*, *Fouquieria splendens*, *Cercidium microphyllum*, *Ambrosia dumosa*, *Acacia* spp. y *Prosopis* spp., entre otras.

Matorral desértico rosetófilo: Vegetación dominada por plantas con hojas en forma de roseta, con o sin espinas. Géneros típicos incluyen: *Agave*, *Hechtia*, *Dasyllirion* y *Yucca*, principalmente.

Matorral rosetófilo costero: Vegetación dominada por plantas con hojas en forma de roseta más algunos arbustos, que se desarrolla únicamente en la costa del Pacífico de Baja California, con influencia de vientos marinos. Taxa típicos incluyen: *Agave*, *Fouquieria columnaris*, *Pachycormus discolor*, *Machaerocereus gummosum* y *Ambrosia bryantii*, entre otros.

Vegetación de desiertos arenosos: Vegetación arbustiva y herbácea, mas bien rala, distribuida en forma de manchones sobre dunas de arena en zonas muy áridas. Especies típicas incluyen: *Hilaria rigida*, *Opuntia wrightiana*, *Ephedra trifurca*, *Eriogonum deserticola*, *Petalonyx thurberi* e *Hymenoclea monogyra*, entre otras.

Matorral espinoso tamaulipeco: Vegetación dominada por plantas espinosas, caducifolias o áfilas (sin hojas), que se desarrolla en la planicie costera de Tamaulipas y en la Gran Llanura de Norteamérica.

Géneros típicos incluyen: *Cercidium*, *Acacia*, *Leucophyllum*, *Condalia* y *Castela*.

Matorral submontano: Vegetación dominada por arbustos o árboles bajos, predominantemente inermes y caducifolios, que se desarrolla entre bosques de encino y selva baja caducifolia en el noreste del país. Taxa típicos incluyen: *Helietta parvifolia*, *Neopringlea integrifolia*, *Gochnatia hypoleuca*, *Pithecellobium brevifolium*, *Quercus fusiformis*, *Cordia boissieri*, *Montanoa xanthifolia*, *Garrya ovata* y *Acacia*.

Chaparral: Vegetación densa y baja, asociada a incendios naturales y/o inducidos por el hombre y con una composición florística característica. Taxa típicos incluyen: *Adenostoma fasciculatum*, *Arctostaphylos* spp., *Ceanothus* spp., *Quercus undulata*, *Quercus intricata*, *Quercus invaginata*, *Quercus microphylla*, entre otros.

SUBCOMUNIDAD: Se define por la presencia de vegetación secundaria. Indica alguna fase de transformación en donde la vegetación original (primaria) ha sido eliminada o perturbada.

DOMINIO DE VALORES: Vegetación secundaria: Incluye áreas con vegetación secundaria donde predominan hierbas, arbustos o árboles generalmente atípicos de la vegetación original (primaria). Con el tiempo y en condiciones naturales puede ser reemplazada de nuevo por la vegetación original.

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Mezquital, Ninguno, Ninguno.

Mezquital, Ninguno, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral crasicauale, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral crasicauale, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral sarcocrasicauale, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral sarcocrasicauale, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral sarcocauale, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral sarcocauale, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral sarcocrasicauale de neblina, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral sarcocrasicauale de neblina, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral desértico micrófilo, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral desértico micrófilo, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral desértico rosetófilo, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral desértico rosetófilo, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral rosetófilo costero, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral rosetófilo costero, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Vegetación de desiertos arenosos, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral espinoso tamaulipeco, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral espinoso tamaulipeco, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Matorral submontano, Ninguno.

Matorral xerófilo, Matorral submontano, Vegetación secundaria.

Matorral xerófilo, Chaparral, Ninguno.

Matorral xerófilo, Chaparral, Vegetación secundaria.

Notas: en el tipo de matorral mezquital, a pesar de que sus especies características (mezquital y huizache), poseen una forma biológica arbórea (en etapa adulta), la condición arbustiva es dominante y es característica de las primeras etapas del desarrollo de esta comunidad. Algunas comunidades pueden tener la misma composición florística, sin embargo, tienen características ecológicas distintas.

PASTIZAL

Comunidades vegetales caracterizadas por el dominio de gramíneas (pastos o zacates) o graminoides. Aquí se incluyen pastizales determinados tanto por condiciones naturales de clima y suelo, como aquellos promovidos por influencia humana.

COMUNIDAD: Se definen los pastizales según los factores que son determinantes para su establecimiento: clima, suelo, composición florística, inducido, por remoción de la vegetación original, entre otros.

DOMINIO DE VALORES: Pradera de alta montaña: Vegetación dominada por gramíneas amacolladas por encima del límite altitudinal de la vegetación arbórea, generalmente a 3,900 m o más de elevación. Algunas especies más típicas son: *Festuca tolucensis*, *Calamagrostis tolucensis*, *Trisetum spicatum*, *Festuca livida*, *Arenaria bryoides*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Draba jorullensis*, *Agrostis scabra* y *Carex bella*, entre otras.

Pastizal natural (incluye pastizal-huizachal): Vegetación de gramíneas o graminoides con arbustos

dispersos, propia de zonas semiáridas, principalmente en el Altiplano del país. Especies típicas incluyen: *Bouteloua gracilis*, *Trichachne californica*, *Hilaria mutica*, *Bouteloua cortipendula*, *Aristida ternipes*, *Setaria macrostachya* y *Stipa eminens*. En algunas áreas

estos pastizales también incluyen arbustos dispersos de huizache (*Acacia*), sea debido a factores naturales, o al sobrepastoreo.

Sabana: Comunidad formada principalmente por gramíneas y ciperáceas, con árboles dispersos (*Curatella*, *Byrsonima*, *Quercus oleoides*). Se desarrolla en suelos con drenaje deficiente e incendios periódicos, en zonas tropicales. Entre las gramíneas destacan: *Andropogon bicornis*, *Paspalum notatum*, *Paspalum pectinatum*, *Setaria geniculata*, entre otras.

Pastizal inducido: Se desarrolla al eliminarse la vegetación original (bosques, selvas, matorral, otros) o en áreas agrícolas abandonadas.

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Pradera de alta montaña.

Pastizal natural (incluye pastizal-huizachal).

Sabana.

Pastizal inducido.

NOTAS: el tipo de pastizal "sabana" incluye la condición sabanoide, asociada a condiciones antrópicas y características del trópico mexicano.

La cobertura "pastizal cultivado" se incluye en la Formación "Cultivos" debido a su origen cultivado y su asociación estrecha con las parcelas de riego.

VEGETACIÓN HIDRÓFILA

Comunidades vegetales asociadas al medio acuático o al suelo mas o menos permanentemente anegado.

COMUNIDAD: Los tipos de vegetación hidrófila se definen de acuerdo a características ecológicas, fisonomía y composición florística.

DOMINIO DE VALORES:

Manglar: Vegetación arbórea de alturas bajas y medianas (3 a 15 m generalmente), dominada por una o más especies de mangle, que se desarrolla en esteros, lagunas

costeras, estuarios y costas protegidas. Géneros típicos incluyen: *Rhizophora*, *Avicennia*, *Laguncularia* y *Conocarpus*.

Popal-tular: Vegetación herbácea que se desarrolla en las orillas de los cuerpos de agua, o bien en aguas de poca profundidad, en zonas costeras o continentales tanto en zonas tropicales como templadas. Géneros típicos incluyen: *Calanthea*, *Thalia*, *Heliconia* y *Typha**

Vegetación de galería: Es aquella vegetación arbórea que se desarrolla en los márgenes de ríos y arroyos permanentes y semi-permanentes, en condiciones favorables de humedad local. Fisonómica y estructuralmente se trata de un conjunto muy heterogéneo de comunidades, diferente a la vegetación que lo rodea. Géneros típicos incluyen: *Platanus*, *Populus*, *Salix* y *Taxodium* (amplia distribución); *Astianthus*, *Ficus*, *Bambusa*, *Inga*, *Pachira* (clima tropical) y *Acer*, *Alnus*, *Carya*, *Fraxinus* (clima templado).

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Manglar

Popal-tular

Vegetación de galería

RELACIONES:

Vegetación hidrófila (A) Comparte Cultivos (A)

Vegetación hidrófila (A) Comparte Bosques (A)

Vegetación hidrófila (A) Comparte Selvas (A)

Vegetación hidrófila (A) Comparte Matorral (A)

Vegetación hidrófila (A) Comparte Pastizal (A)

Vegetación hidrófila (A) Comparte Otros tipos de vegetación (A)

Vegetación hidrófila (A) Comparte Otras coberturas (A)

Nota: La comunidad de vegetación de galería incluye el bosque de galería, selva de galería, y vegetación de galería.

*En la península de Yucatán se cartografiaron algunas comunidades dominadas por ciperáceas como Popal-tular.

OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN

Comunidades vegetales con características ecológicas, fisonómicas, florísticas, edáficas, así como de densidad y estructura, dada por las condiciones naturales o antrópicas, que las hacen distintas a las formaciones vegetales típicas como bosques, selvas, matorrales y pastizales.

TIPO: Se separa considerando la densidad de la cobertura vegetal.

DOMINIO DE VALORES:

Otros tipos de vegetación: Es evidente que existe una cobertura de vegetación bien definida.

Área sin vegetación aparente: Áreas que parecen ser desprovistas de una cobertura vegetal. La ausencia de vegetación puede ser determinada por condiciones naturales: clima muy árido, salinas; o bien porque la vegetación fue eliminada totalmente por actividades humanas como son la minería a cielo abierto, depósitos de jales, sobrepastoreo, entre otros usos no perceptibles en imágenes de satélite (TM 7)*.

COMUNIDAD: Se definen las comunidades de acuerdo con factores como fisonomía, composición florística y diversos factores ecológicos.

DOMINIO DE VALORES:

Palmar: Vegetación dominada por palmas que se desarrollan generalmente en zonas tropicales. Géneros típicos incluyen: *Sabal*, *Brahea*, *Orbignya*, *Scheelea*, entre otros.

Vegetación halófila y gipsófila: Vegetación arbustiva o herbácea (ocasionalmente con dominancia de

gramíneas), que se desarrolla sobre suelos con alto contenido de yeso (gipsófila) o sales (halófila), en zonas áridas y semiáridas. Taxa característicos son: *Suaeda*, *Atriplex*, *Allenrolfea*, *Ambrosia*, *Frankenia*, *Distichlis*, *Sesuvium* y *Bouteloua chasei*, entre otros.

Vegetación de dunas costeras: Vegetación arbustiva o herbácea que se desarrolla sobre dunas de arena en la costa. Especies típicas incluyen: *Ipomoea pes-capre*, *Sporobolus pyramidatus*, *Uniola paniculata*, *Chamaecrista chamaecristoides*, *Trachypogon gouini*, *Palafoxia lindenii* y *Amaranthus gregii*.

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Otros tipos de vegetación, Palmar

Otros tipos de vegetación, Vegetación halófila y gipsófila

Otros tipos de vegetación, Vegetación de dunas costeras

Área sin vegetación aparente, Ninguno

RELACIONES:

Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Cultivos (A)
Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Bosques (A)
Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Selvas (A)
Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Matorral (A)
Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Pastizal (A)
Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Vegetación hidrófila (A)
Otros tipos de vegetación (A)	Comparte	Otras coberturas (A)

NOTA: No se incluyen áreas construidas

OTRAS COBERTURAS

Se incluye aquí a los asentamientos humanos y los cuerpos de agua.

OTRAS COBERTURAS: Se definen como asentamientos humanos y cuerpos de agua.

DOMINIO DE VALORES:

Asentamiento humano: Área ocupada por zonas edificadas, urbanas, suburbanas e industriales, principalmente.

Cuerpo de agua: Se refiere a los depósitos mayores de aguas interiores del país, tanto naturales como artificiales (lagos, lagunas, presas y bordos), perceptibles en imágenes de satélite (TM 7).

COMBINACIONES AUTORIZADAS:

Asentamiento humano, Cuerpo de agua

RELACIONES:

Otras coberturas (A)	Comparte	Cultivos (A)
Otras coberturas (A)	Comparte	Bosques (A)
Otras coberturas (A)	Comparte	Selvas (A)
Otras coberturas (A)	Comparte	Matorral (A)
Otras coberturas (A)	Comparte	Pastizal (A)
Otras coberturas (A)	Comparte	Vegetación hidrófila (A)
Otras coberturas (A)	Comparte	Otros tipos de vegetación

(A)

Con todas las características y diferencias entre los anteriores inventarios se obtuvieron los siguientes productos:

- 121 espaciómapas 1:250 000, que corresponde a la estructura del INEGI para tal escala.
- 121 mapas a escala 1:250 000
- 121 coberturas en formato vectorial de ARC/INFO.
- Una pagina diseñada especialmente para divulgar resultados dentro del sistema nacional de información forestal.
- Cuatro tipos de metadatos: para las imágenes, para los espacio mapas, para los mapas y para las fotografía digitales existentes.

- Diccionario de datos que describe las categorías cartografiadas a todos los niveles de agregación. Además, incluyen las combinaciones autorizadas, las relaciones posibles, las dimensiones y notas de cada una de las categorías descritas.
- Glosario donde se describen las definiciones de los términos técnicos utilizados. Este formato es más amigable que el formato del diccionario; Se incluyen, además de las definiciones de las categorías de la leyenda, otros conceptos técnicos importantes para una mejor comprensión del informe en general.

(Diccionario del Inventario Nacional Forestal, 2000-2001)

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, R. (2002) **Los mares mexicanos a través de la percepción remota**. Temas selectos de geografía de México, Tomo III, Instituto de Geografía UNAM.
- Alcántara, I. (2000) **Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida**. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 17 (1) pp. 66-75.
- Alcántara, I. (2000) **Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición clasificaciones y terminología**. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. N° 41 UNAM México, pp.9-25
- Alcántara, I. (1999) **¿Se cae o no se cae?, Procesos de remoción en masa, avances y perspectivas**. *Ciencia y Desarrollo*. 146: 24-31.
- Bitrán, D. (2000) **Evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la Republica Mexicana, durante 1999**. Cuadernos de Investigación. No. 50. centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 194 p.
- Capra, L., Lugo, J. y Dávila, N. (2003) **“Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento”**. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 20 N° 2 pp. 95-106 2003 México.
- Barredo J.L.; Benavides A.; Hervas J. ; Van Westen C.J. (2000) **Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain**. *ITC Journal* 2000, no1 pp.9-23 Spain
- Borja, R. (2003) **Análisis de la susceptibilidad y riesgos asociados a proceso de remoción en masa en Zacapoaxtla, Puebla**. Tesis licenciatura Facultad de Filosofía y Letras UNAM, México.
- Brunnsden, D. (1973) **The application of systems theory to the study of mass movement**. *Geologica Applicata e idrogeologia*. Univ. of Bari. 8, 1, pp.185-207.

- Brunsden, D. (1979) **Mass movements**. In Embleton, C. y J. B. Thornes (eds), *Progress in Geomorphology*, Arnold, pp.130-186.
- Brunsden, D. (1984) **Mudslides**. In Brunsden, D. y Prior, D. (eds) *Slope instability*, Wiley and Sons, Chichester, pp.363-418.
- Crozier, M.J. (1989) **Landslides: Causes, conséquences and Environment**. Routledge Press, London.
- Cruden, D. y Varnes, D. 1996. **Landslides types and process**. In **Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board**. Turner, A. y Schuster, R (eds). Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C. pp.36-75.
- Crozier, M. (1989) **Landslides**. In **Natural and Environmental Hazards**. Chapter 6. pp. 83-93.
- Challenger, A. (1998) **Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pa-sado, presente y futuro**. CONABIO-Instituto de Biología UNAM Sierra Madre. México.
- Chuvieco E. (1996) **Fundamentos de Teledetección Espacial**. Madrid, España.
- De La Ville N. ; Diaz A.C. ; Ramirez D. (2002) **Remote sensing and GIS technologies as tools to support sustainable management of areas devastated by landslides**. *Environment, Development and Sustainability* 4, no.2 pp. 221-229
- EPOCH (European Community Programme). (1993) **Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community**. Flageollet, J. C. (ed.) 3 Volumes.
- Evers R.; McM. Moore J.; Hervas J. ; Liu J. G.(1998) **Integrated use of landsat TM and Spot panchromatic imagery for landslide mapping: case histories from southeast Spain**. *Geological Society Special Publication* no.15 pp. 133-140

- FAO (Food and Agriculture Organization). (1999) **Situación de los bosques del mundo**. FAO, Roma.
- Flores, L. P. (2002) Inestabilidad de laderas y riesgos asociados en Teziutlán, Puebla.. **Investigaciones geográficas**. Boletín. 38: 15-29.
- Frausto, M. O. (1999) **Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuauhtepac: región sur de la Sierra de Guadalupe, en la Ciudad de México**. Investigaciones Geográficas Boletín. 38: 15-29.
- Frausto, M. O. (2002) **Análisis geomorfológico enfocado a los procesos de ladera en la Sierra de Guadalupe, México**. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Instituto de Geografía..145 pp.
- Floyd F. Sabins. (1997) **Remote Sensing Principles and Interpretation**. Freeman and Company, New York.
- Galván F. A. (1998) **Evaluación de impacto ambiental informe final de actividades Sierra Norte de Puebla**. Secretaria de Agricultura y Ganadería, Banco Mundial, Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Gardner-Outlaw, T. y R. Engelman. (1999) **Forest futures. Population, consumption and woodresources**. Population Action International.
- Gerrard J.; Gardener R. (2002) **Relationships between landsliding and use in the Likhu Khola drainage basin, Middle Hills, Nepal**. Mountain Research and Development 22, no.1 pp. 48-55 United Kingdom
- Glade T. (2003) **Landslide occurrence of Geography**. Catena 51, no. 3-4 pp.297-314, Germany
- Greenway D. R.(1987) **Vegetation and slope stability**. Slope stability Chapter 6, 1987, p.p. 187-229

- Gray H. D. (1981) **Forest Vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith**. Intermountain Forest and Range Experiment Station, INT-271 pp. 1-23 .
- Hutchinson, J. N. (1988) **General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology**. In Bonnard, C. (Ed.). proceedings of the 5th International Synposium of Landslides. A. A. Balkema Rotterdam, Netherlands. Vol. 1. pp.3-35.
- INEGI (1995) **Cuadernos estadísticos del Estado de Puebla**. México.
- INEGI (1985) **Síntesis Geográfica del Estado de Puebla**. México.
- INEGI (1990) **Cuadernos Municipales. Estado de Puebla**. México.
- INEGI (1975) **Cartas geológicas F14 D85 Cuetzalán, E14 B15 Teziutlán y E14 B25 Xonacatlán**. México.
- **Inventario Forestal Nacional Periódico 1994**. (1992) Subsecretaria Forestal y Fauna Silvestre México, SARH. D.F.
- **Inventario Forestal Nacional Periódico 2000**. (2000) SEMARNAT, UNAM, Instituto de Geografía.
- Kozlowski, T.T. (1971) **“Growth and Development of Trees”**. Vol.2. New York: Academic Press, 520 pp.
- López Ramos, E (1982) **Geología de México**. Tomo II. 3^a Edición. Instituto de Geología.
- Lugo H. J.; J. J. Zamorano y G. Gallegos (1993) **Deslizamiento de tierras activo en Metztlán**. Hgo. Geof. Intern. 32(1): 153-166.
- Lugo H., J. (1995) **Deslizamiento de tierras en Meztlán, Hidalgo**. Ciencia y Desarrollo. Marzo-Abril. CONACYT, 21(121): 53-60

- Lugo J. T. García-Arizaga, J. Zamorano and O. Salas (1996) **Landslide in Metztlán (State of Hidalgo), México-causes and effects.** Zeitsch. Geomorph. Suppl. Bd., 103: 323-343.
- Martínez-Serrano, R. (1994) **Características geoquímicas de las rocas volcánicas del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla y su relación con la mineralogía de alteración.** Geofísica Internacional, Vol. 33, N° 4, p 585-605
- Masera, O. R. (1996) **Deforestación y degradación forestal en México, documentos de trabajo No. 19.** GIRA A. C. Pátzcuaro, México.(enero).
- Noble, I. y R. Dirzo (1997) **Forests as Human-Dominated Ecosystems.** *Science* 277(5325) pp. 522-525.
- Oropeza, O. O. José. J. Z. O. y Mario, A. O. P. (1998) **Peligros geomorfológicos en México: remoción en masa. En Los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria.** Garza y Rodríguez (coord.). Capítulo VI. Universidad Iberoamericana – UNAM. México. pp 149 - 184.
- Oropeza O., M. A. Ortiz y A. P. Méndez (2003) **Landslides associated to land use changes and extreme precipitation events in “El Tajín”, Veracruz (Mexico).** Regional Geomorphology Conference, Mexico 2003. Abstracts
- Palacio Prieto, J.L., G. Bocco, A. Velásquez, J.F. Mas, F Takaki, A. Victoria, L. Luna González, G. Gómez Rodríguez, J. López García, M. Palma, I. Trejo Vázquez, A. Peralta, J. Prado Molina, A. Rodríguez Aguilar, R. Mayorga Saucedo y F. González Medrano (2000). **“La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000”.** en Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 43, pp. 183-203.
- Pedraza, J. (1996) **Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones.** Edit. Rueda. Madrid.
- Rzedowski, J. (1978) **Vegetación de México.** México, Limusa

- Scanvic J. (1989) **Teledetección aplicada, cartografía, geología estructural, exploración minera, medio ambiente, etc.**, Madrid.
- Schiechl H.M. (1980) **“Bioengineering for land Reclamation and Conservation”**. University of Alberta Press, 404 p. Edmonton Alberta Canadá.
- Selby (1982) **Hillslope materials and processes**. Oxford University Press. 264p.
- SEMARNAP (1999) **“Estadísticas del Sector Forestal”**. Boletín de la Dirección General Forestal. México.
- SEMARNAP (1998) **“Diagnóstico de la Deforestación en México”**. (Unidad del Inventario de Recursos Naturales) México.
- SEPROCI (2000) **Atlas de Riesgos del Estado de Puebla**. Secretaria de Gobernación. México.
- Sharpe, C. F. S. (1938) **Lanslides and related phenomena**. New York, Columbia University.
- Singh R.B. (1998) **Land use/cover changes, extreme events and ecohydrological responses in the Himalayan region**. *Hydrological processes* 12, no. 13-14 (1998) pp. 2043-2055
- Suárez J. (1994), **“Activator Mechanisms of Landslides in Tropical Environments”**, *International Conference on Landslides and Slope Stability*, pp. 347-354, Kuala Lumpur Malaysia.
- Su W.-J. ; Stohr C. (2000) **Aerial-Photointerpretation of landslides aolng the Ohio and Mississippi rivers**. *Environmental and Engineering Geoscience* 6, no.4 pp. 311-323.
- Terzagui, K. (1950) **Mechanism of landslides, application of Geology to Engineering Practice**. Geol. Soc. Am., Berkeley. 83 pp. 71-56.

- Toledo, V. M. (1989) **La diversidad biológica de México**. Ciencia y Desarrollo 14(81) pp.17-30.
- Varela Hernández Sergio (1998) (Dirección General Forestal). **“Los Recursos Forestales de México”**. México.
- Varela Hernández Sergio (1998) **“Cifras sobre la Deforestación en México”**. México.
- Varnes, D. (1958) **Landslides types and processes**. In Eckel, E. Landslides and Engineering Practice, Highway Res. Board Special Report 29, pp.20-47.
- Varnes, D. J. (1978) **Slope Movement Types and Processes**. In Landslides, Analysis and Control. Special Report 176. National Academy of Sciences. Washington, D. C. pp 11-33.
- Varnes, D. (1984) **Landslides hazard zonation: a review of principles and practice, natural hazards**. UNESCO. Int. Assoc. Eng. Geol. Pp.63.
- Velásquez, T. D. (1997) **Deforestación del bosque tropical en el sur de la península maya, Campeche y Quintana Roo**. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Instituto de Geografía. pp. 232.
- Velásquez, A.; J. F. Mas.; J. R. Díaz-Gallegos; R. Mayorga-Saucedo; P. C. Alcántara; R. Castro; T. Fernández; G. Bocco; E. Ezcurra y J. L. Palacio. (2002) **Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México**. Gaceta Ecológica. INE_SEMARNAT-México. 62:21-37.
- Yáñez-García, C. (1982) **Exploración de la región geotérmica de Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz**. C.F.E 98 p.

- Zaruba, Q y Mencl, V. (1969) **Landslides and their control**. Elsevier, Ámsterdam, The Netherlands.

PAGINAS CONSULTADAS EN INTERNET

- http://www.gsfc.nasa.gov/las/handbook/handbook_toc.html
(Página oficial del Landsat 7).
- <http://www.aeroterra.com.ar/HTMs/landsat7ETM.htm>
(Página de la empresa Aeroterra)
- <http://landsat.gsfc.nasa.gov>
(Web de la Nasa sobre el Landsat)
- <http://landsat7.usgs.gov>
(Web de la USGS sobre el Landsat)

PROGRAMAS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE SATELITE

Parrot J. F. (1997) binar 3
 Parrot J. F. (1998) homo
 Parrot J. F. (2002) tm_Index
 Parrot J. F. (2003) cross_item
 Parrot J. F. (2003) adapt_tm_etm
 Parrot J. F. (2003) stat_points



**FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
 COLEGIO DE GEOGRAFIA**