



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

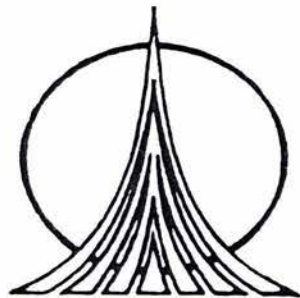
EVALUACION DEL USO DE SUELO, VEGETACION Y
FRAGILIDAD EN LA REGION IZTA-POPO MEDIANTE
PERCEPCION REMOTA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
B I O L O G O
P R E S E N T A :
MARIA BEATRIZ MARTINEZ ROSALES

DIRECTOR: M. EN C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS

MEXICO, D.F.

MAYO, 2003



Unidad en la Diversidad:
Zaragoza Frente al Siglo XXI

ESTE TRABAJO FUE REALIZADO CON FINANCIAMIENTO
DEL PROGRAMA DE BECAS DE LICENCIATURA PROBETEL



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

DEDICATORIA

A mi madre, Agustina Rosales Zamora,
por el incondicional apoyo y la fe que siempre ha tenido,
por el ejemplo de fortaleza y trabajo.

A mi padre, Lázaro Martínez Sandoval,
que siempre me ha dado su ayuda en lo necesario.

A mi hermana, Judith Martínez Rosales,
por su fiel ayuda, moral y técnica.

QUEDA PROHIBIDO

Queda prohibido llorar sin aprender, levantarte un día sin saber qué hacer, tener miedo a tus recuerdos...

Queda prohibido no sonreír a los problemas, no luchar por lo que quieres, abandonarlo todo por miedo, no convertir en realidad tus sueños.

Queda prohibido no demostrar tu amor, hacer que alguien pague tus dudas y mal humor.

Queda prohibido dejar a tus amigos, no intentar comprender lo que vivieron juntos, llamarles sólo cuando los necesitas.

Queda prohibido no ser tú ante la gente, fingir ante las personas que no te importan, hacerte el gracioso con tal de que te recuerden, olvidar a toda la gente que te quiere.

Queda prohibido no hacer las cosas por ti mismo, no creer en Dios y hacer tu destino, tener miedo a la vida y a sus compromisos, no vivir cada día como si fuera un último suspiro.

Queda prohibido echar a alguien de menos sin alegrarte, olvidar sus ojos, su risa, todo, porque sus caminos han dejado de abrazarse, olvidar su pasado y pagarlo con su presente.

Queda prohibido no intentar comprender a las personas, pensar que sus vidas valen más que la tuya, no saber que cada uno tiene su camino y su dicha.

Queda prohibido no crear tu historia, dejar de dar las gracias a Dios por tu vida, no tener un momento para la gente que te necesita, no comprender que lo que la vida te da, también te lo quita.

Queda prohibido no buscar tu felicidad, no vivir tu vida con una actitud positiva, no pensar en que podemos ser mejores, no sentir que sin ti este mundo no sería igual.

Pablo Neruda.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la gran felicidad y el desafío que significa vivir.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por el espacio y oportunidad de obtener una formación profesional y cultural.

A la Carrera de biólogo, que me permitió un desarrollo multidisciplinario, en sentido no solo académico, también cultural, así como habilidades de difusión.

Al M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, director del presente trabajo, así como tutor de la fase final de mi formación profesional, sin duda una pieza fundamental en el desarrollo y aprendizaje de habilidades, así como motor de la madurez de mi toma de decisiones.

A los sinodales miembros del jurado: M. en C. Manuel Rico Bernal, Dr. Arcadio Monroy Ata, M. en C. David N. Espinosa Organista y Dr. Gerardo Cruz Flores, por sus comentarios y aportaciones para el enriquecimiento de este trabajo, así como por la formación profesional recibida.

Al Mtro. Juan Francisco Sánchez Ruíz, Director de la FES Zaragoza, por el apoyo e interés en proyectos como éste y por todas las atenciones recibidas.

A la Biól. Maricela Arteaga Mejía, Jefa de la Carrera, por su gran apoyo para el desarrollo y consumación del presente trabajo, así como para otras actividades de difusión y formación académica.

Al M. en C. Ramiro Ríos, Dr. José Luis Gómez Márquez y Dr. Arcadio Monroy, por todo el tiempo y la atención prestada, gracias por sus invaluable consejos que sin duda fueron de gran utilidad.

A la Dr. Patricia Velasco de León, por todo el tiempo en el que amablemente contribuyó a mi formación, así como por todos los conocimientos, consejos, confianza y ejemplos aportados.

Al Ing. Manuel Sánchez, por su ayuda y comentarios.

Al Geóg. Ignacio Paniagua, por su invaluable ayuda en la realización de algunos procesos técnicos de este trabajo, así como por su gran amistad e importante enseñanza.

Al Departamento de Análisis Espacial y Percepción Remota de la CONANP, a cargo del Biól. Jorge Carranza, así como a todo su grupo de trabajo: Delfina Rodríguez, Ignacio Paniagua, Joel Aguilar, César Silva, Juan Carlos Zamora, Roberto Cruz, Lilian Rodríguez, Amado Alejo, Jesús Vallejo, Perla Fernández y Silvia por el espacio y conocimientos adquiridos durante mi estancia en ese lugar, así como por su amistad y favores otorgados.

A todos los profesores de la carrera, por los conocimientos, comentarios y críticas, brindados en el transcurso de mi formación profesional, en especial a: Q. Verónica Basilio y Q. Yolanda García, por enseñarme que debo superarme y adaptarme a situaciones difíciles rápidamente; I. Q. Gloria Peralta, por la comprensión de la complejidad de la biología y su integración necesaria con otras áreas; Q. Teresa Mendoza, quién me enseñó a nunca dejar las cosas para otro día; M. en C. Carlos Castillejos, por el ejemplo de su enseñanza; M. en C. Eloisa Guerra por la confianza, tiempo y consejos; Dr. Eloy Solano y Dr. Alejandrina por todas las correcciones que amablemente aportaron a mi formación; Dr. Alfredo Bueno, por hacerme entender que necesitaba madurar más y aumentar la confianza en mi misma; M. en C. Rosalva García, M. en C. Balbina Benítez, Dr. Berta Peña, M. en C. Patricia Rivera, Biól. Alberto Méndez, por todos los conocimientos y consejos recibidos.

A la Mtra. Evelia Rayo Valle, por ayudarme a elegir la carrera que cumplió mis sueños.

A Israel Méndez Morales, por su ayuda, tiempo y comprensión durante estos cuatro años de amistad.

A Rogelio Maldonado Muñoz, la base de mi pensamiento y ejemplo de superación.

A Marco Antonio Rojas, por sus múltiples consejos, apoyo, sinceridad y amistad durante todo este tiempo.

A Imelda Valencia Altamirano, Juan Esteves, Juan Miranda, Enrique Salas, Rosalba García, Luz Alejo, Edna Barragán, Gustavo Pérez, Joaquín García, Hugo Sierra, por todo su tiempo, su comprensión, amistad, consejos y cientos de miles de momentos emotivos.

A mis amigos y compañeros, Florencia Becerril, Genaro Montaña, Yadira Cornejo, Ana Escamilla, Julissa Rodríguez, Rosa María de la Cruz, Sinaí Tinoco, Ulises Beristain, Vicente M. Hernández, Adriana Pérez, Maricarmen Olvera, Eduardo García, Selene Rodríguez, Israel Estrada, Arturo Aparicio, Carmen Tovar; Martha Santander, Itzia Paz,

Claudia Alba, Yolanda Córdova, Carolina Villanueva, Alejandro Bello, Gerardo Azuara, Gustavo Villagrán, Daniel Rojas, Juan Carlos Peña, Eduardo Herrera, Iván Almanza, Claudia Galicia, Osvaldo Garrido, Martín Cristóbal, Lizbeth Álvarez, Luis Miguel Valencia, Carmén Rebollar ; de la carrera de QFB: Elsa Espidio, Javier Miranda, Juan López, Esmeralda García, Alejandra Guadarrama, Ana Mandujano, Brenda Sánchez, José Luis Medina, Bernardo Bautista, Jenny Fernández, Ofelia Porras, Alejandro Soto, Pablo Blanco; Rafael Ruiz, Ángel Ayala, Ricardo, Cinthia Martínez, Luis Hernández, César Cruz, Adolfo Montes, por múltiples e incontables experiencias compartidas.

Al equipo de trabajo del proyecto Izta-Popo: Natalia Y. Sánchez, Nayeli Durán, Beatriz Moncada, Rodrigo Cobos, Ricardo Rodríguez, Edgar Villeda, Rosa Isela Escamilla, Ezequiel Hernández, Sergio Ayala, Daniel Lozano, Abraham Segura, Ygor, Yolanda Cortés, Laura Ontiveros, Patricia Miranda, Patricia de Anda, Pablo Cárdenas.

I. ÍNDICE GENERAL

I. ÍNDICE GENERAL	1
II. ÍNDICE DE CUADROS	2
III. ÍNDICE DE FIGURAS	3
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. JUSTIFICACIÓN	6
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1 USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN	7
3.2 PERCEPCIÓN REMOTA	9
3.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	20
3.4 FRAGILIDAD	23
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
5. HIPÓTESIS	26
6. OBJETIVOS	26
6.1 GENERAL	26
6.2 ESPECÍFICOS	26
7. ZONA DE ESTUDIO	27
8. MATERIALES Y MÉTODO	30
8.1 DIAGRAMA DE FLUJO	30
8.2 FASE DE CAMPO	31
8.3 FASE DE GABINETE	32
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
9.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	41
9.2.1 Digitalización de sitios de entrenamiento	41
9.2.2 Análisis comparativo de firmas espectrales	44
9.2.3 Clasificación de la imagen	48
9.2.4 Análisis de traslapes y composición	51
9.3 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)	57
9.3.1 Composición de las categorías	60
9.3.2 Distribución espacial de las coberturas	61
9.4 INTEGRACIÓN DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA Y NDVI	62
9.5 SUELO Y PENDIENTES	64
9.6 FRAGILIDAD EN LA REGIÓN IZTA-POPO	65
10. CONCLUSIONES	73
11. LITERATURA CITADA	75
12. Anexo I. Aproximación entre el recorrido del Satélite Landsat ETM y la República Mexicana	80
12. Anexo II. Variables geofísicas cuantificables por PR	81
13. Anexo III. Criterios para fragilidad en suelo, vegetación y relieve (Semarnap, 2000)	82

II. ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie de los diferentes usos de suelo en la república.....	8
Cuadro 2. Fragilidad de pendientes.....	35
Cuadro 3. Fragilidad de los tipos de Vegetación	36
Cuadro 4. Fragilidad para los tipos de suelos.....	36
Cuadro 5. Matriz de fragilidad.....	37
Cuadro 6. Distribución en categorías de los sitios de entrenamiento.....	41
Cuadro 7. Extensión de traslapes localizados entre categorías.	51
Cuadro 8. Categorías de NDVI.....	57
Cuadro 9. Intervalos de los valores máximos y mínimos de NDVI	58
Cuadro 10. Extensión de las 28 comunidades integradas a través del CS y NDVI ...	62
Cuadro 11. Tipos de uso de suelo, dentro del P.N. Izta-Popo.....	63
Cuadro 12. Áreas totales de las categorías de fragilidad.	72

III. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético (Soria <i>et al.</i> , 1998).....	10
Figura 2. Cronología de los satélites Landsat (Jensen, 2000).....	11
Figura 3. Trazo de la órbita del Satélite Landsat (Colwell, 1985).....	12
Figura 4. Firmas espectrales cubiertas (Soria <i>et al.</i> , 1998).....	16
Figura 5. Firmas espectrales de pastos (Schowengerdt, 2002).....	16
Figura 6. Firmas espectrales de cultivos (Schowengerdt, 2002).....	16
Figura 7. Localización del área de estudio.....	29
Figura 8. Digitalización de los puntos de entrenamiento sobre la imagen compuesta (bandas 3,5,7).....	33
Figura 9. Conversión de formato ráster a vectorial.....	35
Figura 10. Área basal por género.....	39
Figura 11. Pendientes.....	39
Figura 12. Patrón de retención de copa.....	40
Figura 13. Daño en vegetación.....	40
Figura 14. Intervalos espectrales de firmas espectrales en las bandas del Satélite Landsat ETM+.....	44
Figura 15. Los rectángulos de dispersión de los valores para cada firma espectral.....	45
Figura 16. Firmas con elementos de <i>Abies</i>	45
Figura 17. Firmas con elementos de <i>Pinus</i>	45
Figura 18. Firmas con elementos de <i>Quercus</i>	45
Figura 19. Firmas de zacatonales y cultivos.....	45
Figura 20. Análisis de incertidumbre.....	48
Figura 21. Firma <i>Abies</i>	50
Figura 22. <i>Abies</i> , recorte al 95%.....	50
Figura 23. Firma <i>Ct</i>	50
Figura 24. <i>Ct</i> , recorte al 95%.....	50
Figura 25. Comunidades ecológicamente húmedas: <i>A. religiosa</i> , <i>P. montezumae</i> y <i>P.</i> <i>ayacahuite</i>	55
Figura 26. Comunidades de <i>Quercus</i> sp. <i>Pinus</i> sp. – <i>Quercus</i> sp.	55
Figura 27. Comunidades de <i>P. hartwegii</i> y pastizal de altura.....	56
Figura 28. Comunidades de <i>Pinus hartwegii</i> , <i>Senecio</i> sp. y pastizal.....	56
Figura 29. Cultivos de temporal y agroforestales.....	56
Figura 30. Representación del NDVI.....	59
Figura 31. Delimitación de categorías.....	59
Figura 32. Diferencias entre categorías.....	59
Figura 33. Agrupación de valores.....	59
Figura 34. Composición de valores en las categorías de NDVI.....	60
Figura 35. Porcentaje de área de las categorías de fragilidad.....	72

RESUMEN

El desarrollo de estrategias de manejo para la conservación de los bienes y servicios que prestan los ecosistemas es fundamental para su mantenimiento en el largo plazo. La presente investigación se realizó en la región Izta – Popo, incluyendo el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y tuvo como objetivo principal contribuir al conocimiento del uso del suelo, vegetación y fragilidad del Área Natural Protegida (ANP) y su zona de influencia.

Se realizaron visitas y recorridos al área de estudio, para caracterizar las comunidades homogéneas, a partir de la información obtenida se generaron firmas espectrales para cada uso de suelo, posteriormente se clasificó la imagen de satélite Landsat ETM + del año 2000 por el método supervisado (CS), utilizando criterios Fuzzy y una confiabilidad del 95%. Simultáneamente se generó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) utilizando las bandas roja e infrarrojo cercano para conocer el estado de conservación. La evaluación de la fragilidad del hábitat se realizó implementando un modelo a partir de información de pendientes, suelo y los resultados de la clasificación supervisada, por medio de la integración de un sistema de información geográfica y de percepción remota.

A partir de la clasificación supervisada se diferenciaron ocho tipos de uso de suelo: bosque de encino, bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de pino-encino, pastizal natural, cultivo de riego, cultivo de temporal y agroforestal, integrados a su vez por 28 comunidades compuestas. A partir de los resultados del NDVI y de su integración con la CS se determina que 23.4% del total de la zona presenta valores de 0.26 a 0.60. Sin embargo, este porcentaje corresponde a los bosques que circundan a las principales elevaciones, es por eso que se determina que el estado de conservación en el área no es de carácter degradado.

El análisis de fragilidad, integrado por pendientes, suelo y vegetación, indica que la mayor proporción del área de estudio pertenece a una categoría baja y se ubican en las planicies que bordean la zona, por debajo de los 2500 msnm. No obstante, las áreas con fragilidad media, media-alta, alta-muy alta y finalmente muy alta, se sitúan por arriba de los 2500 msnm y hasta los 4000 msnm, hacia la parte central, distribuidas en las vertientes este y oeste. Lo anterior origina condiciones particulares para dichas áreas con respecto a sus prácticas de manejo, restauración o reforestación.

Se concluye que un alto porcentaje de las comunidades consideradas como conservadas y con muy alta fragilidad, se distribuyen entre los 2900 y 3500 msnm, lo cual implica que se encuentran fuera de la jurisdicción del ANP, sin protección y sin un plan de manejo que permita un manejo adecuado.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución de los bosques en México, corresponde a las serranías más importantes del país y de acuerdo con la información del inventario forestal realizado por la SAGAR en 1994, (con imágenes de satélite Landsat TM) se estima la superficie forestal del país en 141 742 169 ha, los que representa el 72% del territorio nacional. Cabe destacar que este resultado no sólo incluye bosques, también selvas, vegetación de zonas áridas, vegetación hidrófila y halófila, así como áreas perturbadas, pero sólo el 40% (56 millones de ha) son áreas arboladas ocupadas por bosques (54%) y selvas (46%). Del total de la superficie forestal del país, aproximadamente el 77% tienen condiciones adecuadas de vegetación y suelo para la producción sostenida de madera y productos no maderables, de éstas sólo el 6% se encuentra dentro de áreas naturales protegidas (ANP) y el 20.6% requiere algún trabajo de restauración (CONABIO, 1998).

Las ANP tienen como objetivos preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas del país, así como los ecosistemas más frágiles, para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos; asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad en sus tres niveles de organización; proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio de los ecosistemas, así como rescatar y divulgar conocimientos y prácticas naturales de las zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, además de zonas con importancia turística, recreativa, cultural y de los pueblos indígenas. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) divide a las ANP en 8 categorías, seis de las cuales se establecen como de interés para la Federación y 2 de interés estatal o municipal. De éstas la categoría con mayor número de áreas decretadas es la de Parque Nacional con 63, lo cuales cubren un total de 1'385,334 ha. (INE, 1997).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl es una ANP de carácter federal localizada en tres estados (México, Puebla y Morelos) que mantiene importantes elementos y procesos ecológicos, como son especies amenazadas (e.g. *Romerolagus diazi*) y servicios ambientales (e.g. recreación y recarga acuífera), por lo que es necesario contribuir a su diagnóstico de conservación.

2. JUSTIFICACIÓN

El Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl es un ícono representativo de la región desde la época prehispánica. Sin embargo los estudios que se ha realizado en el área, son prácticamente descriptivos y ofrecen poca información sobre el estado de los recursos así como el uso del suelo en la región. Algunos de ellos se realizaron hace más de veinte años o bien como Hinojosa (1958), manejan una perspectiva económica, dirigida a la producción de madera y papel y sólo mencionan el deterioro de estos recursos de manera poética.

Anaya *et al.*, (1980), describen la vegetación de un transecto altitudinal en el Iztaccíhuatl, pero no definen con claridad el área de cada uno de los tipos de vegetación que describen para la zona, además los aspectos de conservación se limitan a descripciones de bueno, regular y malo. Chávez y Trigo (1997) sí plantean áreas para los tipos de vegetación y uso de suelo, pero éstas se basan en cartografía de INEGI, que data de 1980.

En la actualidad las presiones de crecimiento urbano, económicas y agropecuarias que afectan a esta área, relacionada con la cercanía al Distrito Federal, han provocado la extensión de los asentamientos humanos, el desmonte de bosques para el cultivo, ganadería extensiva, modificando con ello el uso de suelo, incluso sin considerar los factores de riesgo de la zona ni las áreas de mayor valor de conservación.

3. MARCO TEÓRICO

El estudio de vastas extensiones se ha realizado desde hace siglos, después del descubrimiento de América, algunos investigadores naturalistas fueron enviados, para conocer las características del “nuevo mundo”. Un ejemplo fue Alexander Von Humbolt (1769-1859) quién realizó diversas expediciones científicas, entre las que destaca la de América Central y del Sur (1799-1804).

En la actualidad aún existen zonas en el mundo de las cuales se desconocen sus características con exactitud, y su estudio comprende dos problemas principales, los costos de investigación, expedición, procesamiento, análisis y publicación de los resultados, y paralelo a ello el tiempo y el personal necesarios. Por ejemplo en Australia (1946) realizaron un estudio sobre una gran cantidad de territorio, con casi nula información, empleando el método de fotointerpretación y percepción remota para la clasificación de tierras (Ortiz-Solorio y Cuanalo, 1984).

3.1 USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN.

Para relacionar el concepto de uso de suelo, primeramente recurriremos al concepto de tierra, que ha sido definido por algunos autores, como Christian (Christian y Stewart, 1968 citado por Ortiz – Solorio y Cuanalo, 1984) quien define el concepto “tierra” de manera geográfica como un “área específica de la superficie terrestre; sus características se refieren a todos los atributos razonablemente estables o cíclicamente predecibles de la biosfera, incluyendo los de la atmósfera, el suelo, la geología subyacente, la hidrología, la vegetación la fauna y los resultados de la actividad humana pasada y presente, así como las interacciones de todos ellos. Se consideran dichos atributos y sus interacciones desde el punto de vista de la influencia que ejerzan sobre los usos actuales y futuros de la tierra por el hombre” esta definición también es utilizada por Eren (1973, citado en Beatty, M., G. Petersen y L. Swindale, 1979). Otros conceptos incluyen el espacio, la naturaleza, los recursos genéticos, el consumo o la comodidad.

La evaluación de tierras es el proceso que comprende el diagnóstico del comportamiento de la tierra bajo tipos de uso específico, consiste en la comparación entre la tierra y su uso, entendiéndose como tierra todas las características del paisaje natural que pueden ejercer influencia significativa sobre el uso de la tierra por el hombre. Así el uso de la tierra es la descripción de las formas de su uso y de las características más relevantes de la definición de su aptitud comparada con otros enfoques. Cada tipo de uso de la tierra tiene una serie de condiciones ambientales favorables o adversas en su práctica (FAO, 1986).

El ser humano al establecerse en una región, ve la necesidad de hacer uso de los recursos naturales que lo rodean; una de las primeras necesidades es determinar las zonas para asentamientos humanos, obtención de alimentos o crianza de ganado así como extracción de materiales para construcción; este conjunto de actividades modifica paulatinamente los recursos como la vegetación natural.

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) clasificó los usos de suelo del país en agricultura (de temporal, de humedad, de riego, cultivos anuales, cultivo permanentes), pastizal (natural, halófito, gipsófilo, huizachal, inducido o cultivado), bosques (mesófilo de montaña, bajo y abierto, de galería, cultivado), selvas (baja, mediana, alta; caducifolia, caducifolia espinosa, subcaducifolia, subperennifolia, perennifolia y de galería), matorrales (matorral subtropical, submontano, espinoso tamaulipeco, sarcocaulo, crasicaulo, sarco-crasicaulo, rosetófilo costero, desértico rosetófilo, desértico micrófilo, inerme, subinerme, espinoso, herbazal, cardonal, chollal, nopalera, izotal, crasi-rosulifolios, cirio), manglar, popal, tular, vegetación de dunas costeras, mezquital, huizachal, chaparral, matorral de coníferas, vegetación halófito, vegetación de desiertos arenosos, pradera de alta montaña, vegetación de galería, vegetación secundaria; áreas en proceso de desmonte, áreas sin vegetación aparente (INEGI, 1989).

El término “tipo de vegetación” se ha utilizado para designar la composición de especies de la cubierta vegetal de una región, área o lugar; y hace referencia al conjunto de especies que tienen determinadas formas de vida o también a la agrupación de especies que por sus requerimientos y tolerancias ambientales tienen características comunes. Para llevar a cabo la descripción de las comunidades vegetales se pueden considerar varios aspectos, destacan la flora (las especies componentes), la fisonomía (o apariencia de la vegetación), la ubicación geográfica y las características climáticas o edafológicas (Cordero y Morales, 1998).

Con base al sistema de clasificación de Rzedowski (1978) CONABIO determina la cobertura territorial por tipo general de vegetación, por medio de digitalización. Esto se muestra en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Superficie de los diferentes usos de suelo en la República Mexicana.

Tipo de vegetación	Área	Porcentaje del Territorio Nacional
	km ²	%
Bosque mesófilo de montaña	17886.86	0.92
Matorral xerófilo	732817.84	37.62
Pastizal	159110.23	8.17
Bosque espinoso	113029.04	5.80
Bosque de coníferas y encinos	376812.29	19.35
Bosque tropical perennifolio	193726.05	9.95
Vegetación acuática y sub acuática	23023.99	1.18
Bosque tropical caducifolio	268220.30	13.77
Bosque tropical subcaducifolio	63127.27	3.24
Total	1947753.87	100

3.2 PERCEPCIÓN REMOTA

Se define a la percepción remota (P.R.), como la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno, a través de los datos adquiridos por un sensor, el cual no tiene contacto directo con el objeto de investigación (Ritchie y Rango, 1996, *En*: Schultz y Engman, 2000); para nuestros propósitos, es la medición de propiedades de la superficie de la tierra usando datos adquiridos por aviones y satélites. Los Sistemas de P.R. proveen constantemente de imágenes de la tierra que son invaluable en el monitoreo de los efectos humanos (Schowengerdt, 2002).

Cabe destacar que no engloba sólo el proceso de obtención de la información, también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación (Soria *et al.*, 1998). Existen diferentes tipos de sensores, los cuales poseen características, heterogéneas, alcances, resolución, etc. por lo cual también obtienen información que puede utilizarse para diversos usos (e.g. manejo, planeación o uso meteorológico).

Algunas de las aplicaciones de la P.R. son:

- Valoración y monitoreo ambiental (degradación de la capa de ozono, deforestación, calentamiento global).
- Agricultura (condición del cultivo, erosión).
- Exploración de recursos no renovables (minerales, petróleo, gas natural).
- Recursos naturales renovables (suelo, bosques, océanos).
- Meteorología (dinámica atmosférica, predicción de lluvias).
- Mapeo (topografía, uso de suelo, ingeniería civil).
- Estrategia militar y reconocimiento (estrategia policíaca).
- Multimedia (ilustraciones y análisis).

De manera general, los sistemas de percepción remota constan de tres elementos: un sensor, el objeto de interés y un flujo energético, este último provee la información al sensor, por medio de tres fenómenos: la reflexión, la convección y la emisión-reflexión. La primera es la forma más común, ya que deriva de la luz solar, la cual proviene del sol y es reflejada por la cubierta terrestre hacia el sensor, aunque parte de esta radiación electromagnética es absorbida y dispersada por la atmósfera. La energía térmica se transfiere por convección, conducción y radiación (Soria *et al.*, 1998).

Las ondas electromagnéticas incluyen a la luz, las ondas de radio, los rayos X, los rayos gamma, las microondas y otras radiaciones. El ojo humano es sensible a la radiación electromagnética con longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm aproximadamente. Las longitudes de onda más cortas del espectro visible corresponden a la luz violeta y las más largas a la luz roja (Tipler, 1993) la radiación infrarroja es la principal responsable del efecto de calor del sol (Giancoli, 1995). Al arreglo en bandas de acuerdo al comportamiento similar entre las diferentes longitudes de onda se denomina espectro electromagnético:

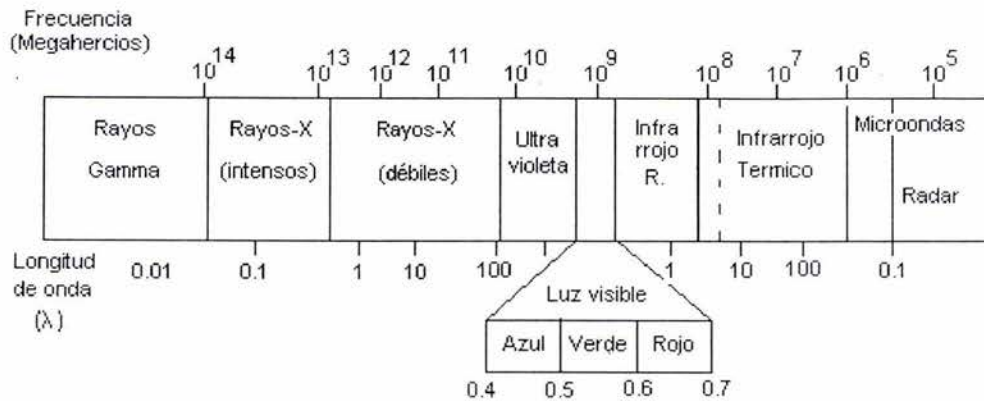


Figura 1. Espectro electromagnético (Soria *et al.*, 1998)

Obtención de la imagen.

El sensor convierte la radiación obtenida (reflejada o emitida) en una imagen de la distribución espacial de la radiación. Los sensores degradan la señal de interés, por ejemplo, la porción de la radiación total que contiene información sobre la superficie de la tierra. Esta radiación es óptica en la naturaleza del detector, el cual la traduce a una señal electrónica. La operación del escáner convierte la información espacial a continua, una señal electrónica temporal, la cual es nuevamente procesada por un convertidor análogo/digital. Finalmente es cuantificada a valores discretos de niveles digitales (ND) representados por los píxeles de una imagen (Schowengerdt, 2002).

Así, la luz reflejada al sensor por cada tipo de cubierta depende de las características de la superficie (suelo, topografía y vegetación) entonces se tienen diferentes cantidades de energía absorbida y reflejada. Por ejemplo, la cantidad de luz reflejada por el dosel de las plantas es la respuesta de sus estructuras, el suelo, la superficie adherentes, incluso de sus estructuras reproductivas, además de la influencia de la topografía (Estes y Thurley, 1984). Willstätter y Stoll (1918, citado por Lillesand y Kiefer, 1994) explicaron la reflectancia y la transmitancia de la hoja con base en la reflexión de luz visible en las paredes celulares del tejido mesófilo. Gausman *et al.*, (1970) relacionan cuantitativamente la reflectancia del infrarrojo cercano con el número de espacios intercelulares, concluyendo que la reflectancia se incrementa cuando se incrementa el número de espacios, porque la luz pasa de un índice de refracción alto a un bajo.

Los diferentes compuestos químicos contenidos en la hoja, tienen diferentes absorbancias y reflectancias de la luz. La clorofila de las hojas verdes usualmente absorbe del 70 al 90% de la luz en la parte azul (cerca de las 0.45 μm de longitud de onda) o roja (cerca de las 0.68 μm longitud de onda) del espectro electromagnético. La absorbancia es muy pequeña en la longitud de onda de 0.55 μm, donde una cresta de la reflexión es normalmente menor a 20% en las superficies de las hoja superiores. A bajos contenidos de pigmentos la reflectancia es mayor (Estes y Thurley, 1984).

Los diversos tipos de cubiertas de la Tierra rigen gran parte de la reflexión de la superficie terrestre, que es medida por sensores en varias plataformas remotas, tal como los escáner multiespectrales y termales o microondas activas de sistemas magnéticos. En algunas partes del mundo la cubierta terrestre es altamente dinámica, dado que además de los efectos de la temporada de lluvia, la temperatura, así como las sequías, el género humano ha influenciado la vegetación, al convertir la cubierta de vegetación natural en campos de cultivo, donde se aplican rotaciones de cultivo. Otros aspectos dinámicos son los incendios forestales y la destrucción de zonas con vegetación inundada.

Las mediciones realizadas en campo, revelan que algunas cosechas tienen reflectancias específicas y características que ocurren en la parte roja e infrarroja del espectro electromagnético. La luz visible es principalmente absorbida por la vegetación. Incluso, la reflectancia del verde es muy baja, comparada con otros materiales, como rocas o suelos y al mismo tiempo, la reflexión de las ondas del infrarrojo cercano son muy altas para la vegetación sana en comparación con el resto de las cubiertas (Estes y Thurley, 1984).

El Programa Landsat.

Hasta 1960 la fotografía aérea era el único sistema utilizado de sensores remotos que proveía de información; con el inicio de los programas espaciales y el lanzamiento del sistema de satélites Landsat, en 1972 se iniciaría una nueva etapa para las investigaciones a distancia (Figura 2), así el Landsat MSS (1972) provisto de un sensor de múltiples bandas MSS y RBV (Return Beam Vidicom), con una resolución de 80 m y cubriría 185 km x 185 km, repitiendo la cobertura cada 18 días (Figura 3); después se incorporaron en 1982 y 1984 el Landsat Thematic Mapper (TM) con 30m de resolución y 7 bandas multiespectrales, además de una banda pancromática con 10 m² de resolución (Janzen, 2000; Soria, 1998).

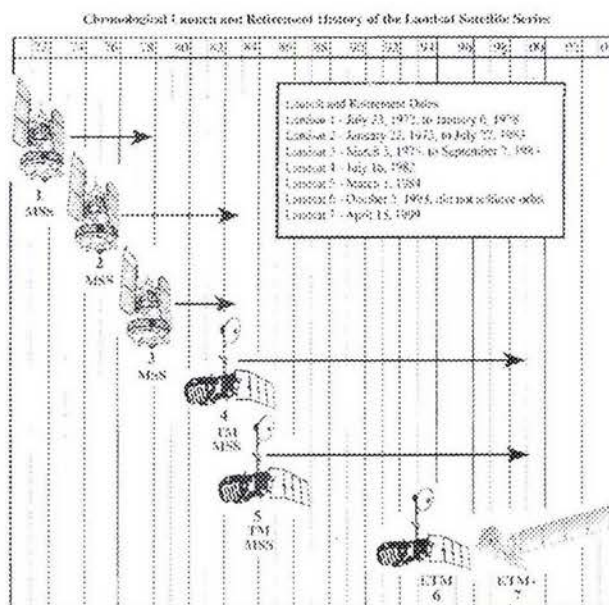


Figura 2. Cronología de los satélites Landsat (Jensen, 2000).

El Landsat 1, fue lanzado el 23 de Julio de 1972; cuenta con un sensor MSS y RBV; el Landsat 2 el 22 de Marzo de 1975 (MSS y RBV); Landsat 3 el 5 de Marzo de 1978 (MSS y RBV); el Landsat 4 el 16 de Julio de 1982 (TM y MSS); el Landsat 5 el 1 de Marzo de 1984 (TM y MSS); el Landsat 6 en Octubre de 1993 (ETM) y finalmente el Landsat 7 en Julio de 1998 (ETM plus).

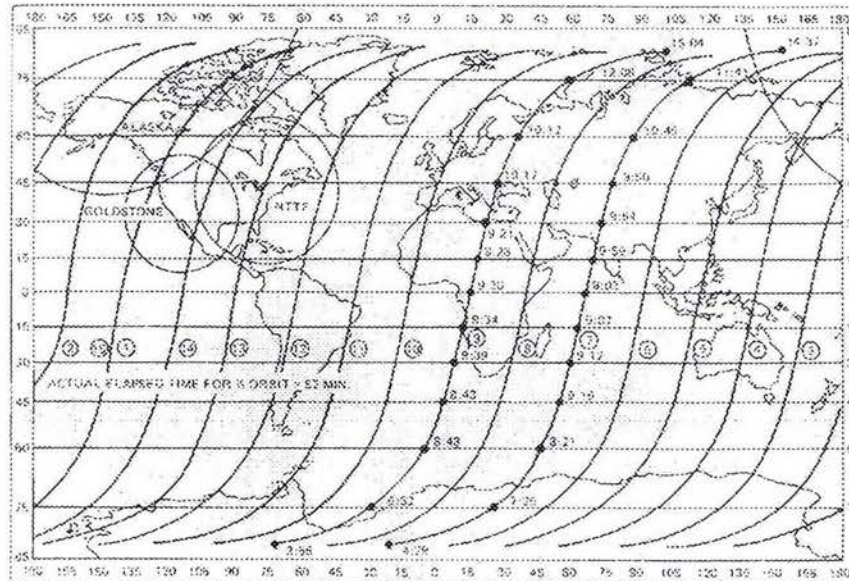


Figura 3. Trazo de la órbita del Satélite Landsat (Colwell, 1985).

En ciertos trabajos multitemporales, pueden utilizarse imágenes de varios satélites para diversos fines, tales como: cuantificar cambios de cobertura, uso de suelo, en un lapso determinado para zona en especial, pero es necesario hacer compatibles las imágenes de los satélites en cuestión (Chuvienco, 2002; Schowengerdt, 2002). Franklin (1990) realizó el mapeo de vegetación natural aplicando una transformación de componentes principales a la imagen para determinar la estratificación de las coberturas en las zonas de Saheliana y Sudanesa. Carranza *et al.* (2003) estiman la tasa de transformación de hábitat a partir de varios juegos de imágenes Landsat de diferentes años.

Procesamiento de imágenes

Las imágenes de satélite son un enorme conjunto de datos que pueden ser interpretados para una gran variedad de necesidades. El manejo y procesamiento de las imágenes, dependerá de los objetivos del trabajo, mismos que se relacionan con los aspectos a estudiar (suelo, vegetación, infraestructura, geología, etc.), el tipo de satélite y las bandas que se deberán utilizar.

Para obtener la información de las imágenes multiespectrales, es necesario transformar esta información en objetos discretos que se distinguen unos de otros por una clasificación temática discreta, dentro de los diferentes clases de objetos e incluso dentro de un solo objeto pueden ocurrir diferentes reflexiones. La clasificación determina una clase temática de un conjunto definido por el usuario para cada píxel de la imagen y es realizado con base a la medida de reflexión en cada píxel. Debido a la complejidad de las imágenes de satélite, la clasificación automática puede utilizarse para complementar la interpretación visual. Un píxel es un elemento de la imagen digital en dos dimensiones, es la unidad más pequeña necesaria para el procesamiento de la imagen original.

Existen una gran variedad de métodos de clasificación, pero la primera distinción son principalmente los no supervisados y los supervisados (Schultz y Engman, 2000).

La **clasificación no supervisada**, puede obtenerse a través de un delineado de todos los atributos vector de la imagen en el atributo espacial y entonces analizando ambos generan grupos (clusters) representados en un mapa ráster, en el cual cada píxel tiene un valor específico. Se debe especificar algunos parámetros, como el tamaño máximo del cluster y la distancia mínima, cuando un cluster llega a tener el tamaño máximo automáticamente lo divide; complementariamente cuando dos cluster no cumplen con la distancia mínima estos son combinados.

En la **clasificación supervisada** a diferencia de la no supervisada es necesario un cierto conocimiento sobre las relaciones entre las distintas clases, dicho conocimiento puede extraerse de bases de datos o bien directamente de campo, Se divide en dos fases:

- a) Fase de entrenamiento o definición digital de las categorías. Donde el usuario deberá definir un determinado número de clases, así como un número de píxeles que pertenecen a esas diferentes clases dentro de la imagen, esta información se reúne con anticipación y puede provenir de trabajo de campo, mapas, y se asignará a las clases en la imagen. Cada uno de los puntos relacionados con una clase y digitalizados se conocen como puntos de entrenamiento.
- b) Fase de decisión o de asignación. En esta fase se determina el algoritmo o criterio para dividir los atributos espaciales, de acuerdo a los datos de entrenamiento (Gorte, 2000. En: Schultz y Engman, 2000).

El objetivo de la clasificación es generar explicaciones generalizadas de forma espacial, puede ser considerada como la primera opción para una metodología estandarizada, con el potencial a ser desarrollada dentro de un protocolo, que puede extenderse tanto espacial como temporalmente (Lillesand, 1996).

Criterios de Clasificación.

En la asignación de cada uno de los píxeles de la imagen a partir de sus niveles digitales (ND), son utilizadas diferentes ecuaciones para establecer la diferencia entre clases. Todas definen un área dominio, en torno al centro de cada categoría a discriminar, mediante un conjunto de ecuaciones discriminantes (Chuvieco, 2002). Los más comunes son :

- 1) **Clasificador de Distancia mínima.** El píxel se asigna a la clase más cercana, en escala espectral, además no considera la dispersión de la categoría o la correlación entre bandas y tiende a delimitar grupos circulares de radio proporcional.
- 2) **Clasificador de Paralelepípedo.** El usuario fija un área dominio para cada clase y los píxeles se asignan si su ND está dentro de esa área dominio en todas las bandas consideradas, señalando umbrales de dispersión.
- 3) **Clasificador de Máxima probabilidad.** Es el más complejo, ya que implica un mayor cálculo, sin embargo es también el más utilizado. Considera la probabilidad de que un píxel x definido por un determinado ND pertenece a una clase A , calculando a partir de la media y la varianza. Al terminar el proceso, es posible establecer umbrales de probabilidad para cada categoría, de tal forma que se rechacen aquellos píxeles con una probabilidad de pertenencia muy baja, lo cual reduce los errores de comisión debidos a una deficiente definición espectral.
- 4) **Clasificador de árbol.** Consiste en discriminar secuencialmente cada una de las categorías, basándose en valores espectrales, texturales, temporales o en información auxiliar. Para cada clase se establecen reglas dicotómicas.
- 5) **Redes Neuronales.** Se utilizan para predecir un comportamiento complejo, con base en una muestra de entradas y salidas observadas. Se ha comprobado su potencialidad como alternativa a los clasificadores tradicionales, ya que son independientes al tipo de distribución.
- 6) **Clasificación Fuzzy.** Considera la pertenencia borrosa a una categoría cuando se admite un grado de pertenencia. Cada píxel se etiqueta en varias categorías, con un valor más o menos alto en función de la similitud espectral. Se obtienen tantas imágenes como categorías se consideren. Sus aplicaciones son de particular interés cuando se analizan coberturas con alto grado de mezcla. Un importante campo de aplicación es el inventario forestal, donde este tipo de

clasificación puede facilitar datos de gran interés para la estimación global de densidades y superficies.

Firmas espectrales

El comportamiento de la reflectancia de un objeto es producto de sus características y de los rasgos de la superficie terrestre, este comportamiento constituye un modelo de respuesta espectral y su conocimiento permite la identificación de rasgos de interés, así como la distinción de otros componentes, como son los tipos de cultivos, bosques o yacimiento minerales.

La firma espectral de un material puede definirse en la región solar reflexión de su reflectante como una función de la longitud de onda, medida en una resolución espectral apropiada. En otra región espectral, las firmas de interés pueden encontrarse en temperatura y emisividad (infrarrojo térmico) o bien por rugosidad de la superficie (radar). Por lo tanto diferentes tipos de materiales pueden distinguirse con base en la diferencia de sus firmas espectrales (Schowengerdt, 2002).

Factores que afectan la firma espectral:

- a) variabilidad natural de los tipos de materiales.
- b) burda cuantificación espectral de muchos Sistemas de PR.
- c) modificación por la atmósfera.

Parker y Wolf (1965, citado por Soria *et al.*, 1998) mencionan que “todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación reflejada, emitida y absorbida por lo que estas características espectrales pueden ser utilizadas para distinguir un objeto de otro, o para obtener información acerca de la forma, tamaño y otras propiedades físicas y químicas”. La expresión gráfica de la distribución de la reflectancia por longitud de onda emitida por cada objeto se ha denominado “firma espectral”.

Las firmas espectrales de algunas cubiertas, pueden presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda (Star y Estes, 1990), como la nieve mientras que otras ofrece un comportamiento más selectivo como el agua y la vegetación (Figura 4). Las firmas de la vegetación tienen características similares (Figuras 5 y 6), a saber por la baja reflectancia en la región verde-rojo del espectro electromagnético.

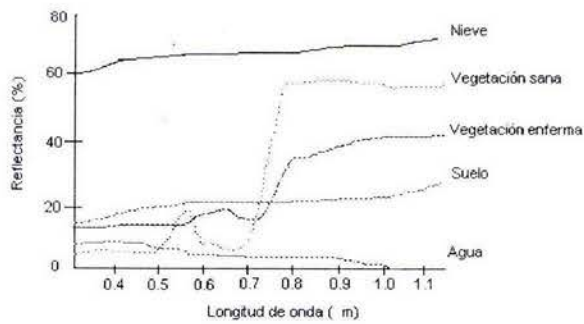


Figura 4. Firmas espectrales cubiertas (Soria et al., 1998).

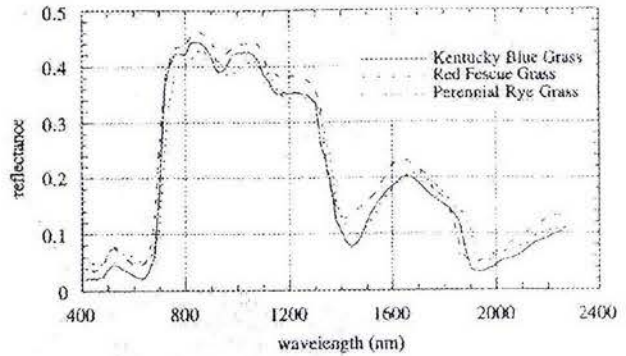


Figura 5. Firmas espectrales de pastos (Schowengerdt, 2002).

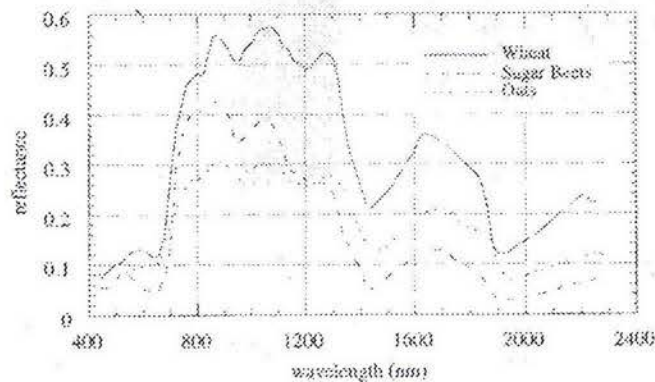


Figura 6. Firmas espectrales de cultivos (Schowengerdt, 2002).

Las firmas de vegetación tienen características similares, a saber por la baja reflectancia en la región verde-rojo del espectro electromagnético. La pequeña cima en el verde, cercana a los 550 nm es debido a la baja absorción de clorofila, relativa en la región rojo y azul del espectro. Esta cima es la causa por la cual la vegetación sana es apreciada de color verde por el ojo humano. El pico incrementa en reflectancia cercano a los 700 nm, algunos la llaman la “vegetación de orilla roja” y es causado por los espacios en la estructura celular de la planta. Finalmente las fuertes pendientes cercanas a los 1400 nm y 1900 nm se deben a la absorción de agua en los espacios celulares de la planta. Por sus características tiende a cambiar completamente durante el ciclo de vida estacional de las plantas; es por esto que es difícil igualar la firma espectral de la vegetación en condiciones de laboratorio ya que se omiten las condiciones de topografía y atmósfera (Schowengerdt, R., 2002).

Todos los materiales de la superficie de la tierra, pasivamente absorben y reflejan la radiación solar entre 0.4 y 3 μm de rango espectral. Algunos materiales también transmiten radiación solar como el agua y el follaje de los árboles. La modelación de la reflectancia de la vegetación y del dosel de las plantas es completamente compleja y es materia de interesantes investigaciones.

Índices de vegetación

Una indicación de la presencia de vegetación en una imagen multispectral se obtiene de la comparación de los valores de reflectancia de las bandas roja e infrarroja cercana, en ambas bandas los valores altos indican presencia de vegetación. Existen diferentes tipos de índices y sus diferencias radican en el manejo de los valores, correspondientes a las bandas empleadas.

Jackson y Huete (1991 *En: Eastman, 1999 Vol. 1.*) clasifican los índices de vegetación en dos grupos:

1. Basados en la pendiente.

a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), $NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$

b) Índice de vegetación transformada (TVI), $TVI = \sqrt{\left(\frac{NIR - R}{NIR + R}\right) + 0.5}$

c) Índice de vegetación transformado y corregido (CTVI) es una corrección del índice anterior. $CTVI = \frac{((NDVI + 0.5))}{ABS(NDVI + 0.5)} \times \sqrt{ABS(NDVI + 0.5)}$

d) Índice de Vegetación Transformada de Thiam's (TTVI). $TTVI = \sqrt{ABS(NDVI + 0.5)}$

e) Índice de vegetación de proporción simple (RVI). $RVI = \frac{R}{NIR}$

f) El Índice de Diferencia de Vegetación (DVI) tiene la siguiente fórmula: $DVI = NIR - R$.

g) El Índice de Proporción de Vegetación (RVI), es el cociente resultado de la división del valor de la banda infrarroja entre el valor de la banda roja.

Donde NIR = banda del infrarrojo cercano, R = banda roja y ABS es el valor absoluto de $NDVI + 0.5$.

2. Basados en la distancia.

Derivan del Índice de vegetación Perpendicular (PVI). El principal objetivo es cancelar el efecto de el brillo del suelo en casos donde la vegetación esta espaciada y los píxeles

contienen una mezcla de la vegetación verde y del suelo. $RVI = \frac{NIR}{R}$

Utilidad de los índices de vegetación

Aunque existe un amplio campo de trabajo, se utilizan principalmente en dos situaciones:

- a) Mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto a esas dos bandas, e.g. realzar suelos y vegetación en la porción visible e infrarrojo cercano (IRC) del espectro electromagnético.
- b) Reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

La firma espectral de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas del visible (roja) y el IRC, mientras que en la primera los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al IRC. Por esta razón se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda R del espectro y la del IRC, lo que permite separar la vegetación sana de otras cubiertas.

Algunos autores consideran necesario corregir la imagen topográfica y atmosféricamente para después emplear los cocientes, aunque otros autores utilizan directamente los niveles digitales de la imagen con la condición de no conceder un valor físico a los resultados y manteniendo el siguiente principio: **cuanto mayor sea el resultado, mayor vigor vegetal presenta la zona observada** (Chuvieco, 2002).

Un aspecto de gran interés es que el NDVI varía entre un margen de -1 y $+1$, lo que facilita la interpretación, por ejemplo es posible señalar el umbral crítico para cubiertas vegetales un valor de NDVI en torno 0.1 y para la **vegetación densa entre 0.5 y 0.7** (Holben, 1986 citado por Chuvieco, 2002).

Los siguientes parámetros se han relacionado directamente con el NDVI:

1. Contenido de clorofila en la hoja (influye en la absorción en la banda R) (Franklin, 2001).
2. Contenido de agua en la hoja (aunque ésta es una estimación indirecta a través del estrés hídrico sobre el índice de área foliar y el contenido de clorofila).
3. Flujo neto de CO_2
4. Radiación fotosintética activa absorbida por la planta (APAR), con una relación directa y casi lineal, especialmente cuando las hojas son horizontales y el suelo es suficientemente oscuro (Sellers, 1989)
5. Productividad neta de la vegetación, relacionada con la APAR a través de un factor de eficiencia para cada planta.
6. Índice de área foliar (LAI) que presenta una asociación positiva cuando la vegetación no cubre por completo el suelo, de lo contrario el NDVI se satura.
7. Cantidad de lluvia recibida por el dosel vegetal, lo que está directamente relacionado con su vigor vegetal.

8. Dinámica fenológica, a partir de seguir la evolución estacional de los parámetros antes señalados.
9. Evapotranspiración potencial, inversamente relacionada con los índices de vegetación a través del vigor de la hoja y el estrés hídrico.

Los NDVI se han utilizado para el seguimiento y evaluación de la dinámica de la vegetación terrestre incluso para seguir el efecto del cambio estacional en el vigor de las cubiertas vegetales, el efecto de los procesos globales continuos (calentamiento terrestre, fenómenos provocados por El Niño).

Son diferentes los múltiples usos de los índices de vegetación; Tanser y Palmer (1999) utilizaron el NDVI para monitorear los patrones de degradación en ambientes semiáridos en el paisaje de Sur África. Du Plessis (1999) realiza una regresión lineal entre el NDVI, la vegetación y la lluvia en el Parque Nacional Etosha de Namibia.

Factores que modifican al NDVI:

1. Proporción de vegetación y suelo observada por el sensor, por ejemplo, los mismos valores de NDVI pueden corresponder a cubiertas vigorosas pero poco densas, o a cubiertas densas con poca vitalidad. Para disminuir este error Huete *et al.* (1992, citado por Chiveco, 2002), incluyeron en la fórmula un parámetro: L, que ajusta el índice a una reflectividad promedio de fondo. De esta forma se calcula el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI).

$$SAVI = \frac{\rho_{i,j,IRC} - \rho_{i,j,R}}{\rho_{i,j,IRC} + \rho_{i,j,R} + L} (1 + L)$$

2. Efecto de la absorción atmosférica. Lo que puede solucionarse utilizando una corrección atmosférica previa a las bandas R e IRC, su empleo está a juicio de quien realiza el proceso, por lo ya mencionado anteriormente.

Aunque en la mayoría de los programas especializados en el manejo de imágenes de satélite, contemplan un módulo de índices de vegetación, es importante conocer el intervalo de longitud de onda necesario, y así trabajar (o adquirir) las bandas adecuadas. Por ejemplo, el denominado índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se obtiene al procesar las bandas 7 y 5 del sensor Landsat MSS, 3 y 4 para los sensores TM y ETM+; mientras que se utilizan las bandas 3 y 2 para el HRV, así como 2 y 1 para AVHRR (Chuvieco, 2002; Schowrenget, 2002).

3.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas para el análisis de datos espaciales. Se han desarrollado a la par de la tecnología dado que la evolución en la capacidad de las computadoras para el manejo y procesamiento de una gran cantidad de datos facilita su uso en equipo personal y no requiere de enormes procesadores. Para definir un Sistema de Información Geográfica, es necesario considerar los tres elementos que lo integran (Navarro y Legorreta, 1998)

1. Los sistemas. Integrados por los elementos físicos (hardware), los sistemas operativos (UNIX, MSDOS, REDES), los programas de aplicación (Arc/Info, ArcView), el personal de operación, el almacenamiento (en medios magnéticos) y el usuario. Estos sistemas presentan tres elementos para su funcionamiento: la entrada de información (mapas, fotografías aéreas, etc.), el proceso (operaciones de cómputo y análisis de la información) y la salida (la representación gráfica o alfa-numérica de los resultados).
2. La información. Se entiende como un conjunto de datos interrelacionados. Los datos geográficos representan fenómenos en un espacio y tiempo determinado a través de puntos, líneas, polígonos o píxeles; éstos a su vez se relacionan y procesan para generar nueva información.
3. La geografía. De acuerdo con su concepto, la geografía es la ciencia que tiene por objeto de estudio, la localización de hechos y fenómenos físicos, biológicos y sociales sobre la superficie terrestre, las causas que los originan y sus relaciones mutuas.

Existen muchas definiciones para un sistema de información geográfica; de acuerdo con Demers (2000), un sistema de información geográfica opera con una serie de subsistemas dentro de un gran sistema, dado que el SIG distribuye datos en espacio y tiempo emplea hardware y software de una computadora. Mas importante, quizá es el subsistema natural de esta definición que provee una fácil comprensión del estudio de un SIG.

Un SIG, de acuerdo con Demers (2000) tiene los siguiente subsistemas.

1. Un subsistema de datos de entrada, que recopila y procesa información espacial de varias fuentes. Este es responsable de la transformación de diferentes tipos de datos espaciales (ej. a partir de símbolos de isolíneas sobre un mapa topográfico a puntos de elevación en el SIG).
2. Un almacén de datos y un subsistema de recuperación que organiza la información espacial en una forma que permita la recuperación, actualización y edición.
3. Manipulación de datos y subsistema de análisis que realiza tareas con los datos, agrega y retira, estima parámetros y restricciones, y realiza funciones de modelación.

4. Un subsistema de reportes que muestra toda la información o parte de la base de datos en tablas, gráficas o en un mapa.

La tecnología SIG permite adoptar a su vez nuevas tecnologías e integrarlas para analizar procesos ecológicos, dispersión de fauna, uso de hábitat, análisis de paisaje, composición de comunidades, además del análisis de información técnica, de operación seguridad, mantenimiento para llevar a cabo políticas de prevención, control, ordenamiento y manejo.

El campo de los SIG es extenso, pueden ser utilizados para la detección de riesgos en las industrias petrolera, eléctrica, análisis de líneas de conducción o ductos, detección de zonas de alto riesgo, exploración de terrenos y caminos (García, 2001; Zermeño, 2000). También pueden emplearse para trazar vectores epidemiológicos y de control sanitario de enfermedades contagiosas.

Componentes básicos y elementos espaciales

Los SIG tienen tres componentes principales, el equipo, el software apropiado y los recursos humanos. El hardware consiste principalmente de una unidad central, con discos de almacenamiento, además de varios periféricos de entrada de datos, despliegue visual. Son importantes algunos dispositivos adicionales como una paleta digitalizadora, plotter y pantallas de visualización para la salida de los datos.

Los SIG también pueden operar en microcomputadoras, aunque las estaciones de trabajo se han hecho populares. Es importante la compatibilidad del software utilizado en los procesos; la entrada principal de la información es la captura de los datos, de forma manual o a través de bases de datos o GPS. El almacenamiento, así como el análisis y tratamiento de los datos tiene en algunas circunstancias características especiales, como de memoria o visualización (Malczewski, 1999; Adinarayana et al., 1994).

Los objetos espaciales en el mundo real se presentan como cuatro tipos de formas fácilmente identificables: puntos, líneas, áreas y superficies. Los puntos, son fenómenos espaciales los cuales ocurren solo en una locación en el espacio, como árboles, casas, intersecciones de caminos. Las líneas u objetos lineares son aquellos que ocupan una simple dimensión en el espacio en coordenadas espaciales, estos objetos de una sola dimensión pueden ser caminos, ríos, límites regionales, curvas de nivel, etc. En tercer lugar están las áreas, de dos dimensiones, objetos que ocupan una extensión real, grande y continua, como ciudades o continentes. Para describir la localización de las áreas en el espacio, nosotros reconocemos que están compuestas de series de líneas que comienzan y terminan en alguna coordenada (Demers, 2000).

Formatos de la información.

Existen dos formas de representar el espacio cartográfico en un SIG y se conocen como Modelos Vectoriales y Ráster. La mayoría de los SIGs, tienen la capacidad de transformar a partir de un formato al otro.

En la estructura de datos vectoriales, el espacio en dos dimensiones es asumido como continuo permitiendo una muy precisa representación de localización, descrita por pares de coordenadas, y este par son los bloques fundamentales de construcción de la cual los elementos espaciales como puntos, líneas y áreas (Johnston, 1998). Este formato es muy ligero y conveniente para algunos procesos dentro de un SIG.

El formato ráster (o de malla) también representa el espacio en 2 dimensiones, pero como una arreglo matricial de píxeles, cuadrada o rectangular. Cada cuadro (o píxel) de la malla representa un cuadrado o porción rectangular de la superficie de la Tierra. La resolución de los datos ráster es determinada por el tamaño de las celdas en el terreno, la precisión de localización depende del tamaño de la celda de la malla. La malla más pequeña en tamaño implica un gran volumen de datos y espacio en disco. En este formato, los puntos son representados como celdas individuales, en cambio, las líneas y las áreas son representadas como agrupamientos o píxeles adyacentes. El inconveniente de esta estructura es la capacidad de memoria que es requerida, tanto para el almacenamiento como para la realización de procesos; esto último ha sido uno de los limitantes más importantes en el pasado (Demers, 2000 y 2002; Levachkine, 2000;).

Proyecciones.

Los mapas son modelos de uno o varios fenómenos espaciales, es una abstracción de la realidad, no una versión en miniatura de esta. Un globo del tamaño como el de la Tierra puede ser difícil y costoso llevar la realidad a un sistema de Información geográfica; como resultado, los cartógrafos han desarrollado un conjunto de técnicas, llamados "proyecciones de mapas", designados para representar con razonable exactitud la forma esférica de la tierra en dos dimensiones. Existen tres familias de proyecciones: plana, cilíndricas, cónica y azimutal (Raisz, 1974).

Los cartógrafos han estudiado y generado nuevas proyecciones para la representación de la tierra en dos dimensiones. Con la aplicación de la percepción remota y los sistemas de información geográfica, las características de las proyecciones no pueden ignorarse, incluso es más importante la necesidad de minimizar el efecto de distorsión de la proyección sobre la verdadera representación de fenómenos espaciales.

El sistema de coordenadas geográficas basado en la latitud y longitud es utilizado para localizar objetos o áreas cuando se encuentran en la tierra. Sin embargo pueden utilizarse necesario otros sistemas de referencia llamados coordenadas rectangulares o coordenadas planas para localizar objetos correctamente en estos mapas.

El más utilizado en operaciones SIG es el Universal Transversal de Mercator (UTM), porque permite precisar medidas utilizando el sistema métrico, el cual es aceptado en muchos países y por una gran parte de la comunidad científica (Demers, 2000, Chuvieco, 2002). Este sistema UTM divide la latitud de la tierra 84 grados norte y 80 grados latitud sur, en 60 zonas verticales numeradas, cada una con 6 grados de latitud de ancho.

Todos los sistemas de coordenadas dependen de medidas de precisión del tamaño de la tierra, estas medidas a su vez dependen de algunos puntos de confianza para comenzar. Estos puntos son generalmente referidos como **Datum**. El datum, permite a los científicos y exploradores comparar sus mediciones terrestres, no solo entre ellas mismas utilizando un datum común, sino también con otros sistemas de coordenadas basados en otros data. Están basados en algunas formas no esféricas de la tierra conocidas como Elipsoides. La armada militar de los Estados Unidos de Norteamérica, desarrollo el North American datum (NAD27), así como el World Geodetic System (WGS84), los cuales son muy utilizados en la mayor parte de la cartografía de Norte América (Demers, 2000).

3.4 FRAGILIDAD

El conjunto de características ecológicas de un sitio esta ligado también a su estabilidad o fragilidad. Se define fragilidad como “el reflejo del grado de sensibilidad de los hábitats, comunidades y especies ante un cambio ambiental, así que incluye una combinación de factores intrínsecos y extrínsecos” (Ratcliffés, 1977; citado por: Nilsson y Grelsson, 1995) pero la explicación de estos términos es más compleja, ya que los diferentes aspectos de la fragilidad no necesariamente se relacionan, además de que no es fácilmente cuantificable y es dependiente de la escala, además está relacionada con la estabilidad del sistema.

El medio ambiente está formado por elementos naturales que son influenciados en diversos grados por la acción humana, dando como resultado desde ambientes o paisajes totalmente naturales, hasta ambientes totalmente antropizados, como las áreas urbanas, minas, presas, etcétera. Sin embargo, las condiciones de asimilación de los impactos antrópicos son muy diferentes dependiendo de la capacidad del medio para enfrentar estos impactos. A partir de esta idea, se presentan los conceptos de resistencia, resiliencia y fragilidad, que muestran algunos comportamientos del medio natural frente a un agente de presión, principalmente la actividad humana (Arévalo, 2001).

La resistencia muestra la habilidad de una unidad del paisaje a evitar desplazamientos desde el lugar inicial o estado de equilibrio dinámico. A mayor resistencia, menor capacidad de movilización, y a menor resistencia, mayor movilidad. La capacidad de permanencia o la resistencia dependerá del arreglo y la estructura de los componentes que integran la unidad territorial y la magnitud de la presión ejercida sobre esta unidad. Una unidad del paisaje puede romper su capacidad de resistencia al manifestarse un agente de presión, y desplazarse hacia otra condición. Sin embargo existe una capacidad de retorno al estado inicial a pesar del impacto. A esta condición de extensión y retorno se le llama elasticidad, y a la velocidad a la cual regresa se le llama resiliencia. El análisis de complejidad es usualmente enfatizado por la estructura de las comunidades (Arévalo *et al.*, 2001; Mackenzie, Ball y Virdee, 1998; Peterson, Craig y Holling, 1998).

El tercer concepto que se muestra es fragilidad que se deriva de la asociación resistencia-resiliencia. La fragilidad, de manera general se considera como la capacidad intrínseca de la unidad territorial a enfrentar agentes de cambio, basado en la fortaleza propia de los componentes y en la capacidad y velocidad de regeneración del medio.

La fragilidad territorial está determinada por la correlación entre la sensibilidad conjunta de los componentes naturales, principalmente la relación relieve-pendiente-suelo-vegetación.

En México, la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, ahora SEMARNAT) realizó el Ordenamiento General del Territorio Nacional (SEMARNAP, 2000) en dicho trabajo se elaboró el mapa de fragilidad para el país considerando los componentes de suelo, relieve y vegetación a una escala de 1:4,000,000 partiendo de la capacidad de autorregeneración y los requerimientos del hábitat (Anexo 2).

En dicho trabajo se establecen cinco niveles de fragilidad: Muy alta, alta, media, baja y muy baja, de acuerdo con la convergencia de los parámetros y los criterios para la determinación de la fragilidad. Se considera que en el país no existe ningún tipo de vegetación, de suelo, o de relieve que por sí mismo pudiera considerarse de fragilidad muy baja y que sea determinante para que toda el área tenga ese nivel, dado que cualquiera de sus variantes está expuesta de alguna manera a agentes limitantes.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento demográfico en la zona metropolitana, así como la inmigración a la capital afecta a las zonas aledañas a la mancha urbana, afectando los recursos existentes para el uso y servicio de esta población. Debido a la cercanía del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl a la Cd. de México éste es una fuente de recursos y servicios ambientales, de donde se extraen diversos materiales maderables y no maderables para la población, se practica la agricultura, así como el desmonte de terrenos forestales para otros fines (casas habitación, agricultura, recreación, etc.).

Si bien las políticas ambientales han planteado la creación de áreas naturales protegidas, es necesaria una planeación en éstas para detectar áreas de mayor valor de conservación, con un enfoque de manejo, es decir en presencia de factores de impacto por actividad humana, para lo cual es fundamental identificar los lugares con mayor susceptibilidad a la degradación.

Actualmente existen algunos enfoques de diagnóstico, que no precisan los factores de impacto. Por ejemplo, es posible conocer el estado de la vegetación a través de la clasificación. Cantellano *et al.*, (2002) identifican para la zona de estudio cuatro tipos de comunidades, en una relación conservación-deterioro-aprovechamiento-regeneración, utilizando un análisis multivariado de ordenación y clasificación. Sin embargo este enfoque no puntualiza los factores potenciales de degradación, como son la pendiente, la cercanía a poblados y actividades antropogénicas, entre otras.

Ante esta situación se ha propuesto emplear el concepto de fragilidad, sin embargo existen diversas aproximaciones de aplicación, que dependen del tipo de ecosistema, la escala, los factores de disturbio e incluso de la información disponible. Además son pocos los enfoques que incorporan de manera integrada las herramientas de sistemas de información geográfica y percepción remota.

En este trabajo se pretende elaborar un método específico para la región, a partir de una imagen de satélite, información cartográfica en formato vectorial y ráster, así como trabajo de campo centrado en el estrato arbóreo de la vegetación.

5. HIPÓTESIS

Al considerar que la reflectancia de un terreno depende de factores físicos y biológicos, entonces su valor está asociado a los usos del suelo y dado que éstos son heterogéneos, entonces existe una diferencia significativa que permita establecer una relación entre tipo de uso del suelo y vegetación con su firma espectral en el Parque Nacional Izta -Popo y su zona de influencia.

Si las firmas espectrales se integran a criterios de pendiente y tipo de suelo y vegetación en un Sistema de Información Geográfica se podrá elaborar un esquema de fragilidad, en donde la pendiente sea el factor determinante.

6. OBJETIVOS

6.1 GENERAL

Evaluar el uso de suelo, vegetación y fragilidad del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia, integrando sistemas de información geográfica y percepción remota.

6.2 ESPECÍFICOS

- Identificar y cuantificar los diferentes usos de suelo y vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl y su zona de influencia.
- Evaluar la condición de conservación de los usos del suelo y la vegetación mediante percepción remota.
- Realizar un mapa de uso de suelo y vegetación.
- Obtener las pendientes y suelos existentes para la zona.
- Elaborar un esquema para evaluar la fragilidad ecológica.
- Realizar un mapa de fragilidad.

7. ZONA DE ESTUDIO

La zona se ubica en la Sierra Nevada, localizada en el Eje Neovolcánico Transversal y extendiéndose a lo largo de 100 km en dirección NNW a SSE entre los estados de México, Morelos y Puebla. Los elementos que lo componen de norte a sur son: los cerros Tláloc y Telapón de 4150 m y 3996 m de altura respectivamente; el Iztaccíhuatl de 5286 m de altura y el Popocatepetl de 5452 m (Yarza, 1983).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl fue establecido por Decreto Presidencial el 29 de Octubre de 1935, señalándose su límite inferior en la cota de los 3,000 msnm y modificándose a 3,600 msnm en 1948; este último determina la superficie actual del parque que incluye a los dos volcanes y sus áreas aledañas por arriba de los 2,500 m (CONABIO, 1998). Abarca una superficie aproximada de 25,679 ha.

En 1937, el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas se establece por Decreto Presidencial y comprende principalmente el área de recreo de Río Frío, con una superficie de 19,418 ha.

Actualmente se reconocen ambos parques como un conjunto de áreas protegidas con un total de 44,797 ha que se encuentran ubicadas en los Estados de Puebla, México y Morelos, denominados como la Región Terrestre Prioritaria (RTP) 107 "Sierra Nevada" por su importancia biológica y para la conservación de su biodiversidad. Esta RTP incluye el área del Parque Nacional y se extiende en una superficie de 1,227 km².

Las características generales de la región son las siguientes:

Los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl fueron edificados por emisiones de lava que surgieron a través de calizas plegadas, compuestas principalmente de andesitas y basaltos. Las erupciones que formaron esta región, iniciaron en el mioceno, continuaron el pleistoceno y hasta nuestros días aunque en menor proporción e intensidad, lo cual ha influido en la formación del relieve (Domínguez y Olivares, 1997). Todos los afloramientos son de origen volcánico.

La topografía del Iztaccíhuatl es resultado de la superposición de corrientes de lava andesítica y flujos viscosos con tendencia acumulativa, cortados por una erosión glacial y vigorosa. El Popocatepetl está constituido por andesitas formadas en el Mioceno y por basaltos andesíticos con intercalaciones clásticas y piroclásticas formadas en el Plioceno. En Zoquiapan predomina la andesita iztaccíhuatl, siendo los materiales más jóvenes del área el talud y conos aluviales.

De acuerdo con la SEDUE (citado por Vargas, 1997) el volcán Iztaccíhuatl debido a las varias erupciones a las que estuvo sujeto, dió como resultado la superposición de corrientes de lava, siendo un poco más antiguo el Popocatepetl, el cual se formó sobre los restos del volcán Nexpayantla destruido primeramente por la erosión, y posteriormente por el surgimiento del nuevo cono.

Rzedowski (1969), señala que la existencia del bosque mesófilo de montaña está confinado a abruptas laderas de cañadas en los declives inferiores del Iztaccíhuatl cerca de Amecameca entre los 2500 y los 2800 msnm, a consecuencia del microclima en las laderas protegidas de cañadas profundas, donde la incidencia de la luz y el viento se halla notablemente disminuida, lo que a su vez reduce la intensidad de la transpiración y proporciona a las plantas condiciones hídricas más favorables que las prevalecientes fuera de la cañada.

Anaya (1980), describió que en la parte occidental del Izta, predominan las asociaciones constituidas por el género *Pinus*, que ocupan aproximadamente el 80% del área arbolada, en ocasiones puro o mezclas. En la base de la montaña se encuentran diversas asociaciones del género *Quercus*, su distribución altitudinal varía de los 2400 a 2500, con las siguientes especies: *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Q. peduncularis*, *Q. reticulata*, *Q. crassipes* y *Q. frutex*. Existen asociaciones de *Pinus leiophylla*, en combinación con *Quercus*, aproximadamente a 2600 msnm, además reporta asociaciones de *Pinus montezumae* con *Pinus pseudostrobus* o *Pinus hartwegii* a partir de los 2700 msnm. Las asociaciones de *Abies religiosa*, se localizan principalmente en las cañadas, barracas y partes bajas de las laderas, entre 3000 y 3500 msnm y ocupa los lugares más húmedos, abrigados o protegidos. En cambio las asociaciones de *Pinus hartwegii*, es la especie que se encuentra a mayores altitudes, desde aproximadamente 3000 m hasta 4000 m o un poco más.

El material parental de los suelos de la Sierra Nevada, son cenizas volcánicas y piedra pómez (tetras), lo que ejerce un efecto sobre el desarrollo de los Andisoles, que son abundantes en la región. La formación depende de la edad del material parental, de las propiedades de las tetras y el clima (Werner, 1978, citado por Domínguez y Olivares, 1997).

Estudios anteriores, describen que en la zona con jurisdicción del Estado de México, desde Tlamacas hasta San Pedro Nexapa, en el páramo de altura, el suelo es de cenizas volcánicas y pómez, color negro, textura arenosa, friable y fácilmente arrastrable. En el bosque de pino, el suelo es de color negro, textura arenosa y migajón arenoso, en cambio, en el bosque de oyamel el color del suelo varía de gris a café, con texturas migajón arenoso y arena migajosa. En cambio en la parte del Estado de Puebla, de Paso de Cortés hasta San Nicolás de los Ranchos, los suelos presentan un proceso de andosolización y son jóvenes con acumulación reciente de cenizas. Finalmente en la parte de Morelos, los suelos son derivados de cenizas volcánicas, existen presencia de alófono, aloisita, caolinita, gibsita y cristo-balita.

En el declive occidental del Iztaccíhuatl, desde el cerro Tlacachelo hasta el poblado de San Rafael, se encuentran suelos derivados de cenizas volcánicas y rocas andesíticas, presentan horizontes orgánicos superficiales y minerales; texturas franca y franca limosa. También existen otras unidades de suelo, que se dividen en Regosoles, las cuales se identifican como el material suelto que cubre al material parental, tanto éutricos como dístricos, asociados con suelo de Litosol en la parte alta del volcán, en la parte media con Andisoles, Litosoles y Cambisoles. También predominan los Cambisoles, principalmente éutricos y se distribuyen en la parte media. Los Litosoles se

distribuyen en la parte alta del Iztaccíhuatl y en la parte media asociado con Regosoles, también se encuentran hacia el pedregal de Río Frío, pero asociado a Regosoles (Quiroz, 1994).

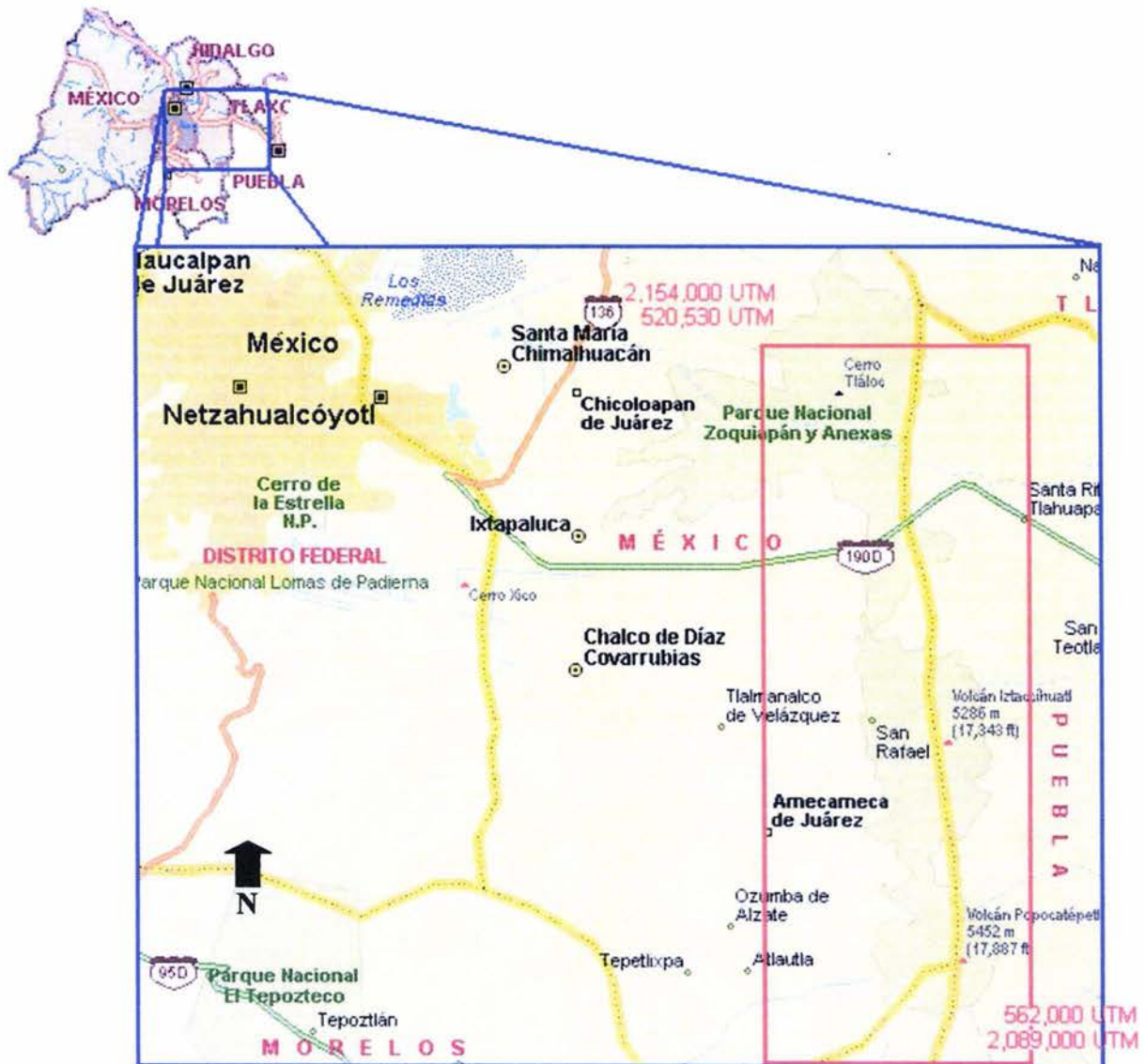


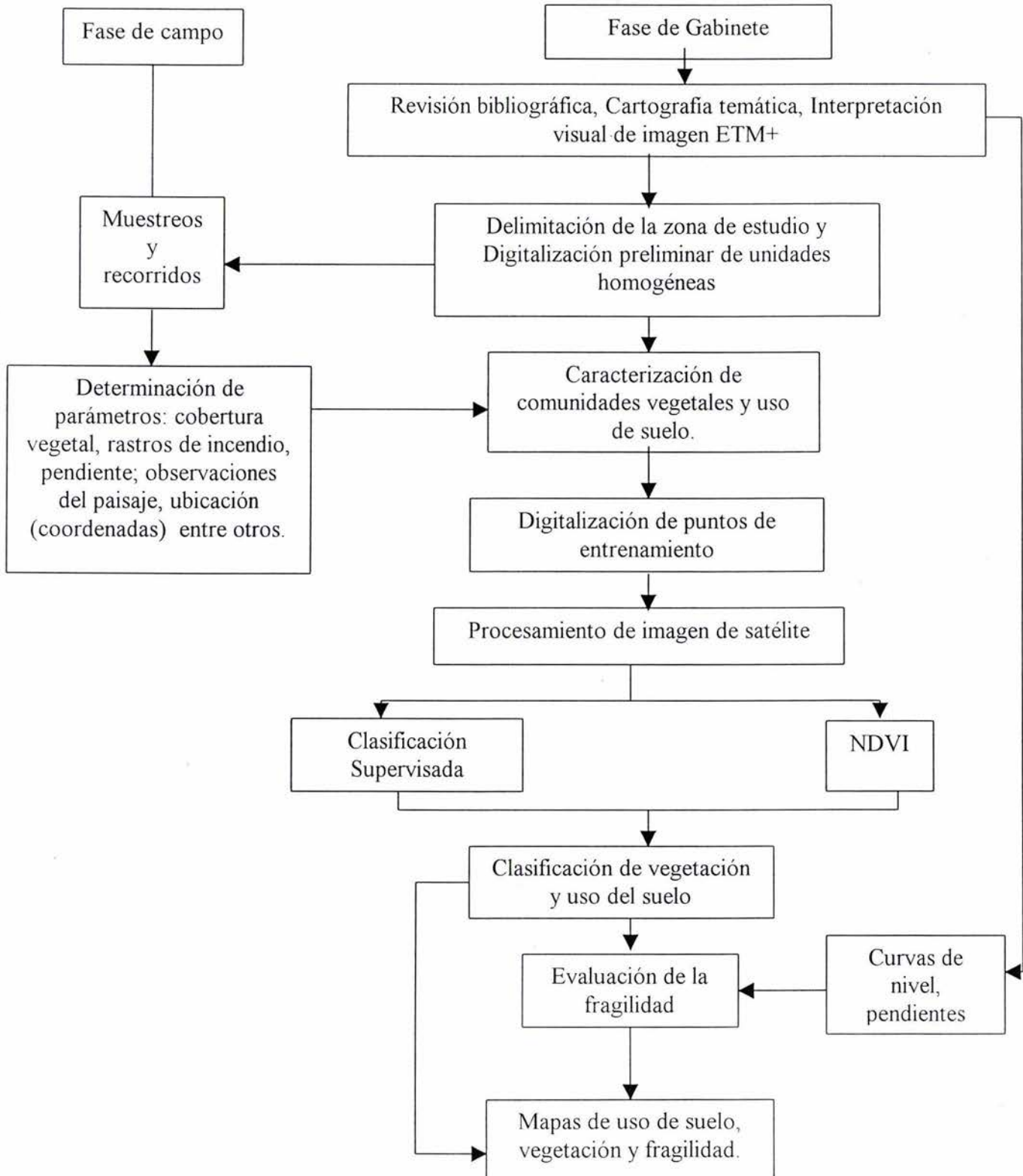
Figura 7. Localización del área de estudio.

Políticamente la región incluye a 18 Municipios, pero se encuentra bajo la jurisdicción de 3 estados: Puebla (Tlahuapan, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco); México (Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo) y Morelos (Tetela del Volcán).

El área específica de trabajo está comprendida desde la cota altitudinal de los 2500 msnm y hasta el límite de la vegetación arbórea (alrededor de los 4,000), delimitándose por las coordenadas 520,530 UTM E; 2,154,000 UTM N y 562,000 UTM E; 2,089,000 UTM N (Figura 7). De acuerdo con la clasificación de INEGI, la zona de estudio está representada dentro de las cartas topográficas E14B21, E14B22, E14B31, E14B32, E14B41, E14B42, E14B51 y E14B52.

8. MATERIALES Y MÉTODO

8.1 DIAGRAMA DE FLUJO



8.2 FASE DE CAMPO.

Vegetación

Los sitios muestreados fueron representativos de las unidades homogéneas delimitadas previamente en la imagen de satélite. En cada muestreo se determinó la composición de especies mediante claves (Cox, 1976; Rzedowski, 2001), la descripción de la condición de la vegetación se realizó a partir del daño en el arbolado, regeneración natural, incendio y retención de copa, de acuerdo a la metodología de Olvera *et al.*, (1996) y SAGAR (1990).

Suelo

En los sitios muestreados se hicieron registros de la pendiente (con clisímetro), erosión, la forma del terreno o posición fisiográfica, (Olvera, *et al.* 1996). Se retoma para la zona, las consideraciones de Azuara y Bello (2003), para la zona de estudio.

Es importante para esta fase del trabajo la adecuación de la información de INEGI, en especial de la carta edafológica que se utiliza para los procesos de diferenciación de los tipos de suelo que se encuentran en la zona de estudio, y la fragilidad de éstos, dicho material se encuentra a una escala original de 1:1,000,000 y abarca más del doble de la extensión requerida.

8.3 FASE DE GABINETE

Se delimitarán comunidades homogéneas en una imagen del satélite Landsat Thematic Mapper+, correspondiente a la zona de estudio (path-row 26-47), para reconocer facetas en función de la cobertura forestal, la textura y el color de la imagen, esta delimitación es de carácter visual.

Preparación de la Imagen.

La imagen Landsat ETM+, fue corregida geográficamente, ya que la proyección original del material, es WGS84 con Spherioide en WGS84 y la cartografía que genera el INEGI, se encuentra en proyección UTM con Spherioide Clark 1866 y Datum Nad27, es necesario realizar este proceso para la compatibilidad del material. Cabe aclarar que por decreto, se utiliza el Datum Itrf92, creado para la zona geográfica en donde se encuentra nuestro país y algunos de los materiales más actuales de INEGI se encuentra en este formato. Para este proceso se utilizó el programa Erdas Imagine 8.4, así como las metodologías de Schowengerdt (2002), y Carranza *et al.*, (2003).

A la imagen corregida geográficamente, no se realizó ninguna otra corrección radiométrica, topográfica ni espectral de la imagen, en acuerdo con los planteamientos de Schowengerdt (2002), Carranza *et al.*, (2003) y Chuvieco (2002), quienes argumentan que al modificar estos aspectos se afecta de manera significativa a la información de interés.

Índice de vegetación (NDVI)

Se utilizó el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para evaluar el vigor de las comunidades muestreadas. Este proceso fue generado en el programa Idrisi, utilizando el módulo VEGINDEX a partir de las bandas 3 (rojo) y 4 (infrarrojo cercano).

Posteriormente la imagen obtenida se exporta a un formato compatible con el programa Arc View para la delimitación de áreas homogéneas, dichas áreas se analizaron con respecto a los valores generados por el índice, diferenciando grupos de máximos valores, mínimos e intermedios; éstos grupos también fueron definidos de acuerdo con la composición de la proporción de los valores en ellos.

Clasificación de la Vegetación y uso de suelo.

La información de los puntos de muestreo, así como de los puntos de referencia se clasificó de acuerdo con el tipo de vegetación (con base en la composición de la comunidad) y uso de suelo además de ser relacionada con la distancia promedio entre árboles, estas categorías se emplearon después para la digitalización de los puntos de muestreo.

Fase de entrenamiento.

A partir de las categorías anteriores y de la comparación espacial de los colores y patrones de los píxeles, se digitalizaron áreas de entrenamiento con base en las georeferencias de los sitios registrados. Los sitios de entrenamiento se digitalizaron en Idrisi 32, como se observa en la Figura 8, a partir de la misma imagen compuesta utilizada para la comparación visual y considerando un área mínima de aproximadamente 200 metros de radio. Ésta aproximación es variable, ya que los patrones se extendían en áreas mayores, y por extrapolación se integraban al punto. Por lo menos cada registro se constituyó como un punto de entrenamiento para esta fase.

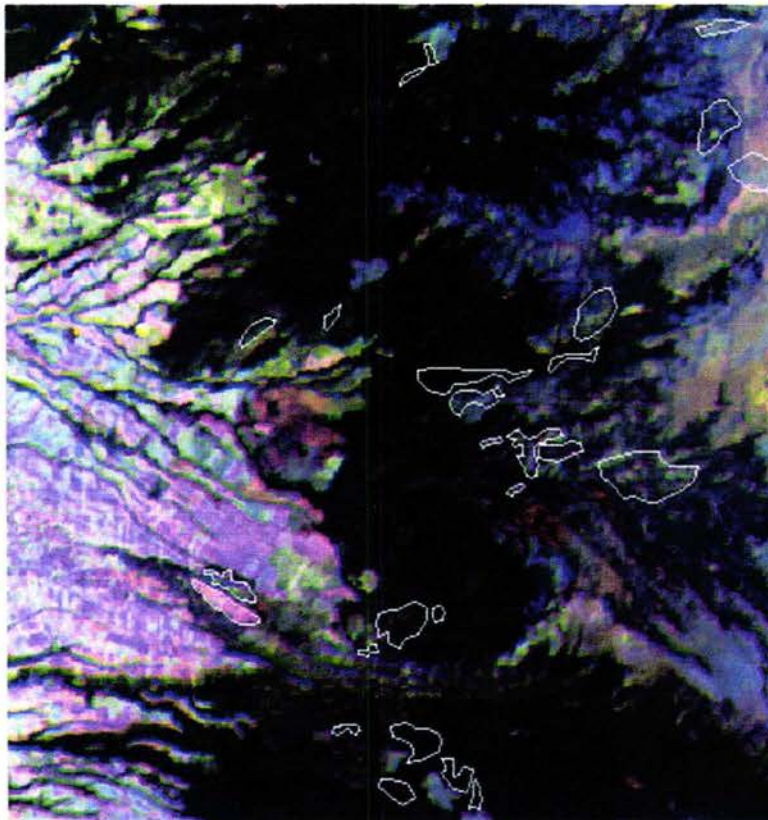


Figura 8. Digitalización de los puntos de entrenamiento sobre la imagen compuesta (bandas 3,5,7).

A partir de los registros recabados en campo, se establecieron áreas homogéneas por interpretación de esta imagen.

Esta información se digitalizó en el programa Idrisi 32 ver. 3, como puntos de entrenamiento para la obtención de las firmas espectrales de cada categoría definida utilizando la imagen de satélite.

A cada categoría le fue asignado un nombre clave, para su manejo posterior; los puntos de registro se compararon en diferentes sitios de la imagen compuesta (357) de forma visual, comparando los píxeles ubicados en las coordenadas geográficas de los puntos registrados. Aquellos registros de la misma composición, que no compartían características similares o presentaban patrones de color completamente diferentes en los píxeles, fueron temporalmente descartados.

Con las firmas espectrales generadas a partir de los puntos de entrenamiento, se realizó un análisis de comparación individual para cada banda espectral del satélite Landsat ETM+. A partir de estas comparaciones se seleccionaron las bandas utilizadas en la clasificación supervisada.

Clasificación de la imagen.

Obtenidas las bandas se realizó la clasificación supervisada. La clasificación de la imagen tiene por objeto relacionar los valores digitales integrados a través de los puntos de entrenamiento y las firmas espectrales con todos los píxeles contenidos en la imagen. En este proceso se utilizó una clasificación de tipo Fuzzy, con un valor asociado Z igual a 2. La clasificación se realizó en Idrisi 32 y el resultado es una imagen ráster para cada una de las firmas, con valores de porcentaje de pertenencia.

Estas imágenes fueron nuevamente procesadas para seleccionar los valores más confiables (95%) para cada firma.

A partir del nuevo ráster, se genera en Arc View una cobertura vectorial para cada ráster; el análisis espacial de cada "categoría". Una vez que se ha terminado el análisis, se integran todas las categorías en una cobertura única y se procede a generar la zona de amortiguamiento para dicha cobertura. Esta zona se ha definido en tres intervalos de 500 m cada uno. Finalmente se obtuvieron los valores de área para cada uso de suelo.

Conversión de formatos.

Las imágenes correspondientes a la selección de las firmas espectrales en un recorte del 95%, tienen un formato ráster, es necesario un proceso de conversión de éstas a información vectorial con tipología de puntos utilizando el software Idrisi 32. Ésta conversión fue necesaria para la compatibilidad de formatos entre los dos software utilizados en esta fase.

Posteriormente procedió la transformaron al formato Grid utilizando el software Arc View 3.2. Este proceso estableció para cada punto en la capa vectorial, un área de 500 m², es decir 70.71 m por lado, con la finalidad de obtener un área significativa para cada punto, asignando así una extensión a las categorías.

Finalmente, éstas imágenes en formato Grid, se transformaron en capas vectoriales para su integración en el sistema de información geográfica (Figura 9).

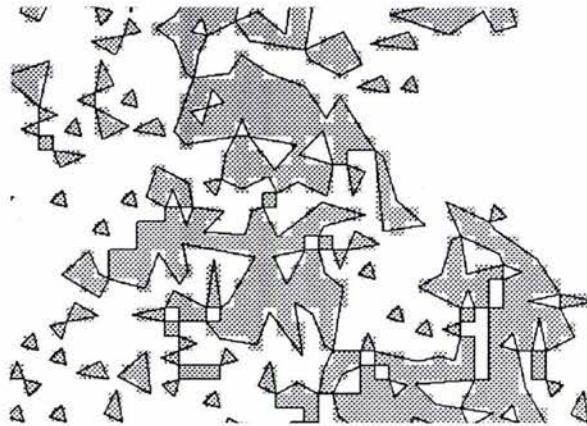


Figura 9. Conversión de formato ráster a vectorial

Fragilidad

Para elaborar el modelo de fragilidad, se utilizó el planteamiento del Ordenamiento General del Territorio (OGT), con base a los árboles de decisión incluidos en el Anexo 6 de dicho documento, así como los planteamientos de Pronatura (Pronatura y CESPEDS, 2002). Los parámetros utilizados para este análisis son: pendientes (modelo de elevación digital y curvas de nivel), tipos de suelo (carta edafológica), así como los tipos de vegetación.

Construcción del modelo.

Pendientes.

A partir de las curvas de nivel, de las ocho cartas de INEGI se generaron las pendientes, mediante una conversión de formatos, y con base en la metodología de Siebe *et al.* (1996), se clasificaron las pendientes de la zona, para facilitar el análisis dichas categorías de pendientes fueron reclasificarlas en tres categorías más generales de la siguiente manera:

Cuadro 2. Fragilidad de pendientes.

Valor de Pendiente (°)	Descripción	Categoría
0 – 5	Casi plana a moderadamente inclinado	I
5 – 15	Fuertemente inclinado a escarpado moderado	II
15 – a más de 20	Escarpado a muy escarpado	III

Vegetación.

Para la categorización de las comunidades de la zona, se aplican los planteamientos del OGT (2000) y Pronatura y CESPEDES (2002), realizando una síntesis de ambos, se obtuvieron las siguientes categorías:

Cuadro 3. Fragilidad de los tipos de Vegetación.

Tipo de Vegetación	Categoría
Bosque de <i>Quercus</i> sp., Bosque de <i>Quercus</i> sp. – <i>Pinus</i> sp.	I
Bosque de <i>Pinus</i> sp., Bosque de <i>Pinus</i> sp. – <i>Quercus</i> sp; matorral submontano.	II
Bosque de <i>Abies religiosa</i> , en comunidades puras, o con combinaciones con <i>Pinus</i> sp. Bosque de <i>A. religiosa</i> – <i>Quercus</i> sp.	III

Suelos.

De la misma manera, los suelos de la zona son evaluados de acuerdo a los planteamientos de OGT y Pronatura (2002), obteniendo cuatro grupos iniciales, éstos basados en la fragilidad, mismos que después son reclasificados para obtener solo tres categorías (Cuadro 4) y con ello simplificar el modelo.

Cuadro 4. Fragilidad para los tipos de suelos.

Tipo de Suelo	Categoría
Feozem hápico	I
Cambisol eutrico, Cambisol vertico, Rendzinas, Litosol y Vertisoles.	II
Gleysol mólico, Gleysol vértico, Andosoles, Solonchak gléyco, Fluvisoles; Regosoles.	III

El planteamiento del modelo de fragilidad se fundamenta en combinaciones de las tres variables anteriores, organizando una matriz como se observa en la cuadro 5.

Cuadro 5. Matriz de fragilidad

Suelos	Vegetación	Pendiente	Fragilidad
1	1	1	Nula
1	1	2	Baja
1	1	3	
2	1	1	
3	1	2	
1	2	1	
2	1	2	Media
3	2	1	
1	3	1	
2	2	1	
1	2	3	
2	3	1	Media – Alta
1	3	2	
3	3	1	
2	2	2	
1	2	2	
2	2	3	Alta
2	3	2	
3	2	2	
3	1	3	
3	3	2	
2	3	3	Alta – Muy alta
3	2	3	Muy alta
3	3	3	

Finalmente, para hacer esta evaluación, se integró un sistema de información geográfica con el Software ArcView ver 3.2, y los materiales generados en las etapas anteriores de la siguiente manera:

1. A partir del modelo digital elevación (ráster) y las curvas de nivel (vector) se obtuvieron las pendientes para la zona de estudio. Este proceso se realizó, convirtiendo los formatos vector a formatos ráster, y a partir de este último, se procesaron las pendientes en grados. Los valores obtenidos fueron reclasificados para ajustarlos al modelo descrito anteriormente.
2. De la carta de edafología se obtuvo la cobertura para la zona de estudio. Estas fueron clasificadas en formato vector, y con base en su clasificación se transformaron a formato Grid.

3. La cobertura de tipos de vegetación se trabajó con los resultados de la integración de la clasificación supervisada y el NDVI, clasificando a cada polígono en una de las tres categorías del modelo. Esta asignación fue realizada en formato vector y después convertida a formato Grid.
4. Se integraron los primeros tres procesos, la asignación se realizó con base en el modelo planteado.
5. La descripción de la zona, se realiza ocupando como mapa de referencia la imagen de satélite 3,5,7. Así como las coberturas de los límites municipales y las curvas de nivel de 2500, 2900, 3500, 3600, 4000.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO Y LA VEGETACIÓN

Se registraron un total de siete géneros de árboles en la zona: *Abies* (25%), *Pinus* (49%), *Quercus* (17%), *Cupressus* sp. (8%), *Alnus* sp., *Arbutus* sp., y *Buddlehia* sp., los tres últimos considerados en la gráfica dentro del bloque "otros", dado que sus valores de área basal fueron relativamente bajos.

Los tres primeros géneros se encontraron en mayor abundancia y diversidad; presentándose las siguientes especies: *Abies religiosa*; *Pinus ayacahuite*, *Pinus hartwegii*, *Pinus montezumae*, *Pinus leiophylla*, *Pinus patula*, *Pinus teocote*; para el género *Quercus*, se determinaron las siguientes especies: *Quercus crassifolia*, *Quercus glabrescens*, *Quercus glaucoides*, *Quercus greggi*, *Quercus laeta*, *Quercus laurina* y *Quercus* sp.

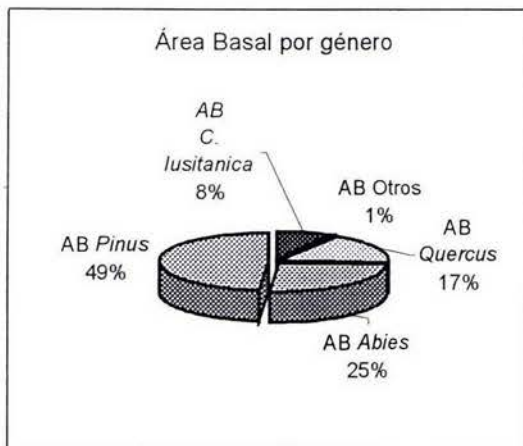


Figura 10. Área basal por género

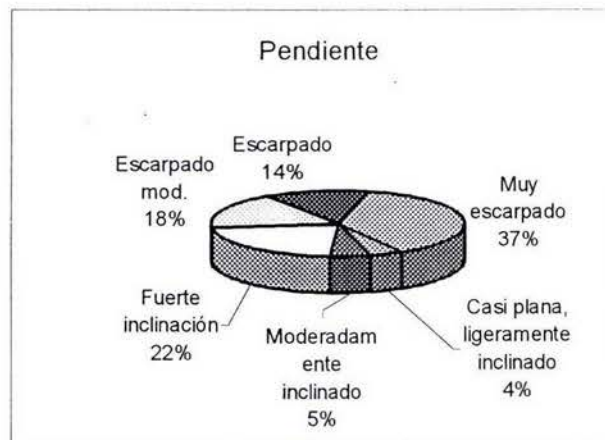


Figura 11. Pendientes

En cuanto a la pendiente del terreno, más del 60% de los sitios se encontraron en lugares con pendientes escarpadas (moderadas y muy escarpadas), 22 % en pendientes fuertemente inclinadas, y 17 % en lugares casi planos, ligeramente inclinados o moderadamente inclinados (Figura 11).

La presencia de incendios en la zona, es mínima; el 63 % de los sitios no tiene presencia de incendio, 27% registraron incendio de ligero a moderado y sólo 10% presenta incendio fuerte o severo.

En cuanto a la regeneración, el 67% de los sitios no presentaron esta característica; en 16% de las comunidades se registró una regeneración de 1 a 2 plántulas por metro cuadrado (p/m^2), 10% registró de 3 a 6 p/m^2 , y sólo 5% presentó de 8 a 15 p/m^2 .

Es importante resaltar que con relación al patrón de retención de copa, solo el 2.7% de las comunidades presentaron menos de 25% de la copa, 25.6% presentaron entre un 25 a 50%, 32.4% de los sitios ostentan entre 50 a 75 % del total de la copa y el 39.1% se distingue por conservar más del 75% y hasta el 100% de la copa (Figura 12).

Con respecto, al daño en la vegetación arbórea, el resultado final es producto de la ponderación de distintas características de la comunidad, en una escala adimensional, los valores son directamente proporcionales al daño, que presentó el sitio registrado. Cerca de 65 % de las comunidades, presentaron sólo perturbaciones menores (hasta 10), el 19% presentaron un daño moderado, y únicamente el 14.5 % de los sitios muestreado presentaron un daño severo (Figura 13).

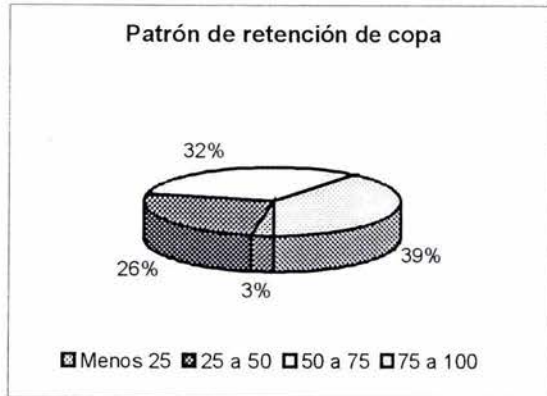


Figura 12. Patrón de retención de copa.



Figura 13. Daño en vegetación.

Los resultados anteriores, nos indican que la condición de las comunidades es en la mayoría de los casos saludable, estas conclusiones son parciales, ya que están cimentadas en resultados muy localizados procedentes de los sitios de muestreo y no son una generalidad para toda el área de estudio.

9.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

9.2.1 Digitalización de sitios de entrenamiento

Los datos recolectados, fueron revisados y ordenados estableciendo 15 categorías para la agrupación de los puntos de entrenamiento, los cuales se realizaron con base en la especie arbórea dominante y la composición de la comunidad registrada (Cuadro 6).

Cuadro 6. Distribución en categorías de los sitios de entrenamiento.

Puntos de entrenamiento	No. De registros	Nombre Clave Firma
<i>Abies religiosa</i>	24	Abies
<i>Pinus hartwegii</i>	27	Phart
<i>P. hartwegii</i> con pastizal	20	Phart-paz
<i>P. ayacahuite</i>	15	Payaca
<i>P. montezumae</i>	14	Pmont
<i>Pinus</i> sp. – <i>Quercus</i> sp.	37	Pique
<i>Pinus</i> sp. – <i>Quercus</i> sp. – Selva baja	10	Piquesel
<i>Pinus</i> sp. – <i>A. religiosa</i>	23	Piab
<i>Quercus</i> sp.	20	Quer
<i>Quercus</i> sp. – <i>A. religiosa</i>	14	Queab
Zacatonal tipo a	10	Zaca
Zacatonal tipo b	10	Zacb
Agroforestales	30	Agf
Cultivo de riego	10	Cr
Cultivo de temporal	20	Ct

Las comunidades de *Abies religiosa* presentaron una coloración de píxeles muy homogénea entre los sitios registrados y solo aquellas donde la cobertura de árboles disminuye drásticamente (10% a 20%) o donde existían indicios de incendio (árboles quemados, muertos, etc) presentaron una variabilidad en el color de los píxeles. En el primer caso (baja cobertura) esta variación se consideró mínima y los registros fueron agrupados en la categoría de Abies. Los registros del segundo caso no fueron considerados para esta etapa del trabajo.

Se realizó la distinción entre *P. montezumae* y *P. ayacahuite* porque a diferencia de *P. teocote*, *P. patula*, y otras especies de este género registradas en la zona, presentaron una número ligeramente superior al mínimo de 10; el resto de las especies que en su mayoría se localizan en bosque mixto, fueron consideradas en las firmas compuestas, como Queab, Pique y Piab.

Sin embargo, al realizar la fase de comparación de píxeles, es notable la distinción de color, tonalidad y patrón entre las especies del género *Pinus sp.* anteriormente mencionadas y *Pinus hartwegii*, por lo cual esta especie se ubicó en una categoría individual. Incluso fue posible percibir diferencias notables entre aquellas comunidades que presentan altas coberturas de pastizal y bajas coberturas de *P. hartwegii*, esta razón justifica la separación en dos grupos: Phart y Phart-paz. La primera corresponde a las comunidades en las cuales la cobertura de árboles es considerablemente mayor a la cobertura de pastizal; la segunda es propia de aquellas comunidades que, a mayor altitud desarrollan una mayor cobertura de pastizales como respuesta al efecto de temperatura, disposición de nutrimentos, etc.

Por el contrario, entre las especies del género *Quercus sp.* registradas, como *Q. crassifolia*, *Q. laeta*, *Q. glabresces*, etc. no fue posible distinguir diferencias de color entre los píxeles de los sitios, ya que éstas presentaron en su mayoría colores y patrones muy similares, es por ello que todos los registros de este género se agruparon como una sola categoría para la realización de los puntos de entrenamiento. Ocurre lo mismo para los registros de comunidades mixtas de *Quercus sp.* – *A. religiosa*, *Quercus sp.* - *Pinus sp.*, por lo cual tampoco se hace referencia a una especie de encino dentro de las categorías respectivas.

En una situación particular se colocaron algunos registros (diez) de la parte sur de la zona de estudio en el Estado de Morelos, en estos lugares se presenta una diversa composición de especies que no corresponden en su totalidad a un clima templado, por lo que son agrupados en una categoría que contempla una comunidad de pino-encino y la presencia de elementos de la selva baja caducifolia: piquesel.

Una evaluación similar a la utilizada en el género *Pinus sp.* se aplicó a los registros de pastizales, que en la interpretación visual, presentaron dos patrones de color, la variación consiste principalmente en un cambio de color de verde seco a un verde amarillento casi anaranjado. Esta variación se considera esta ligada a la composición por lo cual se dividen en dos grupos Zac a (con presencia abundante de *Lupinus sp.*) y Zac b.

Se consideraron en la categoría de agroforestales todos aquellos registros que combinaban cultivos de árboles frutales (ciruela, manzana, pera, durazno, etc), con cultivos de cereales o leguminosas (maíz, frijol, haba, centeno o avena), combinados a su vez con especies arbóreas, como *Quercus sp.* o *Pinus sp.*

Para el caso de la categoría de cultivos, la distinción entre los de riego y de temporal, se realizó a partir del registro de campo, los patrones definidos durante la interpretación visual son importantes.

Las categorías con mayor número de registros son Pique, Phart, Abies, Piab y Agf. El número de registros es una parte importante para realizar este proceso. Es por eso que las comunidades compuestas de *A. Religiosa* y *Cupressus lusitanica* no fueron integradas al análisis, ya que no acumularon por lo menos 10 registros y en adición, los patrones de color entre los píxeles de los datos recabados, fueron muy diferentes.

Tampoco fue posible digitalizar las comunidades de *Cupressus lusitanica*, por la escasa cobertura que presentaron los sitios registrados, además de las razones anteriores.

9.2.2 Análisis comparativo de firmas espectrales.

Para cada una de 12 coberturas definidas, se obtuvo el intervalo de valores espectrales (IEs) de absorción – reflexión (o niveles digitales –ND–) para cada banda, en cada una de las firmas espectrales. En la Figura 10 se observa que a menor IE, existe una mejor relación espacial de los datos. Sin embargo, el traslape de dos o más IE genera incertidumbre en el proceso de clasificación.

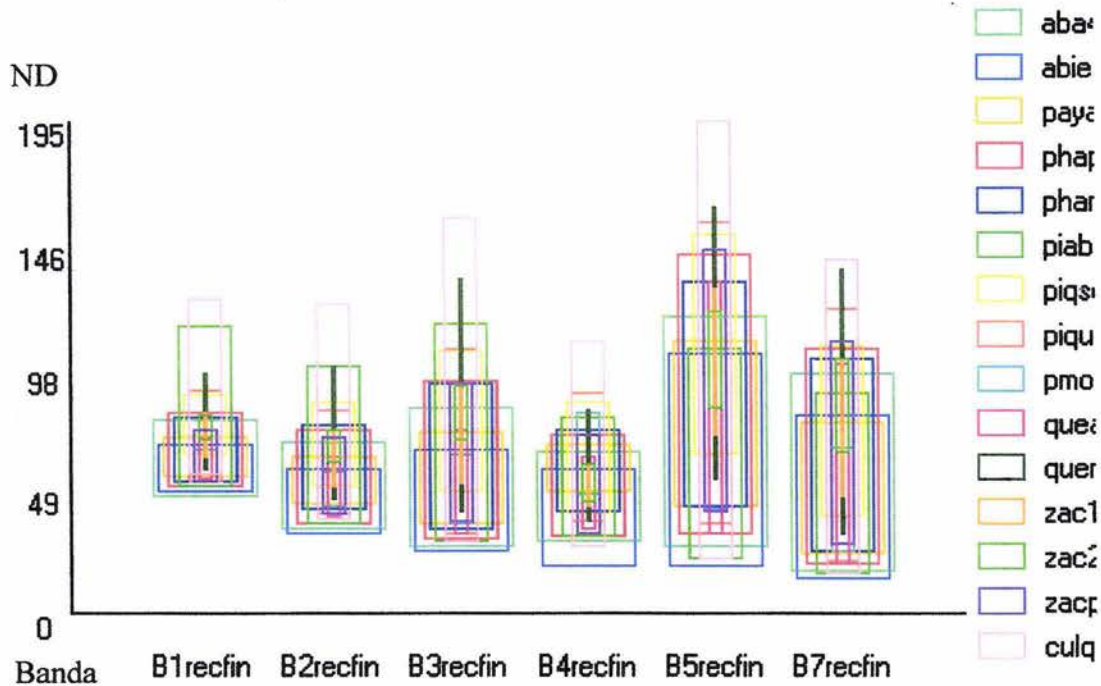


Figura 14. Intervalos espectrales de firmas espectrales en las bandas del Satélite Landsat ETM+.

En la comparación de las firmas con todas las bandas (Figura 14), es posible distinguir traslapes significativos en las bandas 1 y 2 del visible y en la banda 4 del infrarrojo. En las bandas 3, 5 y 7 se presentan IE heterogéneos, con combinaciones de intervalos largos y cortos para las firmas. Se observa especialmente en la banda 5 una separación considerable de los intervalos, tanto en los valores mínimos como en los máximos, separando favorablemente las distintas firmas espectrales, evento que se presenta también en la banda 7. Con base en la interpretación de estas gráficas de firmas espectrales se seleccionaron las bandas 3, 5 y 7 para realizar la clasificación supervisada.

Como un complemento a la información, el análisis de los IE para concretar la clasificación supervisada, proporcionando información relacionada con posibles confusiones de ubicaciones espacial, así como posibles comunidades compuestas.

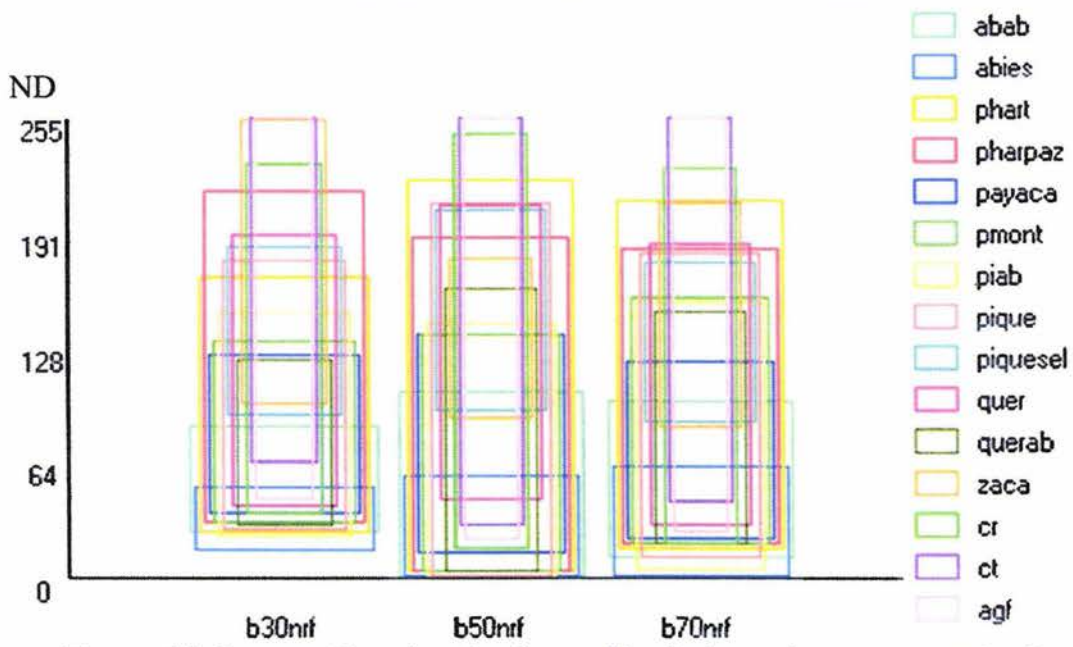


Figura 15. Los rectángulos de dispersión de los valores para cada firma espectral.

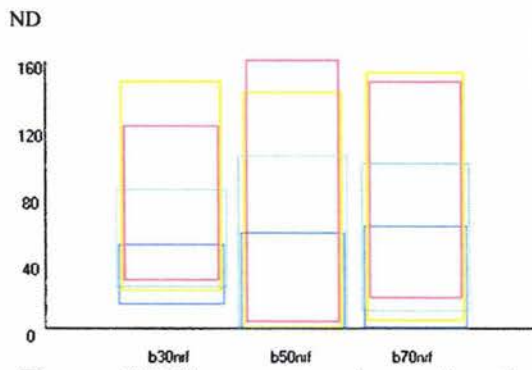


Figura 16. Firmas con elementos de *Abies*

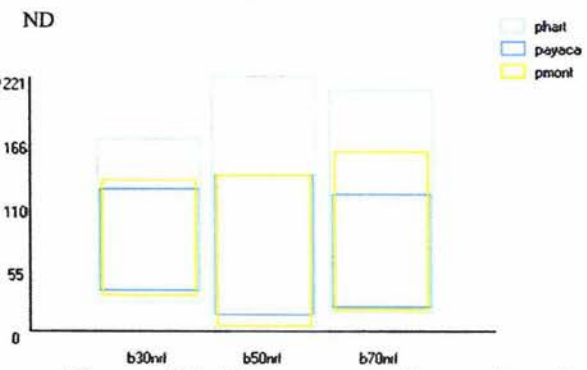


Figura 17. Firmas con elementos de *Pinus*

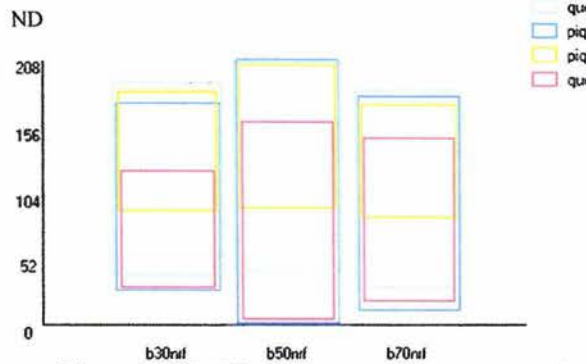


Figura 18. Firmas con elementos de *Quercus*

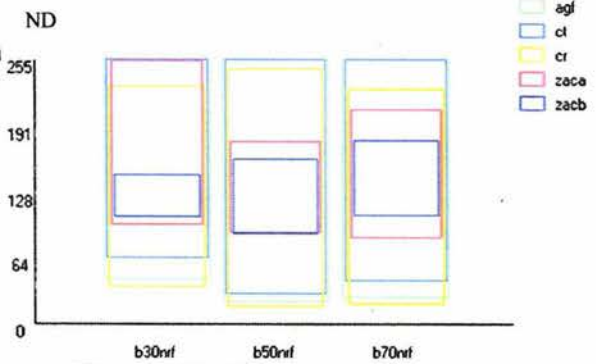


Figura 19. Firmas de zacatonales y cultivos

En la Figura 15 se observa que los IE de las distintas firmas espectrales se presentan desde valores mínimos (cero) a los valores máximos (255). Algunas firmas incluyen casi todo el intervalo de valores, como es el caso de los cultivos de temporal (Ct). También se observa que de manera general *A. religiosa*, se separa claramente del resto de las firmas correspondientes a forestales, esto ocurre en las tres bandas utilizadas para la clasificación (357).

Los IE fueron comparados para aquellas firmas que presentaban elementos de la misma especie, o bien, condiciones ecológicas similares. Separándose en los siguientes cuatro grupos:

a) Firmas con elementos de *Abies religiosa*.

Las firmas espectrales generadas para *Abies religiosa* (Figura 16) presentaron IEs, cortos ubicados entre los valores de 0 a 60 ND en todas las bandas; por otra parte, la firma de Pino-Abies, se traslapa en el intervalo de valores correspondientes a Abies, pero incluye a la vez valores mayores a 80 y hasta 140, en las tres bandas utilizadas (357). Para el caso de Quercus-Abies, el IE tiene valores mínimos cercanos a 40 (con excepción de la banda 5 donde presenta ND cercanos a cero) el límite del intervalo se aprecia entre los 125 y 160 ND

b) Firmas con elementos del género *Pinus sp.*

Para el caso del género *Pinus*, dos de las tres firmas generadas *P. montezumae* y *P. ayacahuite*, son muy similares en el rango de ND, presentando traslapes significativos (posiblemente ocasionados por la similitud entre los sitios de muestreo) como puede observarse en la Figura 17, se observa que *P. ayacahuite* presenta diferencias en sus ND (0-20) con relación a la banda 5, también se aprecia que la banda 7 presenta una mejor separación de los IEs para las tres firmas. La firma para *P. hartwegii*, a diferencia de las dos anteriores, incluye en sus IE valores mayores, extendiéndose hasta los 140 y 221 ND en las tres bandas, aunque alcanza los valores máximos en la banda 5 y 7. La banda 7 resulta ser la más eficaz para separar estas tres firmas como puede observarse en la figura antes citada.

c) Firmas con elementos del género *Quercus sp.*

Las firmas generadas para las comunidades de *Quercus*, *Pino-Quercus*, *Pino-Quercus-Selva baja* y *Quercus-Abies*. En la Figura 18 se observa que existen traslapes entre las firmas de *Quercus* y *Pino-Quercus* en las tres bandas, aproximadamente entre los 50 y 170 ND no obstante, también se presentaron otros pequeños intervalos fuera del rango de traslape con valores distintos, tanto mayores y menores por ej. en la banda 5, *Pino-Quercus* presentó valores de 0 a 208 y *Quercus* de 52 a 208; este pequeño intervalo de 0 a 52 hace la distinción entre ambas firmas.

A la par, la firma para *Quercus-Abies*, que, aunque presentó traslapes con *Pino-Quercus* y con *Quercus* (relacionado con la composición) se ordena en intervalos cortos

(35 a 120) para la banda 3 y un poco más disperso para las bandas 5 y 7 (2 a 160 y 25 a 156), estos intervalos parten de niveles digitales bajos (0-10) que son propios de *Abies*, hasta valores mayores a 100 (representativos de *Quercus* sp.).

En el caso de la firma Pino-encino-selva baja, esta se traslapa con las firmas de *Pino-Quercus* y *Quercus*, esto ocurre aproximadamente entre los 100 y hasta los 180 en las bandas 3 y 7 e incluso hasta los 208 en la banda 5. Aunque los valores se traslapan, se distingue la homogeneidad en los valores de esta firma en las tres bandas utilizadas. Esto último puede reflejar las características de temperatura en la comunidad.

d) Firmas de zacatonales, cultivos y agroforestales.

Este último grupo, presenta comportamientos heterogéneos, que incluyen IE muy reducidos, hasta aquellos que se representan en toda la escala. La Figura 19, muestra el comportamiento de estos.

Primero, los zacatonales presentan comportamientos similares y progresivos, el zacatonal a (zaca) tiene un IE muy corto en la banda 3, que abarca de los 110 a 150 ND aproximadamente, para las banda 5 y 7 este intervalo aumenta cerca de 10 unidades hacia ambos límites. En adición la firma de zacatonal b (Zac b) presenta un IE corto para la banda 5 de 120 a 180 ND y para las bandas 5 y 7 este intervalo se desplaza hasta los 255 y 220 ND. Se distingue el grupo claramente en un intervalo de 100–220 ND, para las tres bandas utilizadas.

Las firmas relacionadas con los cultivos de temporal, cultivos de riego y agroforestales se extienden de manera especial, desde valores mínimos a máximos. Para el caso de cultivo de temporal, el IE se presenta de 80 a 255, en la banda 3 y 7, a diferencia de la banda 5 donde el IE toma valores de 40 a 255. Existe un comportamiento muy similar al anterior para la firma de cultivo de riego, aunque esta, solo se manifiesta hasta los 230 a 245 en las tres bandas, y se separa de las firmas anteriores en los valores mínimos, aunque esta diferencia no es significativa, salvo para la banda 7. La firma agroforestal presentó valores mínimos variables (55, 30, 35), pero en los tres casos el valor máximo es de 255.

Para la separación de estas tres firmas, la banda 5 resulta ser la menos eficiente, ya que presenta el mayor y significativo número de traslapes entre las firmas. Con lo que respecta a las bandas 3 y 7, la existencia de ND diferentes en los intervalos espectrales, propicia la separación de las firmas, se destaca que la banda 7 es la mejor para el trabajo de estas firmas.

9.2.3 Clasificación de la imagen.

Este proceso generó 16 imágenes (ráster), quince corresponden a cada una de las firmas integradas a la clasificación y en la última imagen muestra un análisis de incertidumbre.

A través del análisis de incertidumbre es posible diagnosticar la certeza de los datos clasificados, ya que este muestra en una escala de 0.0 a 1.0 la claridad durante el proceso para clasificar un píxel X en alguna de las 15 categorías; así, la mayor confianza de organización de los píxeles se representa con el valor 1 y la menor en el valor cero. Ésta escala se maneja por medio de una graduación de colores, para facilitar la interpretación visual. Como es posible ver en la Figura 20 los píxeles de color verde intenso, corresponden a la menor incertidumbre de la clasificación, mientras los puntos de color rosa corresponde un valor aproximado de 0.5 y los tonos azul oscuro representan aquellos donde la incertidumbre es mayor, es decir la dificultad es mayor al clasificar dicho píxel.

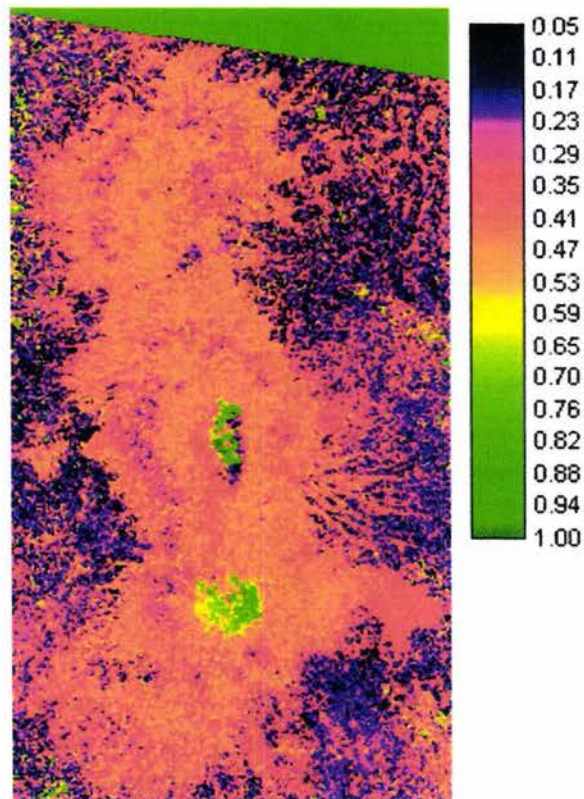


Figura 20. Análisis de incertidumbre

La clasificación Fuzzy generó en cada firma una escala de certidumbre para los píxeles, (similar a la clasificación de incertidumbre, pero con una escala inversa), en la cual el máximo valor de certeza es el 1.0 y la menor es 0.0.

Como puede observarse en las Figuras 21 y 23, cada uno de los píxeles es clasificado de acuerdo a su porcentaje de semejanza con los valores ingresados en las firmas espectrales, en este caso Abies y Ct. Así un solo píxel puede ser 70% semejante a Abies y 30% Piab. Las partes oscuras corresponde a aquellos píxeles que pertenecen a otra firma. Para obtener información confiable, de cada una de estas imágenes se realizó un corte a nivel del 95% de confianza (Figura 22 y 24).

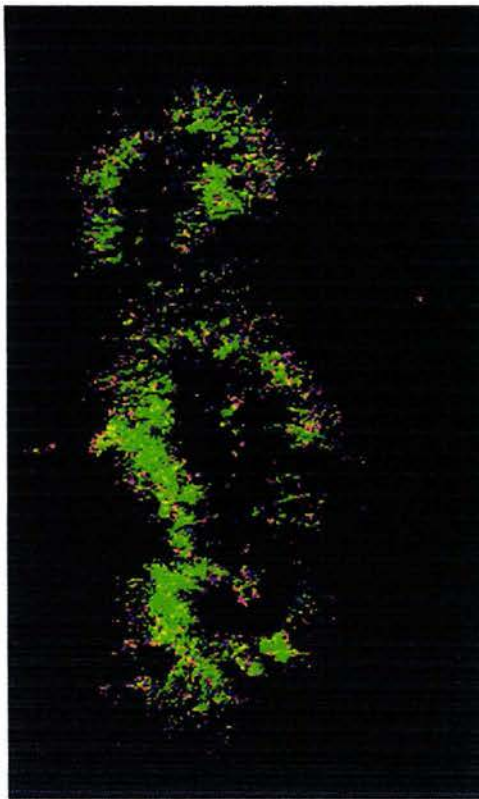


Figura 21. Firma Abies

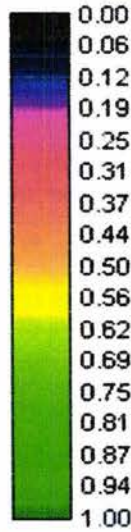


Figura 22. Abies, recorte al 95%

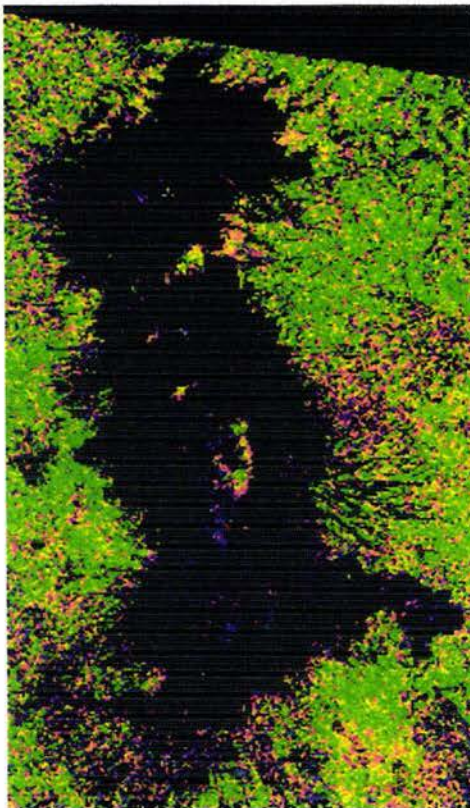


Figura 23. Firma Ct

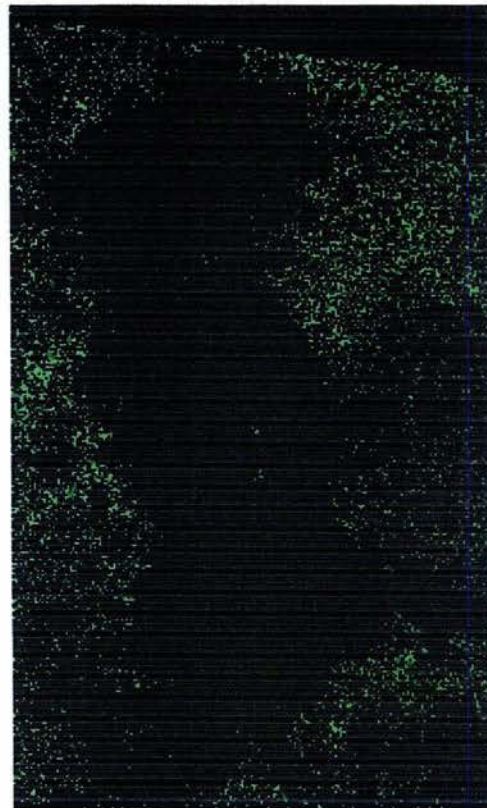
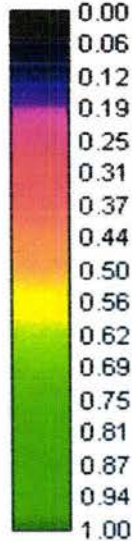


Figura 24. Ct, recorte al 95%

Conversión de formatos.

La transposición realizada a través del módulo Geoprocessig Wizard de Arc View 3.2, entre las diferentes capas. Se vislumbro el traslape existente entre algunas de ellas, principalmente entre aquellas con características de composición similares. Por ejemplo, la cobertura para *Abies* se traslapa con *Queab* y *Piab*, se deduce que dicho traslape corresponde a la transición entre una comunidad uniespecífica de *Abies religiosa* y una comunidad mixta, combinada ya sea con *Pinus sp.* o con *Quercus sp.*

Este tipo de traslapes se reubicaron en la capa mixta y se eliminaron de la capa uniespecífica, sin descuidar la ubicación espacial de estos traslapes. En la cuadro 7, se describe el área total traslapada entre coberturas, así como el número de traslapes que se generan.

9.2.4 Análisis de traslapes y composición.

El producto de la clasificación de la imagen, presenta zonas de traslape (comunidades mixtas) y de transición, por lo cual se procedió a un análisis para localizar los posibles traslapes entre diferentes usos de suelo.

Se construyó el siguiente cuadro con datos de valoración del traslape existente, entre las distintas capas.

Cuadro 7. Extensión de traslapes localizados entre categorías.

Comparación	No. de Traslapes	Extensión (ha.)
<i>Pinus sp., Abies – Quercus sp., Abies</i>	20 756	10378
<i>P. montezumae – P. ayacahuite</i>	18 615	9307.5
<i>P. montezumae – Pinus sp., Quercus sp., Alnus sp.</i>	17 316	8658
<i>Pinus sp., Quercus sp. – P. hartwegii</i>	15 577	7788.5
Cultivos de riego – <i>Quercus sp</i>	11 769	5884.5
<i>Pinus sp, Quercus sp, Alnus sp. – Pinus sp, Quercus sp.</i>	8 864	4432
<i>P. montezumae – Pinus sp., Abies</i>	4 509	2254.5
<i>P. montezumae – Quercus, Abies</i>	3 799	1899.5
<i>P. ayacahuite – Pinus sp, Abies</i>	3 509	1754.5
<i>P. ayacahuite – Quercus sp, Abies</i>	3 490	1745
<i>Pinus sp, Abies – Abies</i>	3 484	1742

<i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp., <i>Alnus</i> sp. – Phart	3 180	1590
<i>P. ayacahuite</i> – <i>P. hartwegii</i>	2 284	1142
Agroforestal – <i>Pinus</i> sp, <i>Quercus</i> sp., selva b.	2 264	1132
Agroforestal – Cultivos de riego	2 201	1100.5
Cultivos de riego – <i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp., selva b.	1 925	962.5
<i>Pinus</i> sp, <i>Quercus</i> sp.– <i>Pinus</i> sp, <i>Abies</i>	1 468	734
<i>P. hartwegii</i> – <i>P. hartwegii</i> , Pastizal	1 154	577
<i>Quercus</i> sp.– <i>Pinus</i> sp, <i>Quercus</i> sp.	1 114	557
Cultivos de riego – <i>Pinus</i> sp., <i>Quercus</i> sp.	1 091	545.5
<i>Quercus</i> sp., <i>Abies</i> – <i>Abies</i>	957	473.5

En algunos casos fue posible agrupar los traslapes de acuerdo a las características ecológicas de los géneros.

Comunidades en hábitats ecológicamente húmedos.

Las comunidades de *Pinus ayacahuite*, *Pinus montezumae* y *Abies religiosa*, se incluyen en este grupo, dado que las tres especies tienen hábitos de humedad, aunque de acuerdo con un análisis espacial coinciden en pocos lugares.

Opuesto a lo anterior, es la distribución de *P. ayacahuite* y *P. montezumae*, los cuales coincidieron en una gran cantidad de sitios, esto se propicia por las características espectrales muy similares (pertenecen al mismo género) sin embargo la extensión del traslape entre ambas especies es de 937.5 ha. distribuidas en toda la extensión de la zona.

Además se evaluaron por separado los traslapes entre los géneros, observando que solo se presentaron 67 ha. de traslape entre las comunidades de *P. montezumae* y *A. religiosa*; mientras *A. religiosa* con *P. ayacahuite* solo coincidieron en 43 ha (Figura 25).

Comunidades de *Quercus* sp.

La similitud de las firmas de las comunidades con elementos de *Quercus*, selva baja y los pastizales de altura, favoreció el traslape entre estos usos de suelo, especialmente en la parte NE del PNIPZ.

Se observaron, además aberraciones en las faldas del Volcán Iztaccíhuatl, donde el género *Quercus* sp. se presenta por arriba de los 3600 msnm. Esto se debe posiblemente a los materiales de formación del suelo en la región e incluso a factores topográficos, como las pendientes. Además de la abundante presencia de especies

arbustivas como *Senecio* sp. y *Lupinus* sp. en la zona, propiciando la confusión de firmas espectrales.

En la parte media oeste del Izta - Popo, se confunden los bosques de encino con agricultura de temporal. En la periferia de Sta. Isabel Chalma, y en la parte Este con las zonas agroforestales de Puebla, sobre todo en aquellas muy cercanas a cañadas, donde por la altitud, los cultivos de temporal, ceden un poco ante el abate de la pendiente; cabe destacar que el área de estas zonas, es relativamente pequeña, menor de 1000 m². Pero un número considerable de estas pequeñas coberturas, se concentran sobre todo en el la región NE del Telapón, donde se agrupan, cercanas a la zona límite entre las áreas agroforestales y los bosques de encino, así como en las regiones de monocultivos cercanas a la autopista México-Puebla

En combinaciones de firmas que se realizaron para identificar las zonas traslapadas entre los Cultivos de temporal y *Quercus* sp., se observó que los traslapes originados, se ubican al sur del parque, y se presentan cercanas a las zonas de degradación de pino-encino y encino principalmente (Figura 26).

Comunidades de *P. hartwegii* y Pastizales de altura.

P. hartwegii con mayor cobertura de pastizal montano, se confunde en las partes bajas con comunidades de *Pinus* sp., que presentan elevada cobertura de herbáceas, si bien la firma fue creada con base en datos que representaban solo *P. hartwegii*, el sensor no tiene la capacidad de discriminar entre los pastizales de montanos y submontanos y los manchones de leguminosas o arbustos, como los géneros *Senecio* sp. y *Lupinus* sp. que se presentan en las tanto en las partes bajas, como altas (Figuras 27 y 28).

Se presenta cierto traslape entre *P. hartwegii* y *Pinus* sp. – *Quercus* sp., posiblemente por las características de la longitud de onda, esto ocurre principalmente en las partes donde la altitud rebasa los 3500 msnm., pero se enfatiza en la zona norte del PN I PZ.

Los traslapes entre *P. hartwegii* y *A. religiosa* son escasos, se localizan principalmente en la parte norte de la zona de estudio, agrupando solo 9 ha. Se encuentran dispersos en la zona del Tlaloc-Telapón y algunos otros en las faldas del volcán Iztaccíhuatl (noreste y noroeste).

Agricultura de temporal, riego y agroforestales

Cultivos de riego

La distribución de este uso de suelo, tiene su principal traslape en las partes altas de pastizal montano, en particular en el área de Paso de Cortés, donde se confunde casi en su totalidad. Esto sucede por la similitud espectral que existe entre los cultivos de riego y los pastizales, a considerar por la fecha de la imagen. Cabe destacar que esta

confusión se presenta por encima de los 4000 msnm., en la zona del Tlálloc-Telapón; mientras en el Iztaccíhuatl y Popocatepetl, se observa desde los 3600 msnm.

Es común que también tienda a confundirse con machones de plantas arbustivas, además de la presencia de gramíneas, como *Lupinus* sp. *Senecio* sp. y *Bacharis* sp.. Dicha confusión se propicia por la similitud en los niveles digitales (ND) que se presentan para esta firma, los cuales son muy similares para las tres bandas utilizadas, en este caso la 3, 5 y 7 a diferencia de la combinación 4, 5 y 7 que se probó con anterioridad.

En la combinación de bandas infrarrojas es más fácil identificar y localizar a las zonas de agricultura de riego, dado que las bandas 457 pertenecen a las longitudes de onda del infrarrojo (cercano, medio y lejano) por lo cual son más sensibles a percibir el calor y la humedad. Es el caso que la agricultura de riego, presenta mayor humedad que la agricultura de temporal y la zona de pastizales (Figura 29).

También se presenta confusión con la firma de selva baja y las correspondientes a cultivos de temporal y de riego. Sin embargo, ésta confusión ocurre principalmente por debajo de los 2900 msnm y se concentra en la parte NO del Tlálloc. Telapón. Aunque también en la parte NE del Iztaccíhuatl, confundiéndose con la zona de agroforestales o bien con la zona de cultivos de temporal que se localizan en esta zona.

Finalmente se localizan en la parte SO del Popocatepetl, a una altitud menor a los 2900 msnm.

Agroforestales

La zona agroforestal se distribuye principalmente hacia la parte Noreste de la zona de estudio, principalmente en la jurisdicción del Edo. de Puebla, mezclándose con zonas de cultivo de riego y temporal (Figura 29).

La firma espectral para uso de suelo agroforestal tiende a confundir partes de pastizal de altura (4000 msnm) cerca del cono volcánico del Iztaccíhuatl, esto puede atribuirse a la presencia de nubosidad en la imagen.

El traslape entre zonas denominadas como agroforestales y cultivos de riego, genera agroforestales de riego, situados principalmente en la zona de Puebla, agrupando cerca de 1100 ha.

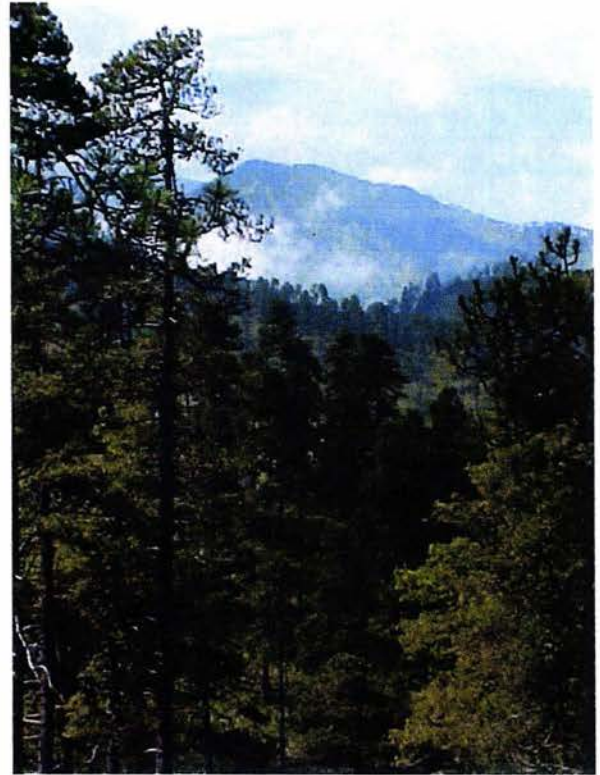


Figura 25. Comunidades ecológicamente húmedas: *A. religiosa* , *P. montezumae* y *P. ayacahuite*.



Figura 26. Comunidades de *Quercus* sp. *Pinus* sp. – *Quercus* sp.



Figura 27. Comunidades de *P. hartwegii* y pastizal de altura.



Figura 28. Comunidades de *Pinus hartwegii*, *Senecio* sp. y pastizal.



Figura 29. Cultivos de temporal y agroforestales.

9.3 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

Se obtuvieron valores de 0.64 (máximo) y -0.64 (valor mínimo), descritos a través de una escala de color, donde el valor máximo (0.64) está representado por colores verdes oscuros, los valores cercanos a 0.0 se representan por tonos amarillo-rojizos, por último aquellos valores próximos a -0.64 se manifiestan por tonos de azul marino. La escala de colores puede observarse en la Figura 30. Cada uno de los píxeles tiene un valor específico en la escala antes mencionada.

Como resultado de la interpretación visual, se generaron 88 polígonos, que fueron separados en veintidós categorías, con base a los porcentajes de los valores mínimos y máximos (Figuras 31, 32 y 33) así como de valores complementarios (intervalo complementario) se observan en la cuadro 8.

Cuadro 8. Categorías de NDVI.

Categoría	No. polígonos	Área (km ²)	Perímetro (km)
1	4	326195566.9	328305.3
2	5	205090133.9	366985.6
3	4	531435164.6	780762.8
4	8	473496710.9	516807.7
5	5	141487433.1	185083.1
6	6	246705761.9	294810.3
7	5	395194184.9	642355.0
8	6	277841535.2	311983.5
9	7	176809558.5	561713.8
10	3	155827507.8	338755.9
11	3	47513788.9	151452.1
12	3	248661427.5	442759.9
13	4	106019162.2	242746.8
14	3	180248885.6	270872.2
15	2	30548275.9	74696.6
16	3	59809591.5	121560.8
17	3	54901408.6	139985.9
18	3	37150073.6	65023.5
19	3	33196088.7	74587.4
20	6	44944857.3	139886.4
22	2	97949007.6	163679.4

El grupo de categorías corresponden en orden ascendente al grado de perturbación de las áreas delimitadas, donde el número 1 representa a las áreas con un alto porcentaje

de cultivo de temporal (valores mínimos), mientras que el número 20 representa un mínimo grado de perturbación (valores máximos).

Debido a la complejidad y diferencias en composición, las zonas de *P. hartwegii* presentan un patrón de valores y color, que aunque no tiene compatibilidad con el resto de los valores, se colocó en la categoría 20, sin embargo para propósitos de la observación de los intervalos de valores se enumeró como categoría 21 en la Cuadro 9. Al parecer, en este caso, los valores del NDVI reflejan más la composición y la especie dominante, que el grado de perturbación.

También las zonas correspondientes a los conos volcánicos del Iztaccíhuatl y Popocatepetl, se agruparon en otra clasificación. Estas zonas, presentan en su mayoría los valores más bajos obtenidos en la escala. Una observación interesante es la diferencia que se observa en el índice para ambos cuerpos, lo cual es el reflejo de las diferencias de los materiales que los componen.

Cuadro 9. Intervalos de los valores máximos y mínimos de NDVI.

Categoría	Val. Mínimo	%	Val. Máximo	%	Complemento	%
1	(-0.38 a -0.25)	55	(0.08 a 0.16)	10	(-0.25 a -0.15)	35
2	(-0.33 a -0.22)	50	(-0.1 a 0.18)	10	(-0.25 a -0.15)	40
3	(-0.36 a -0.23)	45	(0.08 a 0.42)	10	(-0.25 a -0.15)	45
4	(-0.32 a -0.22)	60	(0.07 a 0.22)	10	(-0.22 a -0.1)	30
5	(-0.33 a -0.13)	40	(0.15 a -0.05)	20	(-0.20 a 0.02)	40
6	(-0.25 a -0.13)	35	(0.05 a 0.30)	25	(-0.2 a 0.1)	40
7	(-0.28 a -0.16)	20	(0.20 a 0.11)	30	(-0.15 a -0.01)	50
8	(-0.30 a -0.23)	20	(0.60 a 0.25)	45	(-0.20 a 0.20)	35
9	(-0.26 a -0.16)	40	(0.29 a 0.16)	25	(-0.14 a 0.04)	35
10	(-0.21 a -0.11)	10	(0.22 a 0.07)	40	(-0.1 a 0.05)	50
11	(-0.20 a -0.09)	15	(0.13 a 0.29)	25	(-0.03 a 0.12)	60
12	(-0.21 a -0.08)	15	(0.26 a 0.14)	40	(0.13 a -0.05)	45
13	(-0.22 a -0.12)	20	(0.33 a 0.18)	35	(0.22 a 0.1)	45
14	(-0.22 a 0.05)	10	(0.33 a 0.20)	40	(0.19 a 0.08)	50
15	(-0.06 a 0.11)	10	(0.33 a 0.20)	40	(0.20 a 0.03)	50
16	(-0.16 a 0.1)	15	(0.33 a 0.25)	55	(0.22 a 0.12)	30
17	(-0.11 a 0.11)	15	(0.36 a 0.25)	65	(0.22 a 0.12)	20
18	(-0.30 a -0.18)	15	(0.60 a 0.40)	65	(0.39 a 0.14)	20
19	(0.1 a 0.18)	15	(0.40 a 0.25)	70	(0.22 a 0.12)	15
20	(-0.13 a 0.1)	10	(0.40 a 0.25)	80	(0.22 a 0.15)	10
21	(-0.27 a -0.22)	45	(-0.2 a -0.07)	55	0.00	0
22	(-0.40 a -0.32)	55	(-0.25 a 0.06)	10	(-0.25 a -0.30)	35

Es importante resaltar que aunque algunas categorías comparten intervalos de valores mínimos, máximos o complementarios, el tercer factor para la separación de estas es el porcentaje de estos en el área total del polígono.

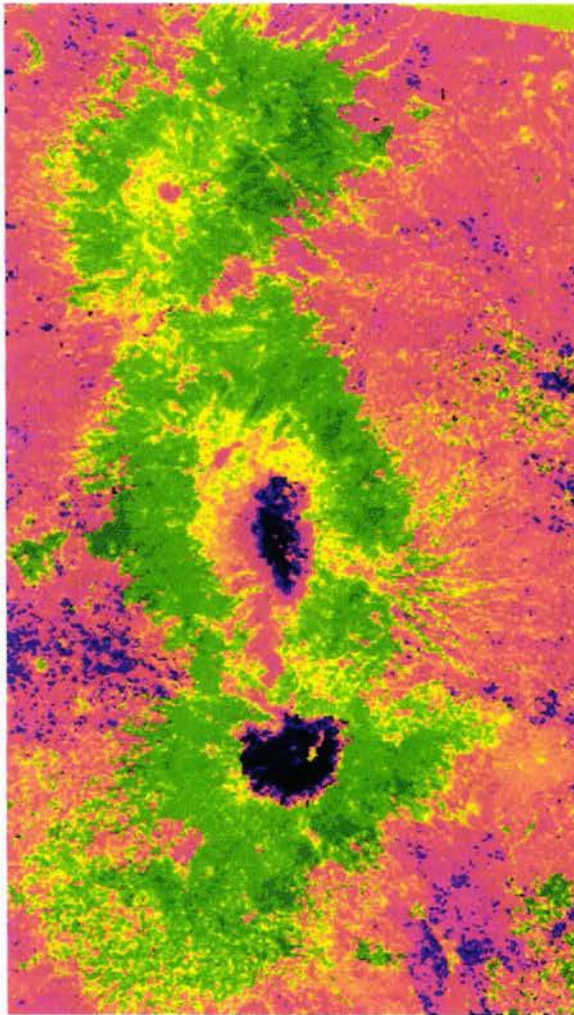


Figura 30. Representación del NDVI

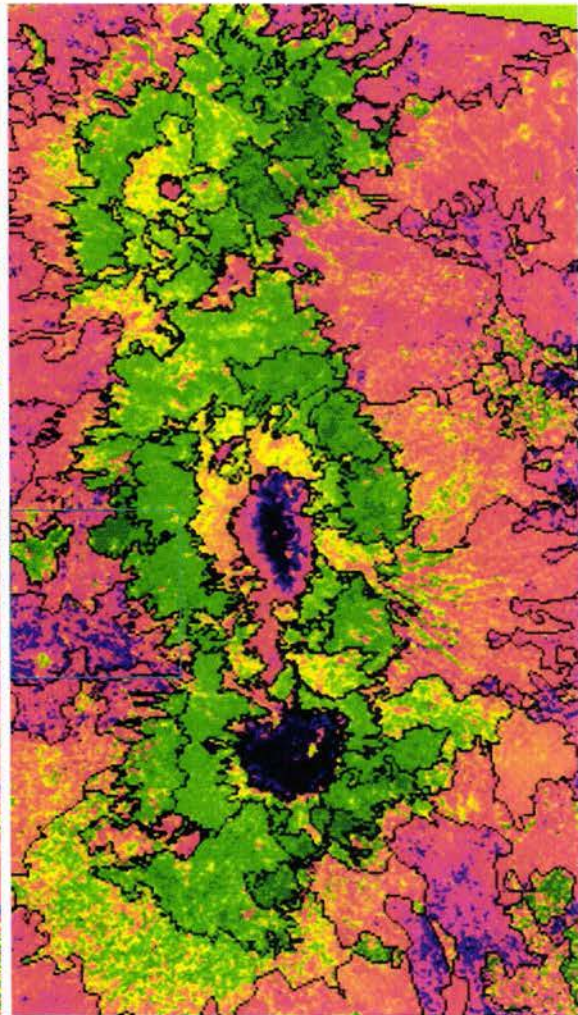


Figura 31. Delimitación de categorías

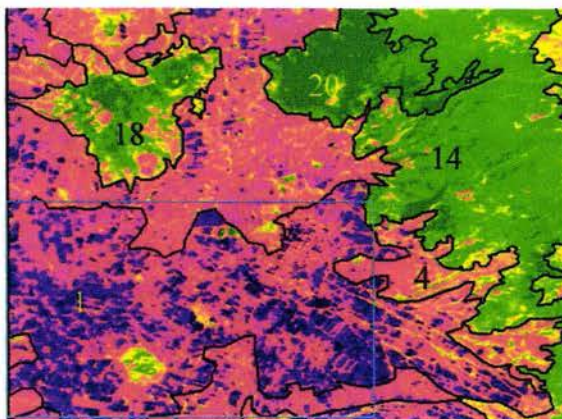


Figura 32. Diferencias entre categorías

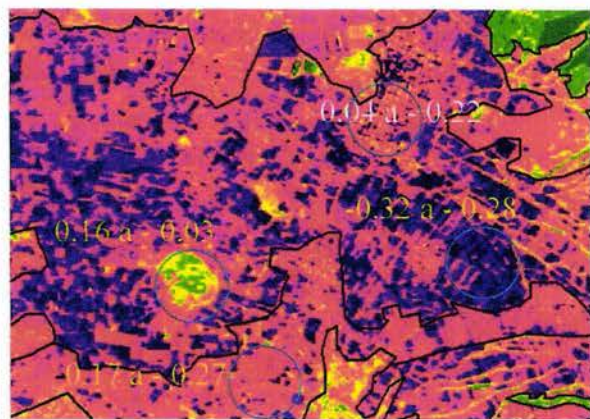


Figura 33. Agrupación de valores

9.3.1 Composición de las categorías.

La correspondencia entre los porcentajes de composición de los intervalos y las categorías se observa en la Figura 29. Se observa que las categorías con menor grado de conservación (categorías 1, 2, 3, 4 5 6), presentan una mínima composición (menos del 10%) de valores máximos y el mayor porcentaje representa a los valores mínimos; los valores complementarios constituyen entre el 35 y 45 %. Los polígonos integrados a estas categorías pertenecen casi en su totalidad a las zonas urbanas y de cultivo de temporal.

La relación de porcentaje es casi equitativa entre las categorías 11, 12, 13, 14 y 15 donde se presenta una reducida presencia de valores mínimos (10 a 20%) mientras los valores intermedios y máximos tienen un porcentaje entre los 30 y 40%. Al otro extremo se ubican las categorías con mayor grado de conservación (categorías 16, 17, 18, 19 y 20), donde el porcentaje de valores mínimos es reducido, mientras los valores máximos representan entre 50 y 80%; los valores complementarios solo representan un mínimo porcentaje. En este nivel, no es posible diferenciar los tipos de vegetación que se presentan en esta categoría.

Las zonas de *P. hartwegii* (en la Figura 34, categoría 21) con composición de pastizal, presentan un comportamiento espectral muy particular, que no pertenece a la escala utilizada para el resto de las categorías. En este caso, se distinguen claramente valores máximos y mínimos con porcentajes casi equitativos, por lo cual no existen valores complementarios, fuera de estos intervalos. Lo más importante es sin embargo, el rango espectral (Cuadro 9) donde solo se presentan valores negativos.

Por último, ambos conos volcánicos (categoría 22) presentan cerca del 50% de valores mínimos, 30% de valores complementarios y solo cerca de 30% de valores máximos, el límite superior solo incorpora al 0.06. Así todo el intervalo de valores (-0.40 a 0.06) presenta casi en su totalidad valores negativos, producto de nula vegetación y los escasos valores positivos correspondiente a las zonas con vegetación de alta montaña.

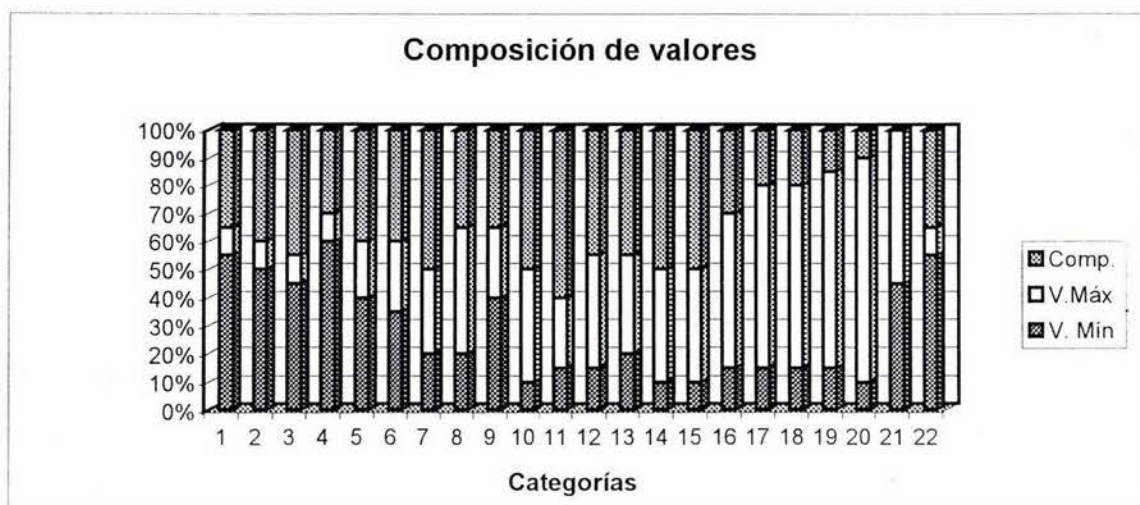


Figura 34. Composición de valores en las categorías de NDVI.

9.3.2 Distribución espacial de las coberturas.

La distribución espacial de las coberturas NDVI con relación a su condición, está ligada a dos factores importantes:

- a) la presencia antropogénica, a través de los cultivos de temporal, riego, etc., así como el desmonte para el cultivo.
- b) La distribución de las especies en conjunción con factores de la topografía.

Con relación al primer factor, se distingue fácilmente que las zonas correspondientes a las categorías 1, 2, 3, 4, evaluadas como degradadas o con presencia de actividades agropecuarias (principalmente el cultivo de temporal) se distribuyen en la parte límite de la zona de estudio, bordeando en aquellos lugares donde las zonas forestales presentan un determinado porcentaje de desmonte, o bien, en presencia de pendientes mayores.

Las categorías 5, 6, 7 y 8 tienen una distribución principalmente al suroeste del Popocatepetl, y al Este del Iztaccíhuatl. Dentro de éstas se ubicaron las zonas de cultivo de riego, así como las comunidades de *Quercus* sp. en asociación con pedregal. Aunque también algunas áreas al noroeste del Tlalóc, presentan esta condición, se encuentra en menor proporción que las anteriormente citadas.

Para las categorías 9, 10, 11 y 12 que representan zonas de transición, entre tipos de vegetación, así como comunidades compuestas, se observó una distribución homogénea en la zona de estudio, básicamente en el contorno de las tres elevaciones principales, con agrupación relevante entre las partes intermedias compartidas por las elevaciones.

La distribución de las categorías con valores considerados como conservados, se encuentra agrupada en cuatro áreas:

1. Al Noreste del Volcán Tlalóc, así como en la zona más elevada de éste.
2. En la parte Oeste del Iztaccíhuatl, cercana a la población de Santa Isabel Chalma.
3. Al Este de la zona, específicamente al Noreste del Iztaccíhuatl.
4. En la parte Sureste del Volcán Popocatepetl.

No se consiguió distinguir la vegetación asociada a estas categorías, además cabe recordar que el resultado de este índice se encuentra relacionado a los contenidos de humedad así como a las condiciones topográficas de la zona, por lo que se consideró pertinente realizar una clasificación híbrida, que se describe en el siguiente punto.

También se observa que las cuatro zonas que presentaron valores relativamente altos de NDVI se encuentran principalmente fuera de la zona de jurisdicción del ANP Izta-Popo ya que presentan una distribución entre los 2500 y 2900 msnm. principalmente.

9.4 INTEGRACIÓN DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA Y NDVI.

Los valores de reflectancia permiten establecer masas forestales densas o ralas que evidencian su estado de conservación. Sin embargo para confirmar esa condición, se integró la clasificación supervisada (CS) y el índice de vegetación (NDVI), generando con ello resultados más confiables.

Los registros obtenidos en campo, en relación con el estado de vegetación, complementan la integración anterior, el resultado es un conjunto de 28 comunidades compuestas, asociadas con una referencia de conservación, que genera una distinción entre comunidades de la misma composición, pero con diferente estado de conservación (Cuadro 10).

Cuadro 10. Extensión de las 28 comunidades integradas a través del CS y NDVI.

COBERTURA	CATEGORIA NDVI	ÁREA (km)	COBERTURA	CATEGORIA NDVI	ÁREA (km)
AGF	6	249040995	Ph	9	43203.8715
AGF_R	8	21798223.6	Ph_PA	9 A 11	11556538.8
AGF_T	4 a 6	81154653.3	Ph_PQA	9 A 11	39358990.9
A	17	4802134.75	Phpaz	9	31604194.9
AP	20	823883.332	Phpaz_PQ	7 A 9	65219709
APQ	14-17	22687635.1	PQ	4 A 7	11590418.2
AQ	14	3992528.34		8 A 20	16297744
Cr	8	85783215.7	PQ_paz	7	8931199.14
CT	1 A 7	25075502.9	PQ_Ph	7 A 11	19089880.2
P	20	323661.213	PQA	4 A 9	19032416.5
PA	9 A 12	12724718.7		13 A 20	64474766.7
	14 A 20	27190720.1	Q	7	35975107.3
PA_Ph	9	1246383.19	QA	10 A 14	3510617.32
PAQ	4 A 10	4085003.45	QAP	16	1339331.09
	14 A 20	67079810.9	QP	4	1143196.55
Paz	10	5348228.48	QPA	18 A 20	14402212.9

La nomenclatura de las comunidades resultantes está definida por la dominancia de su cobertura, así las comunidades de PAQ son diferentes a las comunidades de PQA y a su vez de QAP o QPA.

Se destaca la diferencia entre agroforestales con cultivo de temporal y agroforestales con cultivo de riego, ya que estas condiciones modifican los valores del NDVI, como se observa en la cuadro 9, al comparar los valores unitarios para las categorías, así como los valores de las comunidades compuestas. Algo similar se aplica a las comunidades PQ (*Pinus* sp., *Quercus* sp.) y PQA (*Pinus* sp., *Quercus* sp., y *A. religiosa*).

Las comunidades de la misma composición asignadas a distintas categorías, tienen su justificación en características de la vegetación, así por ejemplo, las 9, 10, 13, 15, 18 de NDVI, pueden distinguirse en algunos casos por la diferencia entre el patrón de retención de copa, así la categoría 9 y 10, presenta un PRC entre 25 y 50 %, mientras que las categorías 13 y 15 esta entre el 50 y 75%, aunque se esperaría que la categorías superiores, presentarán un PRC mayor, sin embargo, esto no se cumple, por las distintas condiciones de perturbación que existen en la zona.

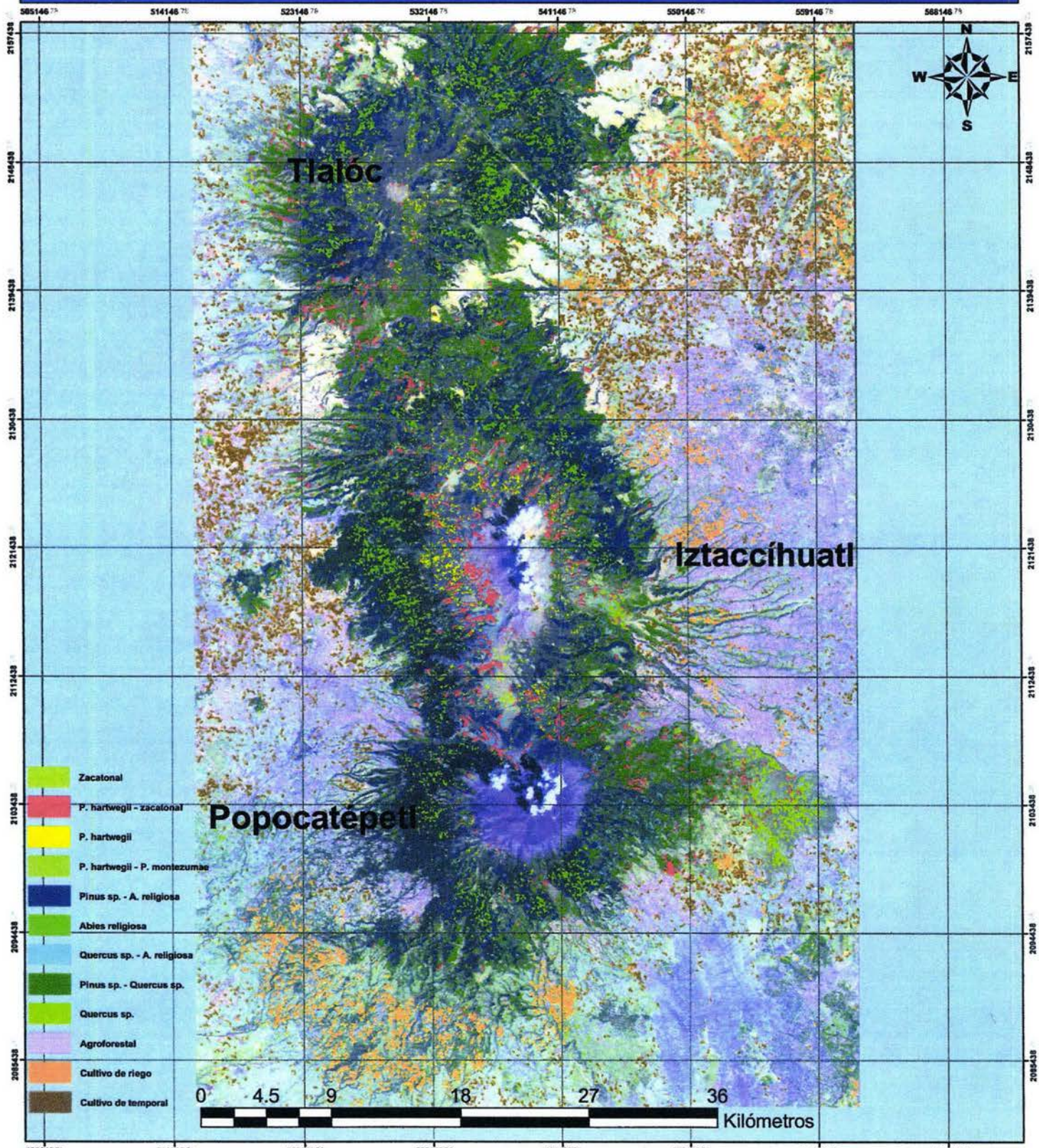
Cabe destacar que en todos los casos existen excepciones, ligadas a condiciones de perturbación, como la cercanía a caminos, preferencias de zonas de campamento, forrajeo, etc.

Finalmente podemos definir 8 usos de suelo y vegetación para la zona, refereridos en la cuadro 11. Se observa que el menos extenso es el categorizado como agroforestal, seguido por el pastizal natural, los cultivos de temporal y los Bosques de Oyamel, en cambio, el Bosque de Encino es el más abundante, así como el de Pino-Encino.

Cuadro 11. Tipos de uso de suelo, dentro del P.N. Izta-Popo.

Uso de suelo y vegetación	Área (km ²)
Agroforestal	351993872
Cultivo de riego	85783215.7
Cultivo de temporal	25075502.9
Bosque de Oyamel	118089397
Bosque de Pino	163285370
Pastizal natural	5348228.48
Bosque de pino-encino	77424185.7
Bosque de encino	53887937.6

Vegetación y uso de suelo en la Región Izta-Popo



FES Zaragoza, UNAM.
Carrera de Biólogo
Laboratorio de Geomática
Blól. M. Beatriz Martínez Rosales
Dr. Eliseo Cantellano de Rosas

Elipsoide.....Clarck 1886
Proyección.....Universal Transversa de Mercator
DatumNAD27
Imagen de Satélite.....Landsat ETM+
Path.....26
Row.....47

9.5 SUELO Y PENDIENTES

Con respecto a los suelos, la carta edafológica generada por INEGI, indica que en la zona, se han registrado la presencia de los siguientes tipos de suelo:

- Vertisol pélico y crómico,
- Regosol eutrítico, dístrico y calcárico
- Litosoles;
- Fluvisol dístrico y éutrítico
- Feozem háplico y calcárico
- Cambisol calcárico, vértico, éutrítico y húmico
- Andosol húmico, ócrico y mólico

La distribución de los tipos de suelos de acuerdo a la carta antes mencionada es la siguiente:

- Vertisoles, sólo en una pequeña parte del municipio de Texcoco, en el extremo Noroeste, al límite de la zona de estudio se presenta este tipo de suelos.
- Regosoles: este tipo de suelos es dominante en la parte central de la zona, en los alrededores de los conos volcánicos, localizándose principalmente hacia el Este y el Oeste, solo en una pequeña parte de la zona sur, se ubican este tipo de suelo.
- Litosoles, las áreas de mayor extensión son esencialmente tres: las proximidades de los conos volcánicos del Iztaccíhuatl y Popocatepetl, así como el malpais ubicado en Tianguismanalco y San Nicolás de los Ranchos. Otras pequeñas extensiones se localizan en Tenango del Aire, Juchitepec, Cocotitlán y Tlalmanalco.
- Fluvisoles, tienen una distribución más homogénea, tanto al Este, Oeste y Sur de la zona (Atlixco, Huejotzingo, Texmelucan, Amecameca y Chalco).
- Feozem: la mayor parte se concentra en el extremo Noroeste (Texcoco e Ixtapaluca), en los límites de la zona de estudio, así como en el extremo Noreste (Nanacamilpa) aunque también se presentan en el extremo Sureste, así como al sur del Popocatepetl (Tochimilco).
- Cambisoles: se presentan abundantemente en la zona norte, rodeando al Tlalóc, así como en la parte intermedia entre éste y el Iztaccíhuatl (Texcoco, Ixtapaluca y Tlahuapan, principalmente).
- Andosoles: se concentran en la parte al suroeste del Volcán Popocatepetl (Tetela, Ocuituco, Ecatingo, Atlautla, Ozumba, Tepetlixpa, Atlatlahucan) y en menor proporción en la parte noreste del Iztaccíhuatl (Nanacamilpa, Tlahuapan, Calpulalpan).

La distribución de los suelos con relación a su fragilidad, puede resumirse en tres apartados:

1ro. Los suelos con alta (3) fragilidad se concentran en la parte central y hacia el sur, cubriendo casi a totalidad la zona de estudio. Con excepción de algunas áreas en el municipio de Tochimilco que presentan otro grado (1 y 2).

2do. Se restringen hacia la parte norte (circundante al Tlalóc) aquellos suelos con categoría 2 de fragilidad, incursionando hacia la parte central a través de una banda en dirección Norte – Sur, además de los conos volcánicos y un área en el municipio de Tianguismanalco.

3ro. Solo se presentan suelos con categorías de fragilidad igual a 1, en los límites de la zona de estudio en los municipios de Texcoco e Ixtapaluca, así como un área considerable en San Martín Texmelucan y San Salvador el Verde (al Este) y Calpulalpan y Nanacamilpa al Noreste.

9.6 FRAGILIDAD EN LA REGIÓN IZTA-POPO.

Descripción general.

La distribución de las categorías de fragilidad en la zona de estudio, se describe a continuación, en orden ascendente y de manera general.

La fragilidad Nula, se localiza principalmente en la parte norte de la zona oeste, porciones menores se localizan al este, en la parte central (Edo. de Puebla) y sólo algunas en la parte sur del Popocatepetl.

En cambio la fragilidad Baja, tiene una distribución casi uniforme alrededor de las elevaciones del Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl, por debajo de los 2500 msnm., aunque cabe destacar que se encuentran más concentradas en la parte central y sur a diferencia de la parte norte, en especial entre los 2500 a 2900 msnm. Es evidente la saturación de al Este y Oeste de Paso de Cortés.

Las zonas que presentan fragilidad Media se concentran en la parte norte, son muy evidentes en las partes bajas entre el Telapón y el Iztaccíhuatl, sobresale que la mayoría de estas áreas se encuentran en la porción Este de la zona, y de manera general se distribuyen entre los 2500 y 2900 msnm.; solo en tres casos, se presentaron por arriba de los 3600 msnm., al norte rodeando al Telapón, al noroeste del Iztaccíhuatl, y al noroeste del Popocatepetl.

En el caso de la fragilidad Media – Alta, ésta se localiza básicamente al norte de la zona, la concentración evidente en los alrededores del Telapón se encuentra en dos fracciones, entre los 2500 y 2900 msnm., así como por arriba de los 3600 msnm. Solo algunas porciones se aprecian al este y oeste del Iztaccíhuatl entre los 2500 y 2900; puede observarse en la parte sur un conjunto de estas categorías al sur del

Popocatepetl, incluso por debajo de los 2500 msnm., y hasta los 2900 msnm. Solo algunas se encuentran al este de la zona en el mismo intervalo altitudinal.

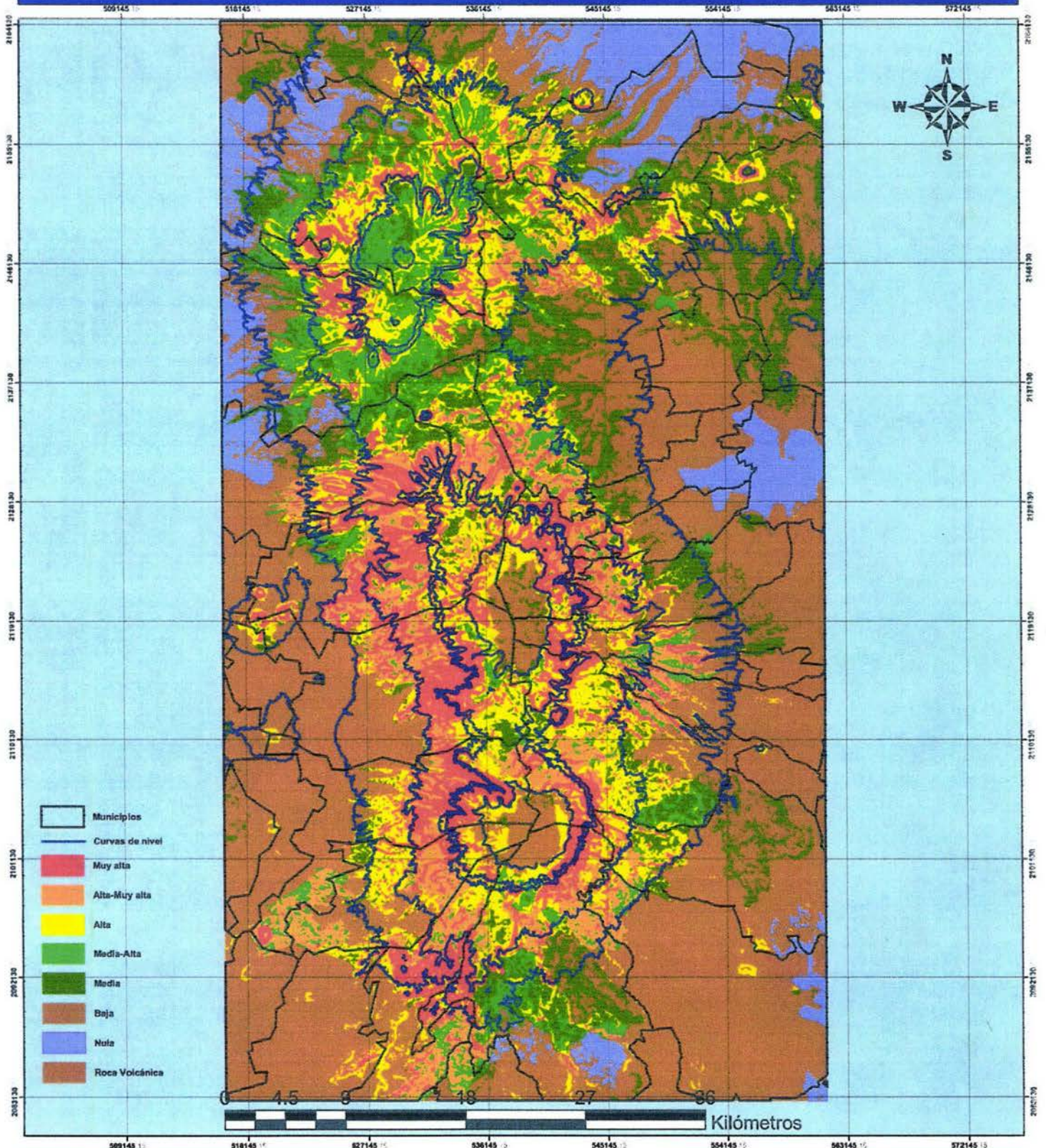
La distribución de las áreas denominadas con fragilidad Alta es un poco más uniforme, por arriba de los 2500 msnm., rodeando a los tres volcanes, sin embargo es notoria la agrupación de estas en la parte norte, en las proximidades del Telapón por arriba de los 2900 msnm. y hasta los 3600 msnm., así como en la parte intermedia entre el Iztaccíhuatl. Se observa una concentrada distribución alrededor del Iztaccíhuatl y Popocatepetl por arriba de los 3500 msnm., en incluso entre ambas elevaciones desde los 2500 msnm. hacia la parte Este; al Oeste del Popocatepetl, es muy marcada la distribución entre los 2500 y 2900 msnm.

Por el contrario, las áreas con fragilidad de Alta – Muy alta, se encuentran distribuidas principalmente alrededor del Iztaccíhuatl y Popocatepetl, de manera notoria hacia la parte Oeste de la zona de estudio, la mayoría de estas se sitúan entre los 2900 y 3500 msnm. y solo algunos casos se ubican por debajo de esta altitud. Se presentan también áreas menores al noreste y suroeste de la zona.

La fragilidad Muy alta, presentó una distribución similar a la categoría anterior, su distribución es muy acentuada en la parte central, en los alrededores del Iztaccíhuatl y Popocatepetl, y aún más evidente hacia parte Oeste de la zona señalada; de forma general se localizan entre los 2500 msnm. y hasta cerca de los 4000 msnm. También se presentan zonas con esta categoría en la parte norte, principalmente entre los 2900 y 3500 msnm., así como algunas zonas más dispersas entre los 2500 y 2900 msnm. En la parte sur del Popocatepetl también se presentan áreas dispersas con esta categoría por debajo de los 2900 y 2500 msnm.

Con base en las explicaciones del anterior análisis, y haciendo hincapié en la destacada distribución de algunas categorías, se determina dividir el área de estudio en tres partes: la primera, en la parte norte referida al Volcán Telapón, en la parte central referida al Volcán Iztaccíhuatl y finalmente la parte sur señalada por el Volcán Popocatepetl.

Fragilidad de la Región Izta-Popo



FES Zaragoza, UNAM.
Carrera de Biólogo
Laboratorio de Geomática
Biól. M. Beatriz Martínez Rosales
Dr. Eiseo Cantellano de Rosas

Elipsoide.....Clark 1886
Proyección.....Universal Transversa de Mercator
DatumNAD27
Imagen de Satélite.....Landsat ETM+
Path.....26
Row.....47

Zona Norte.

La descripción de esta porción de la zona de estudio, comprenderá las fracciones de los municipios de Ixtapaluca, Texcoco, Tepetlaoxtoc, Calpulalpan, Nanacamilpa de Mariano Arista, Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Españita, Santa Rita Tlahuapan (parte norte), San Matías Tlalancaleca e Ixtlacutla de Mariano Matamoros. Cabe destacar que la mención del municipio solo implica la porción de éste que se encuentra dentro del área de estudio, no es una relación de distribución para toda la alcaldía, en el caso particular de los municipios que se encuentran al margen de la zona de estudio.

En esta región es posible distinguir que las zonas con fragilidad nula se localizan por debajo de los 2500 msnm.; en el municipio de Ixtapaluca es evidente una fragilidad Nula, debido a la naturaleza de las pendientes casi planas que han permitido el desarrollo de zonas urbanas y de agricultura. Los municipios de Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Españita, Tlahuapan. San Matías Tlalancaleca e Ixtlacutla de Mariano Matamoros presentan una importante extensión de esta categoría.

Las áreas con fragilidad Baja se identifican entre las partes intermedias entre las cañadas y las elevaciones presentes, generalmente se localizan por debajo de los 2900 msnm., en las partes este y oeste, sin embargo algunas áreas principalmente hacia el norte en el municipio de Texcoco, pueden encontrarse áreas con baja fragilidad por arriba de la altitud señalada, direccionadas por evidentes áreas de cultivo.

A diferencia de las categorías anteriores, las zonas denominadas en una categoría Media, se distribuyen principalmente entre los 2500 y hasta los 2900 msnm. en la zona este, pero en la parte norte se localizan incluso hasta los 3600 msnm. (municipio de Texcoco, Nanacamilpa y Tlahuapan). Esta categoría tiene una presencia significativa en la parte más elevada (3600 a 4000 msnm.) de la zona.

La clase Media-Alta complementa pequeñas zonas que se encuentran entre los 2500 y 2900 msnm., localizadas en las partes medias de las elevaciones, así como los límites de algunas cañadas. La concentración de estas áreas es muy notoria en la zona elevada del Telapón, entre los 3600 y 4000 msnm. Es importante resaltar que entre los 2900 y 3500 msnm., de la parte este y oeste no existe una presencia abundante de esta categoría, pero tiene una importante concentración en el área de la carretera federal México-Puebla (municipios de Ixtapaluca, Tlalmanalco, Chalco y Santa Rita). Solo una pequeña porción de San Matías Tlalancaleca presenta esta categoría de fragilidad.

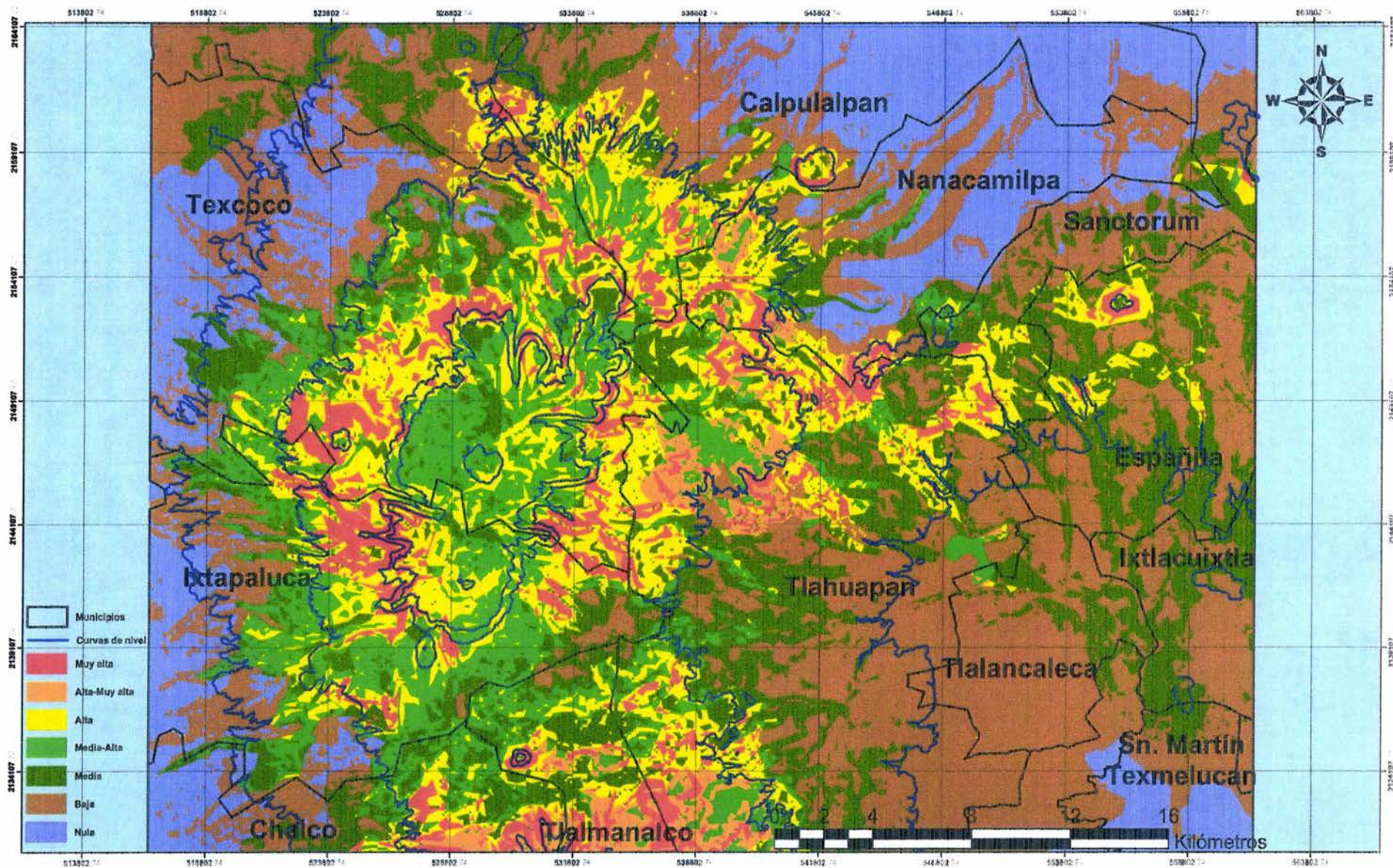
La categoría Alta se concentra principalmente entre los 2900 y 3600 msnm., además se presenta en abundancia en los municipios de Calpulalpan y Nanacamilpa de Mariano Arista, así como en la parte norte de Santa Rita Tlahuapan, en colindancia con los municipios antes mencionados, además de Texcoco. En el municipio de Ixtapaluca esta categoría se presenta entre los 2900 y 3600 msnm. Cabe destacar que las zonas de más alta elevación en el Telapón pertenecen a esta categoría de fragilidad.

A diferencia de las categorías anteriores, la Alta - Muy alta, se encuentra restringida a la zona central de la zona de estudio, de competencia del municipio de Santa Rita

Tlahuapan, entre los 2900 y 3400 msnm.; así como una pequeña extensión en el municipio de Nanacamilpa.

Para esta zona, las áreas de categoría **Muy alta** se presentan entre los 2900 y 3600 msnm., su distribución es ligeramente más abundante hacia el este y oeste, en los municipios de Texcoco e Ixtapaluca, así como entre los 2600 y 2900 en Santa Rita Tlahuapan, principalmente en la parte colindante con Nanacamilpa y en Calpulalpan, en la parte colindante con los cuatro municipios anteriores .

Fragilidad de la Región Izta-Popo (Norte)



FES Zaragoza, UNAM.
Carrera de Biólogo
Laboratorio de Geomática
Biól. M. Beatriz Martínez Rosales
Dr. Eliseo Cantellano de Rosas

Elipsoide.....Clark 1886
Proyección.....Universal Transversa de Mercator
DatumNAD27
Imagen de Satélite.....Landsat ETM+
Path - Row.....26-47

Zona Central.

Esta zona la comprenden los municipios de Chalco, Tlamanalco, Amecameca, Cocotitlán, Ayapango, Tenango del Aire, Juchitepec, San Salvador el Verde, San Martín Texmelucan, San Felipe Teotlalcingo, Chiautzingo, Huejotzingo, Domingo Arenas, Calpan, San Nicolás de los Ranchos (la porción centro norte) y la parte centro sur de Tlahuapan, que colinda con los municipios anteriores.

La categoría Nula se localiza en dos partes, al Oeste, principalmente en el municipio de Chalco, al borde de la zona de estudio y en el límite con el municipio de Ixtapaluca, y al Este en el área de colindancia de los municipios de San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde y San Felipe Teotlalcingo.

A diferencia de lo anterior, la categoría Baja, tiene una distribución muy abundante en toda la zona central, sobre todo en las partes por debajo de 2500 msnm., lo anterior es claro para la parte Oeste, principalmente en el municipio de Tlamanalco; sin embargo, en los municipios de Chalco y Amecameca estas áreas rebasan el límite anterior, ubicándose entre los 2500 y 2900 msnm. En la parte Este, la mayoría se encuentra por debajo de los 2900, y solo algunas áreas en el municipio de Huejotzingo, rebasan dicha altitud.

Las áreas de categoría media, se concentran principalmente en la parte Norte y Este de la zona, en la colindancia de los municipios de Chalco, Tlamanalco y Tlahuapan, en los alrededores de la autopista México-Puebla. En la parte Este, se observa la principal distribución por debajo de los 2900 y 2400 msnm., correspondiente a los municipios de Tlahuapan, San Salvador el Verde, San Felipe Teotlalcingo y Huejotzingo. En el municipio de San Nicolás de los Ranchos, esta categoría se localiza entre los 2900 y 3500 msnm. La presencia de estas áreas en la parte Oeste es menor y muy dispersa, se presentan pequeños conjuntos en el municipio de Tlamanalco entre los 2500 y 2900 msnm. y entre los 3500 y 4000 msnm. En el municipio de Amecameca se observan pequeños áreas por debajo de los 2900 msnm., y entre los 3500 y 4000 msnm., especialmente en las cercanías de Paso de Cortés.

Contrario a las categorías anteriores, la Media – Alta, tiene se concentra hacia el norte de la zona, muy a la par de la clase Media, en la colindancia de los municipios de Chalco, Tlamanalco y Tlahuapan. Al Este la distribución es más homogénea, entre los 2700 a los 3000 msnm. en los municipios de Calpan y Huejotzingo; y entre los 2700 a 3400 msnm. en los municipios de Tlahuapan, San Salvador el Verde, San Felipe Teotlalcingo y Chiautzingo. En cambio en la parte Oeste, éstas áreas son de menor extensión y se encuentran más dispersas, en el municipio de Tlamanalco, y Amecameca se localizan entre los 2500 a 3500 msnm., en este último, se presenta también una pequeña franja cercana a los 4000 msnm.

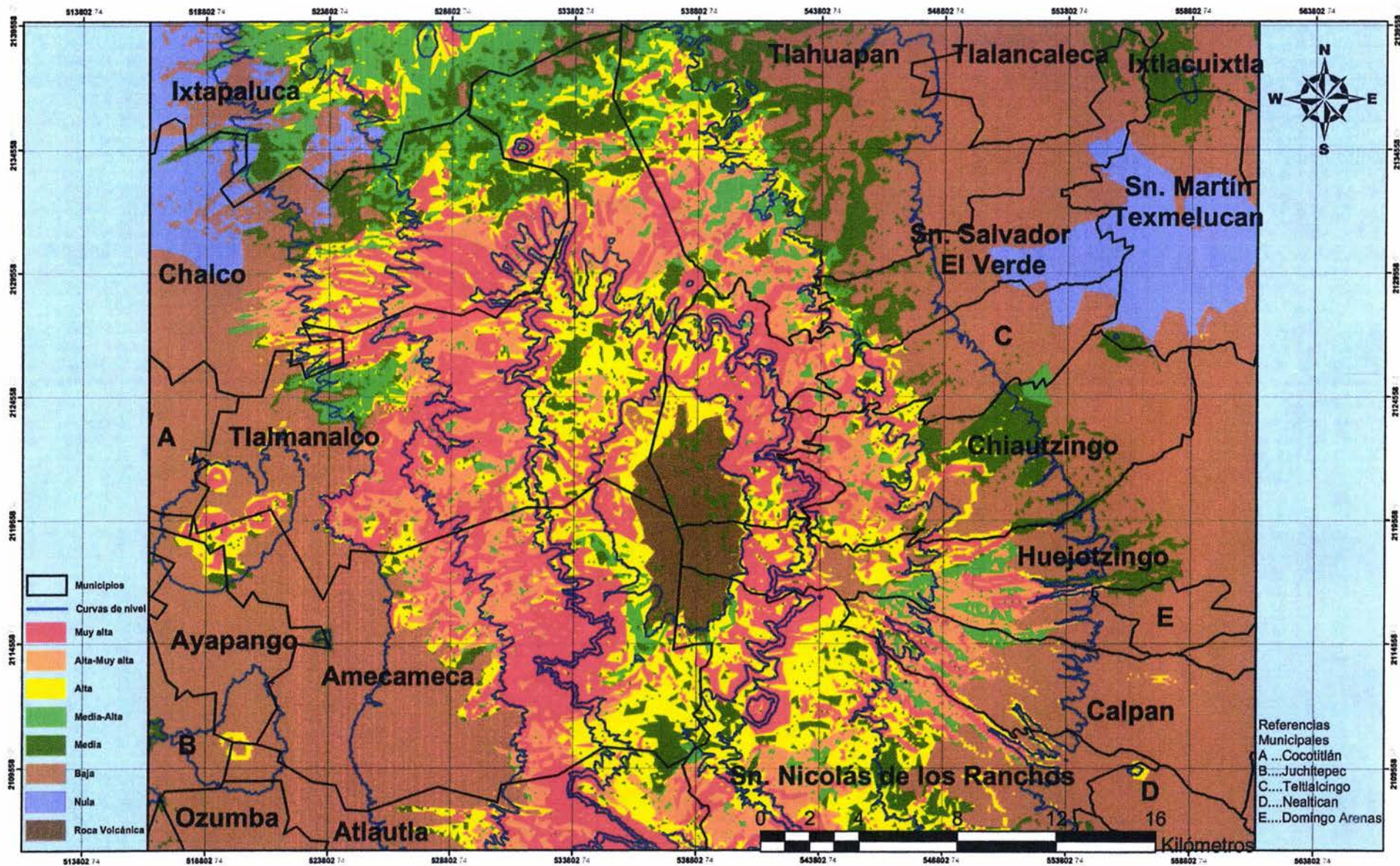
La distribución de la categoría Alta, es principalmente por arriba de los 3200 y hasta los 4000 msnm. en la parte Oeste en los municipios de Tlamanalco y Amecameca; en la colindancia de los municipios de Chalco y Tlamanalco se localiza entre los 2500 y 2900 msnm. Al Este, estas se observan desde los 2700 msnm. en los municipios de San

Nicolás de los Ranchos, Calpan y Huejotzingo. También es notorio, la localización de éstas áreas en la colindancia de los municipios de Chalco, Tlalmanalco y Tlahuapan, por encima de los 2900 msnm., acoplándose con las categorías media y media-alta.

A diferencia de la Zona Norte, aquí se encuentra una distribución abundante de la categoría Alta – Muy alta, concertándose esta en la parte Oeste, por debajo de los 3500 msnm. y hasta los 2700 msnm., principalmente en los municipios de Chalco, Tlalmanalco y Amecameca. Al Este, la principal concentración se localiza en el mismo rango de altitud, en los municipios de Chiautzingo, Tlahuapan y San Salvador el Verde. Se observa presencia de estas áreas en los municipios de Calpan y Huejotzingo entre los 3000 y 2700 msnm., e incluso hasta los 2500 msnm. En el municipio de San Nicolás de los Ranchos se presenta esta categoría, por lo menos para la zona central.

Por último, las áreas relacionadas con Muy alta fragilidad, se presentan especialmente en la parte Oeste, entre los 2500 y hasta los 4000 msnm., concentrándose entre los 2500 y 3500 msnm., lo anterior para los municipios de Chalco, Tlamanalco y Amecameca. En la parte Este, la distribución es menor, concentrándose en los municipios de San Salvador el Verde, Huejotzingo y San Nicolás de los Ranchos. Al norte, en la colindancia entre los municipios de Tlahuapan y Tlalmanalco, se localizan más áreas con esta categoría.

Fragilidad de la Región Izta-Popo (Centro)



FES Zaragoza, UNAM.
 Carrera de Biólogo
 Laboratorio de Geomática
 Biól. M. Beatriz Martínez Rosales
 Dr. Eliseo Cantellano de Rosas

Elipsoide.....Clark 1886
 Proyección.....Universal Transversa de Mercator
 DatumNAD27
 Imagen de Satélite.....Landsat ETM+
 Path - Row.....26-47

Zona Sur.

Se hace referencia para esta zona a los municipios de Atlautla, Tepetlixpa, Ozumba, Yecapixtla, Ecatingo, Ocuituco, Tetela del Volcán, Tochimilco, Atzizihuacan, Atlixco, Tianguismanalco, Nealtican y la parte sur de San Nicolás de los Ranchos.

La categoría Nula ocupa una extensión reducida en los municipios de Atzizihuacan, Tochimilco, Atlixco y Tianguismanalco, al borde la zona de estudio,

Al Este y Oeste, la categoría Baja, cubre casi a totalidad el área por debajo de los 2500 msnm., salvo algunas excepciones, como en la parte sur del Popocatepetl, no presenta esta característica. Los municipios de Ozumba, Yecapixtla y Nealtican, quedan cubiertos casi en su totalidad por esta categoría.

Por el contrario, las áreas de categoría Media, se concentran al Este y Suroeste de esta zona, principalmente en los municipios de Tianguismanalco y San Nicolás de los Ranchos, y Tochimilco respectivamente, lo anterior ocurre entre los 2000 y 2500 msnm. Solo algunas fracciones muy dispersas se localizan al Oeste entre los 2500 y 2900 msnm., en los municipios de Atlautla y Ecatingo.

Muy similar a la distribución anterior, es la distribución de la categoría Media – Alta, que se localiza en tres partes: al Oeste en el límite de los municipios de Atlautla y Ecatingo, entre los 2000 y 2400 msnm.; al Sur, entre los 2000 y 2900 msnm., en la conjunción de los municipios de Tetela del Volcán, Atzizihuacan y principalmente en Tochimilco, en este último incluso se localiza hasta los 4000 msnm. Por último, al Este, entre los 2500 y 2900 msnm., en los municipios de Atlixco y San Nicolás de los Ranchos.

La categoría Alta se distribuye básicamente entre los 2500 y 2900 msnm.; aunque al Oeste, se observan algunas áreas por debajo de los 2200 msnm., en el municipio de Ocuituco y en Ecatingo se observaron área por arriba de los 3500 y hasta los 4000 msnm. Tan la parte Este se presentan incluso 2900 y 3500, principalmente en los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Tianguismanalco y Tochimilco. Al sur se discriminaron zonas con estas características en el municipio de Tochimilco incluso hasta los 4000 msnm.

Nuevamente la categoría Alta –Muy alta se distribuye principalmente al Oeste de la zona descrita. Se distinguen dos fracciones importantes, la primera entre los 2000 y 2400 msnm, en los municipios de Ecatingo y Atlautla; la segunda entre los 2900 y 3500 msnm. Ecatingo y Tetela del Volcán, en este último también se observaron entre los 200 y 2500 msnm. Al Este, se localizan en menor proporción entre los 2500 y 3500 msnm., en Tochimilco y Atlixco. En San Nicolás de los Ranchos se observan áreas con estas características entre los 2900 y 400 msnm.

Finalmente, las áreas de categoría Muy alta se presentan, localizadas en tres conjuntos principales: al Oeste, entre los 2900 y 3500 msnm., principalmente e incluso hasta los 4000 msnm ubicadas en los municipios de Atlautla y Ecatingo; en la parte Este, entre los 3200 y 4000 msnm en la conjunción de los municipios de Tochimilco,

Tianguismanalco y San Nicolás de los Ranchos; por último entre los 2300 y 2900 al sur en los municipios de Tochimilco y Tetela del Volcán.

De manera general para toda el área de estudio, se obtuvo que la categoría con mayor extensión (Cuadro 12) es aquella que representa a la Baja fragilidad, donde se encuentran consideradas las zonas de cultivo de temporal, cultivos de riego, así como las comunidades de *Quercus* sp. localizadas en suelos poco frágiles y con pendientes menores; en la Figura 35.

Cuadro 12. Áreas totales de las categorías de fragilidad.

Categoría	Área (km ²)
Nula	290542404.47
Baja	1553389122.52
Media	449520921.75
Media - alta	266631423.92
Alta	482916735.55
Muy alta	195258485.83

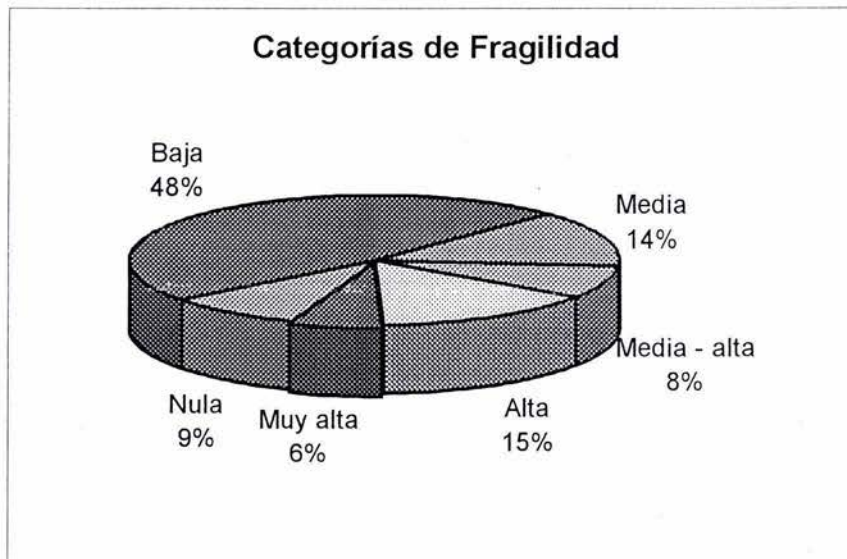
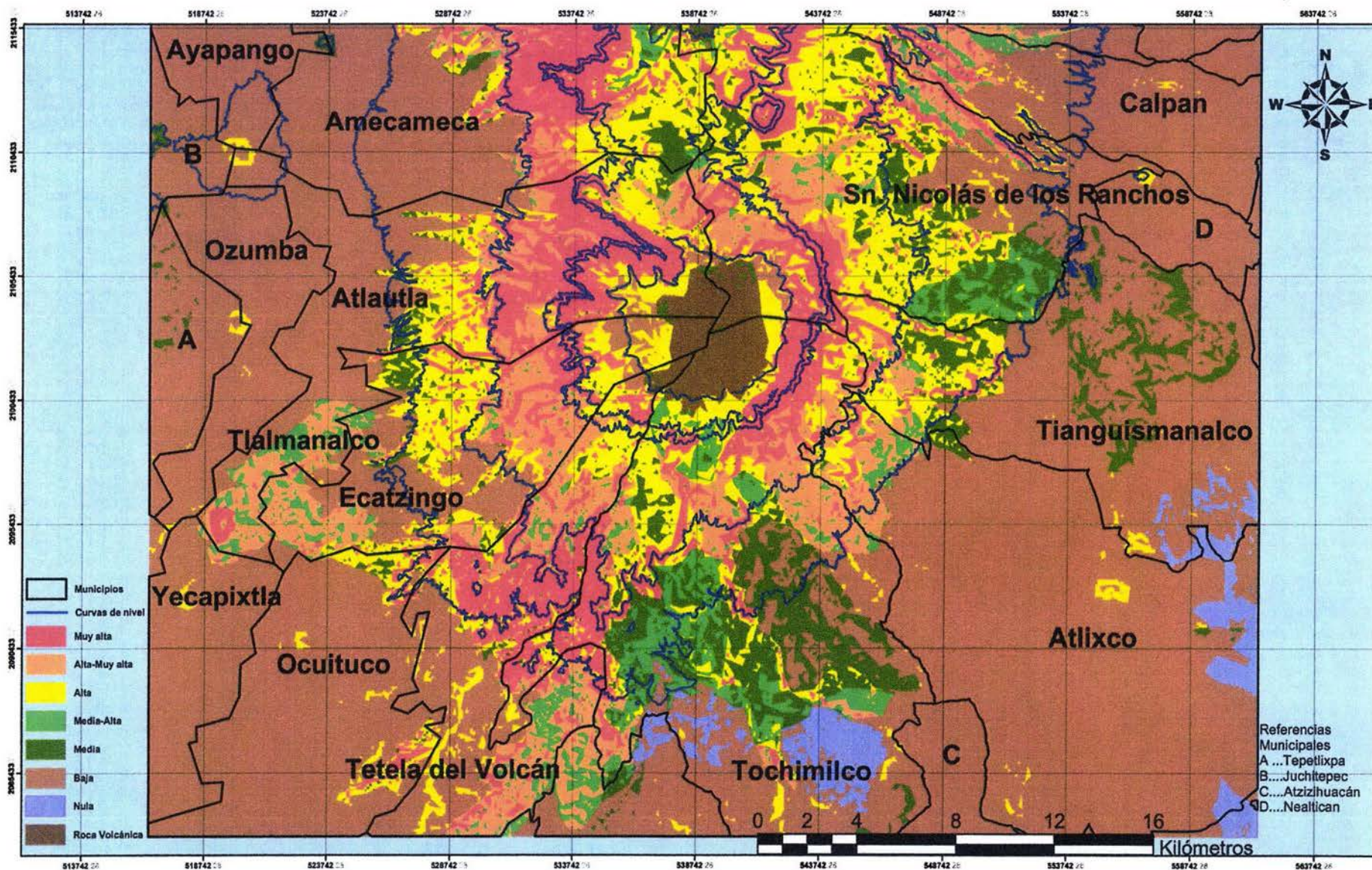


Figura 35. Porcentaje de área de las categorías de fragilidad.

La categoría alta y media, consideran solo el 15% y 14% del área de estudio, en cambio, las categorías media-alta, y nula, solo reúnen entre el 8 y 9% de la superficie total. La categoría con el menor porcentaje es la categoría Muy alta, que solo le corresponde el 6%.

Fragilidad de la Región Izta-Popo (Sur)



FES Zaragoza, UNAM.
 Carrera de Biólogo
 Laboratorio de Geomática
 BÍOL. M. Beatriz Martínez Rosales
 Dr. Eliseo Cantellano de Rosas

Elipsoide.....Clark 1886
 Proyección.....Universal Transversa de Mercator
 DatumNAD27
 Imagen de Satélite.....Landsat ETM+
 Path - Row.....26-47

10. CONCLUSIONES

Se delimitaron ocho tipos de uso de suelo en la región: cultivo de riego, cultivo de temporal, agroforestal, bosque de encino, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de oyamel, pastizal natural. En los cinco últimos no fue posible hacer una distinción entre especies de los diferentes géneros a través de esta metodología.

La clasificación supervisada realizada para la zona, es un método eficiente para la determinación de comunidades vegetales en amplias extensiones, no obstante presenta deficiencias en la diferenciación de las comunidades, a causa de la similitud de las firmas espectrales generadas para los tipos de vegetación.

Con la integración de los procesos de clasificación supervisada e índice de inferencia normalizada de la vegetación (NDVI), se diferenciaron 28 comunidades compuestas con diferentes grados de conservación, pero se sugiere, reducir el número de clases a utilizar, para facilitar el análisis.

El NDVI, tiene una selectividad hacia las comunidades húmedas en el área, por lo que sería necesario a futuro, realizar otros procesos, que permitan disminuir esta confusión en los resultados y diferir entre las comunidades húmedas, los factores topográficos que acentúan esta humedad y el verdadero estado de conservación.

Utilizando el NDVI, se localizaron áreas denominadas como conservadas, que sin embargo se localizan totalmente fuera del límite de jurisdicción del Parque Nacional Izta-Popo.

La fragilidad de los suelos se concentra hacia la parte central de la zona, al igual que las pendientes escarpadas y muy escarpadas, así como la fragilidad más alta de los tipos de vegetación.

Las principales zonas frágiles en el área se localizan en la parte Oeste, con una considerable saturación hacia la parte central, enfatizada por las cañadas de *Abies religiosa* y las pendientes fuertes que presenta esta zona a diferencia de la parte correspondiente al Estado de Puebla, el cual presenta un relieve menos accidentado. Al estar localizadas principalmente entre los 3400 y 2900 msnm, están fuera del área de protección del ANP.

Es importante considerar las categorías de fragilidad en la zona para la implementación de los planes de manejo del ANP, así como de la estructura de los programas de restauración, conservación y recreación que a futuro se implementen en él.

Componentes de la fragilidad.

El relieve se caracteriza por predominancia de cañadas y laderas de pendiente fuerte, lo cual queda evidenciado porque en más del 60 % de los sitios muestreados se encontraron valores mayores a 15°. El uso del suelo y la vegetación fue también variable pero con cierta predominancia de bosque de pino – encino y bosque de encino.

La fragilidad más extendida en la zona fue la baja (48%) y estuvo determinada por pendientes suaves y suelos predominantemente de tipo feozem, regosol y cambisol. El uso del suelo predominante correspondió a cultivos de diferentes tipos y en pequeñas extensiones se presentó bosques de *Quercus* sp. En este caso los componentes uso del suelo y pendiente fueron los determinantes en el valor de fragilidad.

Sin embargo, por arriba de los 2900 msnm predominó la fragilidad alta y muy alta (21%) en donde los suelos más comunes fueron litosol, regosol y andosol, la vegetación predominante fue *Pinus* sp. – *Abies religiosa* y *Abies religiosa*, mientras que las pendientes fueron escarpadas y muy escarpadas. En este caso, los componentes que determinan los valores altos (categorías III) son los suelos andosol y regosol, la vegetación *Abies religiosa* y las pendientes. Mientras que los litosoles y la vegetación *Pinus* sp. – *Abies religiosa* contribuyen en menor medida.

11. LITERATURA CITADA

- Adinarayana, J., Flach, J. D., Collins, W. G. 1994. Mapping land use patterns in a river catchment using geographical information systems. *Journal of Environmental Management*. Núm. 42, pag. 55-61.
- Anaya, A., R. Hernández y X. Madrigal. 1988. La vegetación y los suelos de un transecto altitudinal del declive occidental del Iztaccíhuatl (México). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales-SARH. México. 79pp.
- Azuara, G. y A. Bello. 2003. Determinación del grado de erosión hídrica en microcuencas de la parte SO del Iztaccíhuatl, Estado de México. Tesis de licenciatura. FES. Zaragoza, UNAM.
- Barret, E. C. & L.F. Curtis. 1998 . *Introduction to Environmental Remote Sensing*. 3ra. Edición. Chapman & Hall. 413pp.
- Beatty, M., G. Petersen y L. Swindale 1979. Planning the uses and management of land. Num. 21 by Agronomy. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Cantellano E., M.B. Martínez, N. Y. Gil y E. Villeda. 2002. Diagnóstico de la vegetación arbórea del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. *En: Memorias del V Congreso Nacional de Áreas Naturales Protegidas de México*. Guadalajara, Jalisco.
- Carranza, J., Molina, C., I., Rodríguez, L., Aguilar, J., Rodríguez, D., Zamora, J., Silva, C., Cruz, R. 2003. Estimación de la tasa de transformación del hábitat en la reserva de la biosfera "Sierra de Manantlán". Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C. y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.
- Chuvieco Salinero. 2002. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Ariel, S.A. Barcelona España. pp: 586
- Colwell, R. N. (editor) 1990. *Manual of Remote Sensing*. 3ra. Edición. Vol. I. American Society of Photogrammetry. Pp. 541.
- CONABIO. 1998. La diversidad biológica de México: Estudio de país. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 341 pp.
- Cordero, C. y E. Morales. 1998. Panorama de la biodiversidad de México. CONABIO.
- Cox, George. 1976. *Manual of General Ecology Laboratory*. 2da. Edición. Wm.C. Brown Company Publishers. USA. 232pp.
- Curtis, H. & N.S. Barnes. 1995. *Invitación a la Biología*, 5ta. Edición. Editorial Médica Panamericana. 856pp.

Demers, M. N. 2000. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. Segunda Edición. John Wiley & Sons, Inc. USA. 450 pp.

Demers, M. N. 2002. *Gis modeling in raster*. John Wiley & Sons, Inc. USA. 203 pp.

Domínguez R., I. y Olivares A. 1997. Suelos. In: Acuña et al. Programa de manejo para el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl. UAM. X. Departamento del Hombre y el Ambiente. Área de Ecología y Planeación de Recursos Naturales. mimeo. P. 18-22.

Du Plessis, P. 1999. Linear regression relationships between NDVI, vegetation and rainfall in Etosha National Park, Namibia. *Journal of Arid Environments*. 42:235-260.

Eastman R. 1999. *Idrisi32, Guide to Gis and Image Processing*. Vol. 1. Clark University. USA. Pp: 191.

Eastman R. 1999. *Idrisi32, Guide to Gis and Image Processing*. Vol. 2. Clark University. USA. Pp: 168.

Estes, J. y G. Thurley. 1984. *Manual of Remote Sensing, Vol. II Interpretation and Applications*. 2ra. Edición. American Society of Photogrammetry. USA. 2440pp.

FAO, 1986. *Evaluación de tierras con fines forestales*. Estudio FAO Montes Núm.48, Roma Italia.

Franklin, J. 1990. Land cover stratification using Lansat Thematic Mapper data in Sahelian and Sudanian woodland and wooded grassland. *Journal of Arid Environments* 20:141-163.

Franklin, S. E. 2001. Modeling Forest Net Primary Productivity with Reduced Uncertainty by Remote Sensing of Cover Type and Leaf Area Index. *En: Hunsaker C., M. F. Goodchild, M. A. Friedl, y T. J. Case. 2001. Spatial Uncertainty In Ecology. Implications for remote sensing and GIS applications*. Springer. USA. Pp: 284 –307.

Franklin, S. 2001. *Remote Sensing for sustainable forest management*. Lewis Publishers. USA. 407pp.

García, V.H. 2001. Conceptos básicos de información geográfica y sus aplicaciones en la Industria Petrolera y de Energía. *Ductos No. 27, Año 4*. Pp. 20-25. Instituto Mexicano del Petróleo, México.

Giancoli, D. 1995. *Physics, principes with applications*, 4ta. Edición. Prentice Hall, USA. 1020pp.

Gorte, B.G. 2000. Land-use and Catchment Characteristics. *En: Schultz, G. y E. Engman (editores). 2000. Remote Sensing in hidrology and Water Management*. Capítulo 7. Springer. Alemania. 483pp.

- Hinojosa, O. M. 1958. Los bosques de México, relato de un despilfarro y una injusticia. Instituto de Investigaciones Económicas. México. 168pp.
- INEGI. 1989. Guías para la interpretación de cartografía, uso de suelo. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. 53pp.
- Jensen, R. J. 2000. Remote sensing of the environment. An earth resource perspective. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. USA. 544 pp.
- Jensen, M. y P. Bourgeron, (editores). 2001. A guidebook for Integrated Ecological Assessments. Springer-Verlag, New York. 536pp.
- Johnston, C. 1998. Geographic Information Systems in Ecology. Blackwell Science. USA. 239 pp.
- Jones, Ch. 1997. Geographical Information systems and Computer Cartography. Longman. Singapore. 319pp.
- Lea, S. y J. Burke. 1999. Física: la naturaleza de las cosas, Vol. I. International Thomson Editores. México. 754pp.
- Levachkine, S. (2000) "Digitalización automatizada de mapas ráster". Revista digital universitaria. Vol. 1. <http://www.revista.unam.mx/vol.0/art3/arti3.html>.
- Lillesand, T. y R.W. Kiefer. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. 3ra. Edición. John Wiley & Sons. Inc. 737pp.
- Malczewski, J. (1999) "GIS and multicriteria decisión análisis". Edit. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Navarro, M. del C. y G. Legorreta. 1998. Sistemas de Información Geográfica, teoría introductoria y ejercicios con AutoCad e Idrisi. 1ra. Edición. Publicaciones Docentes del Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera". UNAM. México. 136 pp.
- Nilsson, Ch. y G. Grelsson. 1995. The fragility of ecosystems: a review. Journal of Applied Ecology, Vol. 32. Pp. 677-692.
- Olvera, M., S. Moreno y B. Figueroa. 1996. Sitios permanentes para la investigación silvícola, Manual para su establecimiento. Universidad de Guadalajara, México. 60pp.
- Ortiz – Solorio C. y H. Cuanalo. 1984. Metodología del Levantamiento Fisiográfico, Un sistema para la clasificación de tierras. 2da. Edición. Colegio de Postgraduados Chapingo, México. 86pp.
- Peterson, G., C. Allen y C. S. Holling. 1998. Ecological resilience, biodiversity, and scale. *En*: Dodson, S., T. F. H. Allen, S. R. Carpenter, K. E. A. R. Ives, R. L. Jeanne, J.

F. Kitchell, N. E. Langston, y M. G. Turner. 1999. Readings in ecology. Oxford, USA. Pp. 415-432.

PRONATURA A. C. y CÉSPEDES. 2002. Bosques y biodiversidad en riesgo. Vulnerabilidad en áreas estratégicas y nuevos instrumentos de conservación. Jiménez Editores e Impresiones. México. 261pp.

Quiroz, R. N. H. 1994. Morfopedología y erosión en los grandes estratovolcanes de la Sierra Nevada. Revista de Geografía. No. 7, Vol. VI.

Raisz, E. 1974. Cartografía general. Omega, Sexta edición, Barcelona, España. 436pp.

Rzedowski J. 1969. Notas sobre el bosque mesófilo de montaña en el Valle de México. An. Esc. Nac. Cienc. Boil., México. 18: 91-106.

Rzedowski, J. y G. Rzedowski. 2001. La flora fanerogámica del Valle de México. CONABIO. México.

Schowengerdt, A. (2002). Remote Sensing. Models and methods for image processing. 2da. Edición. Academic Press.

Schultz, G. y E. Engman (editores). 2000. Remote Sensing in hidrology and Water Management. Springer. Alemania. 483pp.

SEDUE. 1984. Parque Nacional Izta – Popo. Subsecretaria de Ecología: Centro de Información Documental. 24 pp.

SEDUE. 1984. Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. Estados de México y Puebla. Dirección General de Conservación Ecológica de los Recursos Naturales.

SEMARNAP. 1997. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. México.

SEMARNAP. 2000. Ordenamiento General del Territorio, Memoria Técnica 1995-2000. Semarnap. México. 542pp.

Siebe, Ch., R. Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 57pp.

Soria, J., C. Ortiz, F. Islas y V. Volke. 1998. Sensores Remotos, Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales; Experiencias en México. CONACYT-Colegio de Postgraduados-Sociedad mexicana de la ciencia del Suelo. Publicación Especial No.7. México. 93pp.

Star, J. y Estes, J.; (1990). SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. Una introducción. Prentice Hall. Traducido por Herrera, Bernard e Ibarra, Martín.

U.A.CH. Div. De Ciencias forestales. Depto de Ing. Forestal. Sección de Teledetección e Información. Cap. 10

Starr, C. y R. Taggart. 1995. *Biology, the unity and diversity of life*. 7ma. Edición. Wadsworth Publishing Company. USA. 933pp.

Tanser, F. y A. Palmer (1999) The application of a remotely-sensed diversity index to monitor degradation patterns in a semi-arid, heterogeneous, South African landscape. *Journal of Arid Environments* 43: 477-484.

Tipler, P. 1993. *Física*, 3ra. Edición. Reverté. España. 1171pp.

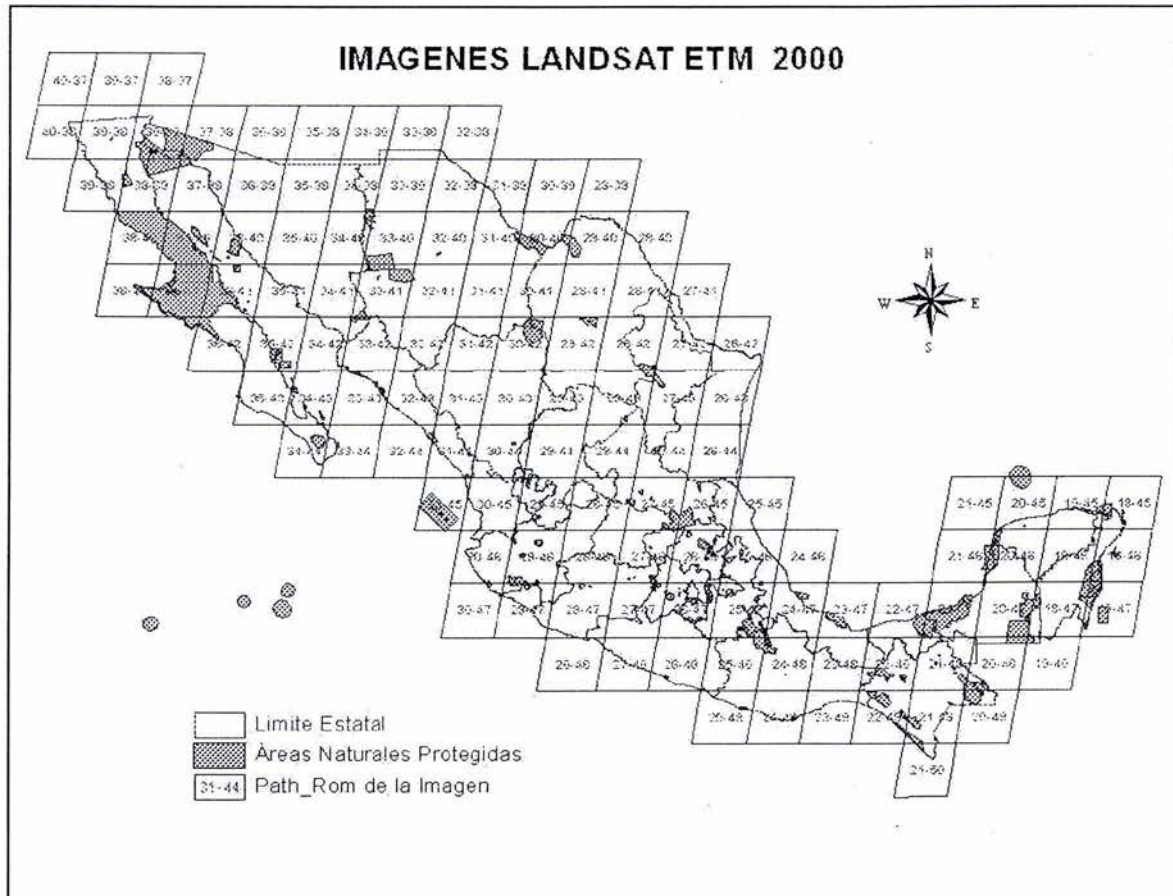
Vargas, M. F. 1997. *Parques Nacionales de México*. Vol. 1 Zona Centro, Occidente y Oriente. INE. SEMARNAP. Pág. 112 – 157, 187 – 195.

Zermeño, M. A. 2000. Anteproyecto de líneas de conducción utilizando u sistema de información geográfica. *Ductos* No. 21, Año 3. Pp. 9-13. Instituto Mexicano del Petróleo, México.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

12. Anexo I. Aproximación entre el recorrido del Satélite Landsat ETM y la República Mexicana.

En el mapa se distinguen las diferentes áreas naturales protegidas, así como su relación con la organización de líneas y renglones en el recorrido del Satélite Landsat ETM.



El presente es un aproximación realizada por la CONABIO y facilitada para este trabajo por el Departamento de Análisis Espacial y Percepción Remota de la CONANP.

12. Anexo II. Variables geofísicas cuantificables por PR.

Algunas variables geofísicas que pueden cuantificarse, a partir de la imagen de un satélite hiper –espectral (Jensen, 2000).

Variables Geofísicas		Banda	Rango espectral	GIFOV (m)
General	Específica			
Límites Tierra	Clorofila en vegetación	1	620-670nm	250
Nubosidad	Lluvia y vegetación	2	841 -876	
Propiedades Tierra	Diferencias suelo, vegetación	3	459-479	500
	Vegetación verde	4	545-565	
	Propiedades de la hoja / dosel	5	1230-1250	
	Diferencias nieve / nubosidad	6	1628-1652	
	Propiedades de la tierra y precipitación	7	2105-2155	
ocean color	Observaciones de clorofila	8	405-420	
	Observaciones de clorofila	9	438-448	
	Observaciones de clorofila	10	483-493	
	Observaciones de clorofila	11	526-536	
	Sedimentos	12	546-556	
	Sedimentos; atmósfera	13	662-672	
	Flourescencia de clorofila	14	673-683	
	Propiedades de aerosoles	15	743- 753	
	Propiedades de los aerosoles en la atmósfera	16	862-877	
Atmósfera/nubosidad	Propiedades de la atmósfera / nubosidad	17	890-920	1000
	Propiedades de la atmósfera / nubosidad	18	931-941	
	Propiedades de la atmósfera / nubosidad	19	915-965	
Termal	Temperatura de la superficie del mar	20	3.66_3.84111n	
	Incendios forestales / vulcanismo	21	3.929-3.989	
	Temperatura de la superficie / nubosidad	22	3.929-3.989	
	Temperatura de la superficie / nubosidad	23	4.02-4.08	
	Temperatura de la troposfera / fracciones de la nubosidad	24	4.433-4.498	
	Temperatura de la troposfera / fracciones de la nubosidad	25	4.482-4.549	
Atmósfera nubosidad	Nubes cirro	26	1.36-1.39	
Termal	Humedad de la troposfera media	27	6.535-6.895	
	Humedad de la troposfera superior	28	7.175- 7.475	
	Temperatura de la superficie	29	8.4-8.7	
	Ozono total	30	9.58-.9.88	
	Temperatura superficial de las nubes	31	10.78-11.28	
	Temperatura superficial de las nubes	32	11.77-12.27	
	Altura y fracción de la nubes	33	13.185-13.485	
	Altura y fracción de la nubes	34	13.485-13.785	
	Altura y fracción de la nubes	35	13.785-14.085	
Altura y fracción de la nubes	36	14.085-14.385		

13. Anexo III. Criterios para fragilidad en suelo, vegetación y relieve (Semarnap, 2000)

	MUY ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA
Cobertura de suelos, equivalente y actualizada. (Base DGCRS-FAO 1988)	Fluvisol eutríco Gleysol eutríco Gleysol mólico Andosol úmbrico Andosol mólico Andosol háplico Leptosol lílico Solonchak gléyico Arenosol háplico	Luvisol crómico Luvisol férrico Aerisol háplico Regosol eutríco Regosol calcárico Alisol férrico Leptosol réndzico Calcisol lúvico Solonchak háplico Cambisol crómico Cambisol ferálico Arenosol calcárico	Nitisol háplico Vertisol eutríco Calcisol háplico Calcisol pétrico Cambisol vértico Cambisol eutríco	Planosol eutríco Feozem háplico Kastanozem lúvico Kastanozem cálcico	No existen suelos con muy baja fragilidad en el país.
	Y	Y	Y	Y	--
Susceptibilidad a la erosión	Alta y muy alta		Media	Baja, ligera y muy ligera	

NIVEL DE FRAGILIDAD	TIPO DE VEGETACIÓN	COMENTARIOS
MUY ALTA	Bosque de oyamel	
	Bosque de cedro	
	Matorral de coníferas	
	Bosque mesófilo de montaña	
	Selva alta perennifolia	
	Selva alta subperennifolia	
	Selva mediana perennifolia	
	Selva mediana subperennifolia	
	Selva baja perennifolia	
	Selva baja subperennifolia	
	Selva baja espinosa	
	Matorral sarco-crasicaula de neblina	
	Matorral rosetéfilo-costero	

NIVEL DE FRAGILIDAD	TIPO DE VEGETACIÓN	COMENTARIOS
MUY ALTA	Manglar	
	Vegetación acuática	
	Bosque de galería	
	Vegetación de galería	
ALTA	Bosque de pino	Si se encuentran en una condición de aridez o en una pendiente de más de 30 grados, pasa a fragilidad Muy alta.
	Bosque de pino -- encino	
	Bosque de encino	
	Bosque de encino -- pino	
	Selva mediana subcaducifolia	Si se encuentran en una pendiente de más de 30 grados, pasa a fragilidad Muy alta.
	Selva mediana caducifolia	
	Selva baja subcaducifolia	
	Selva baja caducifolia	
	Matorral subtropical	Si se encuentran en una pendiente de más de 30 grados, pasa a fragilidad Muy alta.
	Matorral submontano	
	Matorral crasicauale	
	Matorral sarcocaule	
	Matorral sarco-crasicaule	
	Matorral desértico rosetófilo	
Matorral desértico micrófilo		
Chaparral		
MEDIA	Bosque de táscate	
	Bosque bajo abierto	
	Pastizal natural (semidesértico)	
	Matorral espinoso tamaulpeco	
	Mezquital	
	Vegetación de desiertos arenosos	
	Vegetación de dunas costeras	
	Pradera de alta montaña	
	Salinas	
	Vegetación halófila	
	Vegetación gypsófila	
	Pastizal halófilo	
	Pastizal gypsófilo	
	BAJA	Sabana
Pastizal-huizachal		
Áreas sin vegetación aparente		
Palmar		

	MUY ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA
VEGETACIÓN	Vegetación con muy alta fragilidad	Vegetación con alta fragilidad	Vegetación con fragilidad media	Vegetación con baja fragilidad	Se considera que no existen en el país condiciones de muy baja fragilidad debido a las características del medio natural.
	Y	Y/O	Y/O	Y	
RELIEVE	Relieve con muy alta fragilidad	Relieve con alta fragilidad	Relieve con fragilidad media	Relieve con baja fragilidad	
	Y	Y/O	Y/O	Y	
SUELOS	Suelos con muy alta fragilidad	Suelos con alta fragilidad	Suelos con media fragilidad	Suelos con baja fragilidad	