



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*"Estudio del cambio morfológico
del uso del suelo
del Valle de México "*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

MAGALI JUÁREZ SABINO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JORGE LIRA CHÁVEZ



MÉXICO, D. F.

2008

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por acogerme en sus aulas y haberme ayudado a formarme como persona.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería, por haber contribuido en mi desarrollo como ingeniera y por haberme creado una conciencia nacionalista.

Al Instituto de Geofísica, por los recursos y la beca otorgada para realizar esta tesis, también por todo el gran apoyo y enseñanza de calidad que ofrecen todos los investigadores.

A mis sinodales, gracias por las observaciones tan valiosas que hicieron para mejorar este trabajo.

A mi tutor Jorge Lira, por su paciencia y apoyo.

DEDICATORIAS

A mis padres, Pedro Juárez y Rosa Sabino, quienes con mucho esfuerzo, valor y amor me han dado lo más valioso que se puede tener en esta vida, una familia unida, en la que me pude apoyar con toda confianza en las buenas y en las malas. Porque su madurez me enseñó a elegir entre el bien y el mal, porque el hogar que construyeron no se cae ni con grandes ni pequeños problemas se mantiene firme como un retrato, gracias por la estabilidad y por la dedicación de su vida y trabajo porque sin ella no sería quien soy.

A mis hermanos, Eduardo, Isela y Judith, porque toda su alegría y apoyo no tiene igual, porque hemos pasado cosas tan buenas y tan malas que me han hecho ser parte de ustedes y sentir lo que ustedes sienten, porque maduramos juntos, porque cada día crecemos sin darnos cuenta. Cada rayo de sol, cada gota de lluvia y hasta la más infinita hoja de un árbol cobran vida y sentido al saber que seguimos juntos, al saber que su compañía es incondicional, quisiera agradecerles tanto, que no puedo expresarlo con palabras, solo espero que sepan que mis logros no solo son míos, también son de ustedes y que espero compartir cada uno de ellos con ustedes.

A mis abuelitos paternos, Don Anastasio Juárez y Leonor Gonzaga, por todo su apoyo y confianza brindados a mí y a toda mi familia, por todas las historias y enseñanzas que nos dan día a día. Gracias a su razón sobrepasaron la bondad y la sabiduría dejándonos más que su existencia. Porque nunca podré recompensar el sudor de su frente y el esfuerzo de sus manos agrietadas que no se han cansado de darme mas de lo que puedo recibir en esta vida.

A mis abuelitos maternos, Berta Ramírez y Adán Sabino+, gracias por todo el apoyo, alegría y humildad que me llena de satisfacción por conocerlas, porque me enseñaron a ver la vida con serenidad y claridad, porque cada acto de buena voluntad y de nobleza los llevo presentes en cada paso que doy.

Le doy las gracias a mi bisabuelita Juanita+ por el tiempo que me dedico, por ser parte de lo que soy, por sus anécdotas e historias que aun tengo marcadas y arraigadas a mi.

Gracias por todo el esfuerzo que hizo por vivir y luchar para que sus hijos vivieran en un mundo mejor, un mundo lleno de colores y fantasías que fue urdiendo hilo a hilo hasta formar grandes lienzos que aun adornan nuestras sonrisas.

A mi bisabuelita Rosenda, por amarme y darme todo lo que en sus manos tiene, porque cada día vela por mi felicidad, con su tierna mirada y dulce sonrisa acompañadas de sus suaves caricias y tiernos abrazos reconfortan mi alma.

A mi tía Leti Juárez, por todo su amor y confianza, por sus rizas y alegrías compartidas. Por tener un corazón tan noble y lleno de nobleza.

A mis tíos Rubén y Carlos por toda la confianza y apoyo y por todos esos días de unión familiar.

A mi tía Leti y Jesús por haber apoyado a mis padres y por haber confiado en mí.

Le agradezco tanto a mi tío Heriberto por haberme ayudado en esas tareas manuales que hasta hoy se me dificultan. Porque con la ayuda de sus manos creadoras modelamos el mundo con plastilina.

A mi tía Clara y a mi tío Alejandro, por toda la ayuda y confianza que me han dado a mí y a mis padres.

A mi tío Helios por enseñarme tantas cosas de la vida laboral, por desearme lo mejor y por darme su apoyo incondicional.

A mi tía Yola por mostrarnos que en esta vida debemos cuidarnos y no ser tan ingenuos.

Una dedicatoria muy especial a mi tío Pablo y a mi Tía Ana por haber cimentado parte de mi educación, y haberme apoyado durante tanto tiempo. Gracias a ustedes me di cuenta de que el mundo no es tan grande e interminable como parece y que todos mis sueños por muy difíciles que sean los podré alcanzar.

A mis primas y primos, gracias por darle tanta alegría a mi infancia, por haberme acompañado en mundos fantásticos e irreales, por llenarme de recuerdos tan agradables que me hacen sonreír cada instante.

A mis sobrinas y sobrinos, aunque son muy pequeños la alegría que me dan no tiene medida, ni tampoco la sinceridad de su mirada, espero que les vaya bien por siempre.

A mis mejores amigas, Yazmín, Rosa y Yamilet, gracias por haberme sostenido cuando estuve a punto de caer, por haber confiado tanto en mí, por haberme enseñado este deporte que le dio magia a todo cuanto hago, gracias por todos los sueños que compartimos juntas, por todos los que se realizaron y por los que están en espera, ojala esta vida me mantenga cerca de ustedes para compartirlos.

A mis amigas y amigos de la escuela, Zyntyta, Elizabeth, Jaqueline, Laura, Ramón, Rocío, Tania y Elsa les agradezco su compañía y su apoyo durante todos mis estudios, porque siempre recordare con gracia todas las anécdotas que pasamos juntas, jamás olvidaré esas mañanas de basquetbol en la prepa y en CU, ni la tranquilidad que teníamos al final de cada tarea, tampoco olvidaré las practicas que tuvimos en lugares no muy remotos pero si grandiosos, y lo mejor de todo sus sonrisas.

A Liz, con tu alegría y entusiasmo logramos terminar esto y comenzar más, porque a tu lado las cosas son más sencillas y nada parece inalcanzable, como te puedo agradecer que seas el complemento de todo lo que hago, gracias por todo, por tu tiempo, tus alegrías, tu familia, tu ayuda; espero que así como yo cuento contigo tu cuentes conmigo para todo lo que nos falta. Gracias por haberme dado más que tu apoyo, por haberme dado un poco de ti.

A quien se fue y que dejo un enorme hueco en mi vida, solo quiero que sepas que me llenaste de sueños, ilusiones y retos, que me trajeron hasta donde estoy, hoy miro hacia atrás y agradezco que te hayas cruzado en mi vida, porque contigo conocí los sentimientos más nobles de esta vida.

Y a todas las personas son parte de mi vida, no sé cómo explicarles con simples palabras todo cuanto quiero decirles: GRACIAS.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	4
1.1 Elementos básicos de la Percepción Remota.	4
1.2 Geometría de observación.	8
1.3 Generación de imágenes multi-espectrales.	10
1.4 Radiación electromagnética	12
1.5 Interacción de la radiación electromagnética con la vegetación	16
1.5.1 Dispersión	16
1.5.2 Respuesta espectral de la vegetación.	19
2. VEGETACIÓN Y DEFORESTACIÓN EN EL VALLE DE MÉXICO	29
2.1 Vegetación existente en el valle de México	29
2.2 Perturbaciones sobre la vegetación natural	34
2.3 Tipos de afectación	35
3. EXPANSIÓN CANÓNICA PARA MODELAR LA ZONA BOSCOSEA	40
3.1 Descomposición en componentes principales	42
3.2 Transformación Kauth- Thomas	49
3.3 Textura	55
3.3.1 LBP	57
3.3.2 Entropía, Homogeneidad y Contraste	60
3.3.3 Divergencia	63
3.4 Segmentación de la zona boscosa del Valle de México	67
3.5 Generación de Bitmaps	69
4. Detección de cambios	72
4.1 Métodos de detección de cambios	72
4.2 Cambios en la vegetación	74
4.3 Resultados	81
4.4 Morfología de Bitmaps	86
4.4.1 Área y perímetro	86
4.3.2 Dimensión Fractal	87
4.5 Análisis de resultados	100
CONCLUSIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	106

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha registrado una gran pérdida de zonas boscosas alrededor de todo el mundo, debido a causas naturales, antropogénicas o una combinación de ellas, lo que ha tenido como consecuencia una gran preocupación entre la comunidad científica y algunos otros organismos. A raíz de esto se ha dado un gran monitoreo de las zonas boscosas, mediante diferentes técnicas: directas o indirectas.

Dentro de los métodos indirectos la geofísica ha aportado resultados interesantes haciendo uso de la Percepción Remota (PR). Esta ciencia se encarga de captar y coleccionar información de un objeto a través de medidas hechas a distancia, sin estar en contacto físico con él (Lira 1995).

De esta manera las imágenes satelitales captan información proveniente de los objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre, la cual se obtiene gracias a la interacción de la radiación electromagnética con los componentes de la superficie, debido a que cada uno de ellos interactúa de diferente manera cuando una onda electromagnética incide sobre él, en este proceso algunas longitudes son absorbidas, transmitidas, reflejadas o refractadas, y otras más son emitidas por el mismo cuerpo dependiendo de su temperatura. Al graficar esta respuesta en las diferentes longitudes de onda se tiene la llamada firma espectral que caracteriza espectralmente cada objeto de la superficie terrestre.

La PR ha aprovechado este fenómeno para modelar los diferentes componentes de la superficie terrestre, tales como rocas, cuerpos de agua, vegetación, nubes, frentes tropicales, tamaño y forma de los glaciares, etc. Por lo tanto representa una gran herramienta para monitorear los bosques, en especial aquellos que se encuentran en peligro de ser aniquilados, como lo es la zona boscosa circundante al Valle de México, la cual presenta grandes problemas debidos a la sobrepoblación, ya que en él se encuentra el 20 % de la población mexicana (aproximadamente 18 millones de personas) con solo el

0.48 % del territorio nacional, ocasionando un gran problema ambiental, político y social (Ezcurra *et al.* 2006).

Estos casos se presentan generalmente en las grandes ciudades de países pobres en donde la tasa de crecimiento es más alta comparada con la de países industrializados, ocasionando que las necesidades de servicios urbanos sean cada vez mayores y que los problemas ambientales vayan en aumento.

Entre estos problemas se encuentra el cambio de cobertura vegetal natural por zonas agrícolas, urbanas o rurales, o por una disminución gradual de las zonas boscosas. En la PR se han desarrollado diversos métodos para la detección de cambios con diferentes aplicaciones, por ejemplo: Silva *et al.*(2003) reporta áreas afectadas por la explotación de minas en el Amazonas a partir del análisis vectorial de cambio (CVA). Singh (1986) detecta cambios en bosques tropicales a partir de la resta de dos imágenes de diferente fecha; Lyon *et al.*(1998) utiliza la resta de índices de vegetación de diferentes fechas. Byrne *et al.* (1980), Ingebritsen y Lyon (1985) hacen un análisis de componentes principales de pares de imágenes multi-temporales para localizar cambios en la cobertura de la tierra. Miller *et al.* (1998) utiliza la comparación post clasificación para detectar cambios en el uso y cobertura de la tierra. Lu *et al.* (2004) y Coppin *et al.* (2004) hacen una revisión exhaustiva de los diversos métodos reportados en la literatura mencionando algunas de sus ventajas y desventajas, así como el grado de complejidad de cada método.

El objetivo de esta tesis es determinar el cambio en la morfología de las zonas boscosas esto se hace por medio de la obtención de una imagen binaria o bitmap en la que se le da el valor de uno a los bosques y cero al resto de la imagen, para los siguientes años: 1989, 1991, 1993, 1996, 1998, 1999, y 2001, proporcionando área, perímetro y dimensión fractal. Estas imágenes provienen de los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del programa Landsat, para las cuales se calcula la divergencia de cada imagen (Lira y Rodríguez 2006) así como la primera componente principal y la banda verdor de la transformación Kauth-Thomas, formando así una expansión canónica que describe a la vegetación.

La tesis está compuesta de 4 capítulos, que comprenden las siguientes temas:

En el primer capítulo se definen los conceptos básicos de la percepción remota, así como los fenómenos físicos que se toman en cuenta cuando se obtiene una imagen de satélite, también se describe la respuesta espectral de la vegetación y se presentan las imágenes del área de estudio.

En el segundo capítulo se detalla el tipo de vegetación presente en el área de estudio y las diferentes perturbaciones ambientales que ha sufrido.

En el tercer capítulo se dan las bases matemáticas y teóricas de las variables canónicas, vigor de la vegetación, albedo y textura; también se describe la metodología seguida para realizar los bitmaps de cada fecha.

En el cuarto capítulo se presentan los bitmaps de cada fecha con sus respectivas áreas, perímetros y dimensiones fractales; además de esto se hace un análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

Para llevar a cabo el estudio del cambio morfológico en las zonas boscosas se utilizó como herramienta fundamental la Percepción Remota, que a su vez emplea diferentes conceptos de la física que deben ser comprendidos, para tener de esta manera un mejor entendimiento de los procesos que se llevan a cabo en la obtención de imágenes satelitales multiespectrales. Así, al aclarar los conceptos involucrados, será posible entender e interpretar los resultados obtenidos.

Uno de los conceptos fundamentales en la Percepción Remota es que esta ciencia se encarga de captar y coleccionar información de un objeto a través de medidas hechas a distancia, utilizando la radiación electromagnética reflejada por el objeto después de haber interactuado con él (Lira 1995).

1.1 Elementos Básicos de la Percepción Remota

Para captar la imagen de una escena se necesita de una **fente de iluminación**. Esta fuente puede ser algún dispositivo que emita radiación electromagnética o bien puede ser una fuente natural como el sol. Las fuentes de iluminación se dividen en activas y pasivas.

En los sistemas activos se usan dispositivos que iluminan el paisaje con trenes de pulsos cuya fase, longitud de onda, plano de polarización y potencia son controlados.

Con estos dispositivos se pueden hacer observaciones de día o de noche, y no influyen considerablemente las condiciones atmosféricas.

En los sistemas pasivos encargados de monitorear la Tierra se usa regularmente al sol, sobre el cual no se tiene control, ya que emite en un amplio rango de longitudes de onda del espectro electromagnético, a distintas fases y a distintos planos de polarización. Cabe mencionar que solo se pueden hacer observaciones de día y con condiciones atmosféricas que permitan la libre iluminación del paisaje, entendiéndose por **paisaje** como todos los objetos presentes en el territorio explorado por el hombre, tales como ríos, colinas, vegetación o rocas (Lira 1995)

A la porción del paisaje que nos interesa estudiar se le llama **escena** (fig. 1.1), y puede estar compuesta por montañas, ríos, lagos, nubes, o en el caso de las imágenes que se usan en esta tesis, están compuestas principalmente de zonas urbanas, zonas agrícolas, de algunos cuerpos de agua, pastizales, volcanes y en especial de zonas boscosas.

Otro elemento fundamental de la percepción remota es el sensor remoto (fig. 1.1), que es un dispositivo que captura la radiación electromagnética proveniente de la escena; este sensor está montado en una plataforma, la cual puede ser un satélite o un avión, si es un satélite su órbita puede ser geoestacionaria o polar.

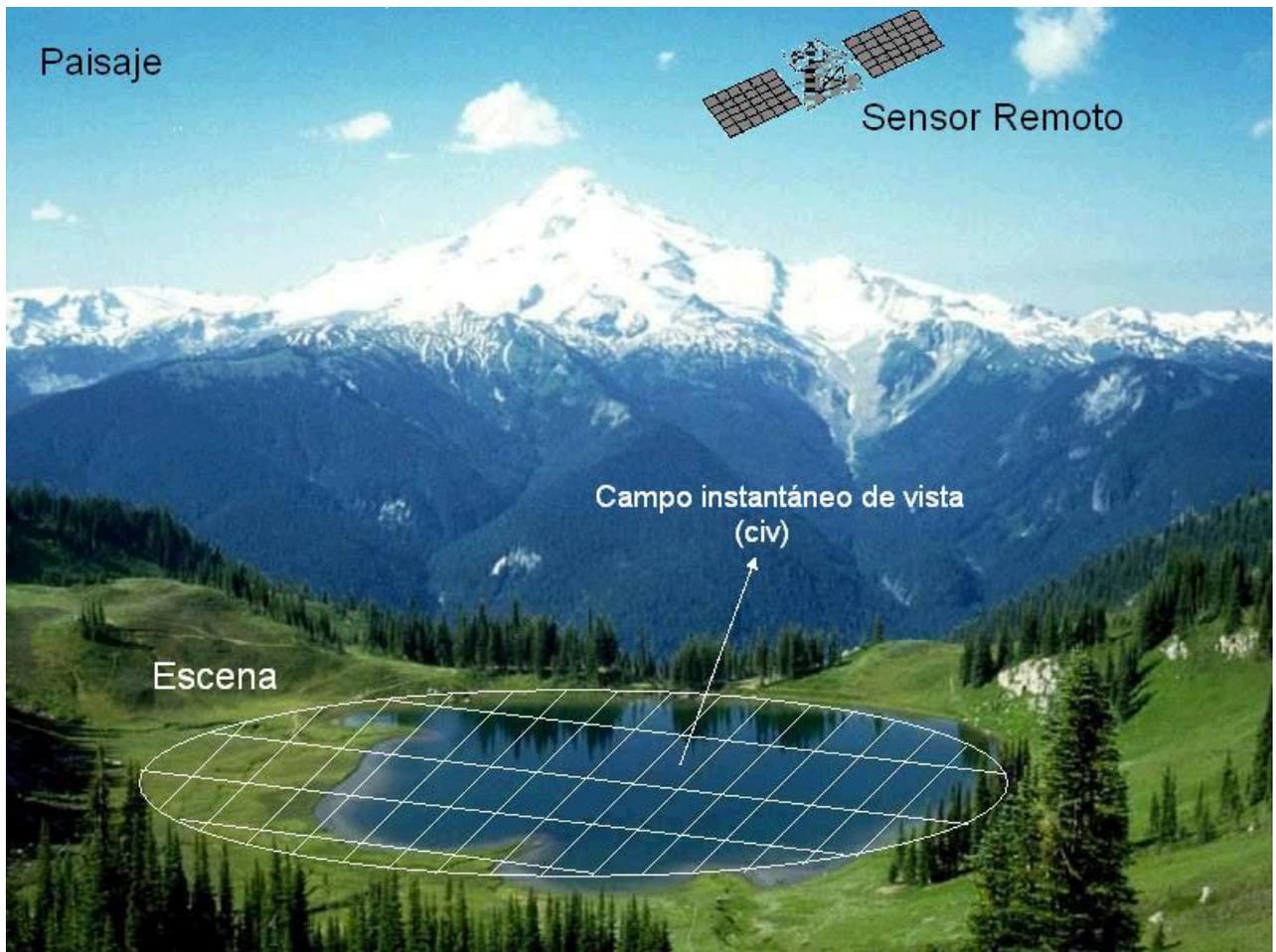


Fig. 1.1 Elementos básicos de la Percepción Remota.

Las orbitas polares son utilizadas en el estudio del medio ambiente, la geología y la geofísica por tener una buena resolución espacial, estas se encuentran a altitudes entre 700 y 1500 km, y pasan por los polos con cierta periodicidad (fig. 1.2), al pasar por el ecuador lo hacen con cierto ángulo, además de que lo hacen casi a la misma hora local todos los días en diferentes zonas (Richards 1999), por esta razón, en esta tesis, se usan imágenes de satélite del programa Landsat, cuya órbita es polar y el sensor es del tipo TM y ETM, la resolución de las imágenes es de 28.5 m, para más detalles de los sensores y de la órbita ver el apéndice 1.

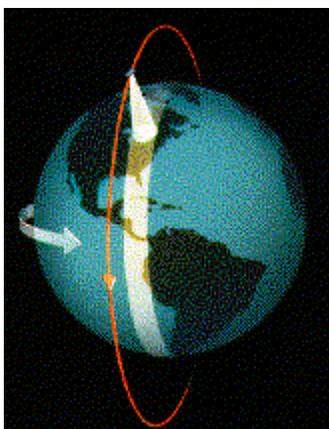


fig. 1.2 Órbita de un satélite polar.

Las plataformas geoestacionarias (fig. 1.3), se usan principalmente para el estudio del clima y la meteorología debido a que las imágenes obtenidas con sensores montados en estas plataformas cubren grandes extensiones por su baja resolución espacial. La altitud de estas plataformas es de aproximadamente 36,000 Km (Richards 1999).

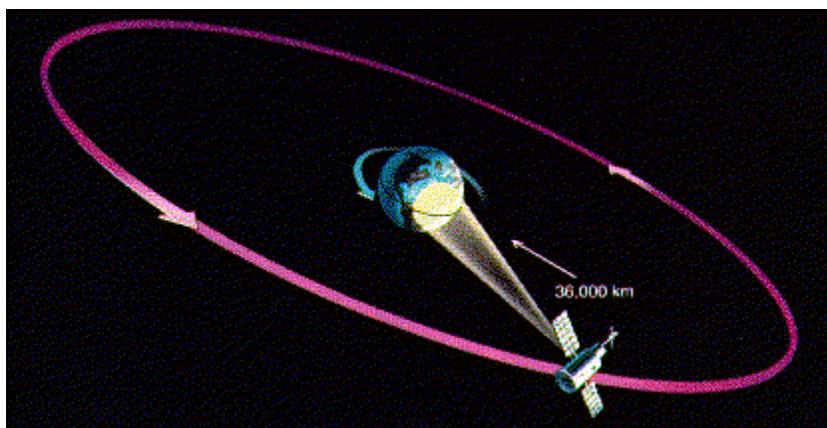


fig. 1.3 Órbita de un satélite geoestacionario.

Teniendo la escena iluminada y un sensor montado en una plataforma, ya sea un avión o satélite, el dispositivo registra la radiación proveniente de la escena.

1.2 Geometría de observación.

Las condiciones de algunos elementos en percepción remota, como es la fuente de radiación, el sensor y el objeto observado (fig. 1.4), al momento del registro de la imagen son los siguientes:

- **H** es la altura del sensor remoto con respecto al *datum*.
- **Nadir local** es la dirección que definiría una plomada lanzada desde el sensor hacia la Tierra.
- ζ es el ángulo de azimut.
- θ es el ángulo de elevación de la fuente, en el cenit $\theta = 0^\circ$ y en el horizonte $\theta = 90^\circ$.
- Φ es el ángulo de observación, medido entre el nadir local y la línea que une al campo instantáneo de vista (civ, fig. 1.1) con el sensor.
- **r** es la distancia del sensor al civ (fig. 1.4).

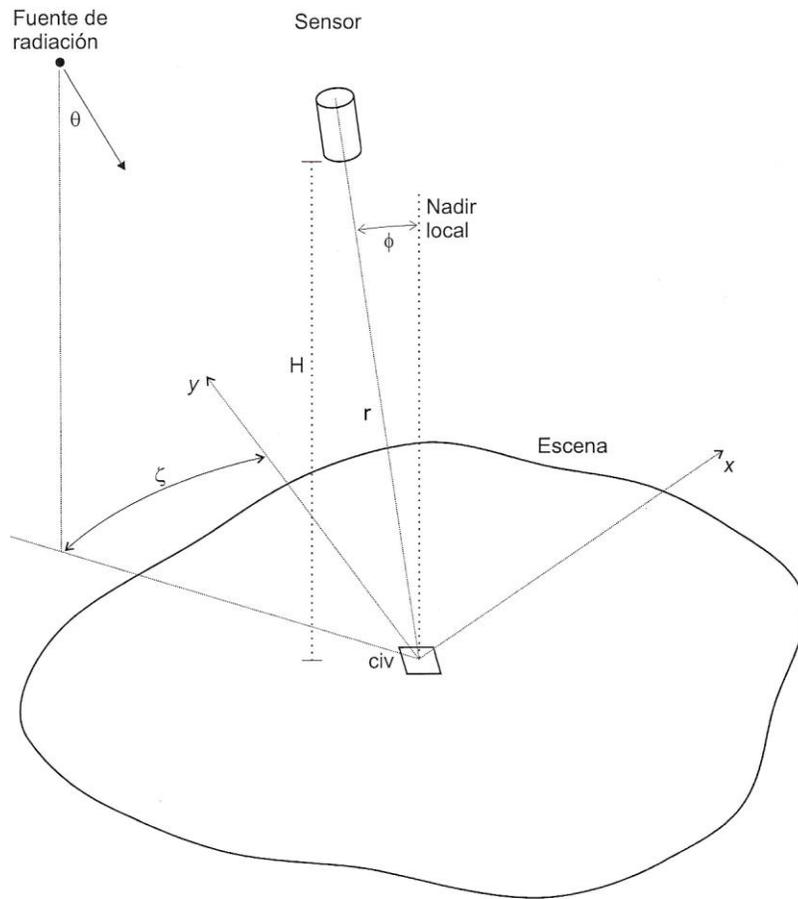


fig. 1.4 Geometría de observación (Lira 2006).

El proceso por el cual la energía radiante, proveniente de la fuente, llega hasta el sensor portando información de la escena es el siguiente:

La fuente emite cierta cantidad de energía por unidad de tiempo llamada Energía Radiante (Q), sus unidades son Joules. Esta energía pasa a cierta razón de tiempo a través de cierto lugar (Flujo Radiante $\phi = \partial Q / \partial t$ W), y sobre cierta unidad de área llamado Densidad de

$$\text{Flujo Radiante } E = M = \partial \phi / \partial A \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

La densidad de flujo radiante incidente a una superficie es llamada irradiancia (E) y cuando está emergiendo se le llama exitancia o emitancia.

Es necesario tomar en cuenta que la emitancia se puede dar en varias direcciones dependiendo de la rugosidad de la superficie.

El sensor remoto no puede percibir todo este flujo radiante proveniente del civ sino que solo mide una porción dependiendo del área del detector.

Para esto se define la intensidad radiante, la cual es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido ($I = \partial \Phi / \partial \Omega \left[\frac{W}{sr} \right]$).

De esta manera el flujo radiante medido por el sensor depende del ángulo sólido, sin embargo en esta expresión se está considerando que la superficie es plana, lo cual es incorrecto, por lo que es necesario proyectar las superficies que no son planas, como pueden ser las montañas o depresiones, a una superficie que si lo sea. Esta superficie se llama Área Proyectada y está dada por $\partial A \cos(\theta)$.

De esta manera se puede medir la Radiancia ($L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Omega \partial A \cos(\theta)}$), que está definida como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido por unidad de área proyectada en una dirección dada, incidiendo, pasando a través, o emergiendo en una dirección específica en un punto de una superficie (Lira 2006)

1.3 Generación de imágenes multiespectrales

Una forma de entender cómo se obtienen las imágenes multiespectrales es imaginar una rejilla que divide la escena como lo muestra la figura 1.1, a cada elemento de esta rejilla se le llama campo instantáneo de vista (civ).

Cada civ interactúa con la radiación proveniente de la fuente, de esta manera el civ transmite, refleja o emite radiación en diferentes longitudes de onda, que no necesariamente son iguales a las que incidieron sobre él. Parte de ésta radiación (cierto ángulo sólido) es captada por un arreglo de sensores montados en la plataforma por unidad de tiempo, como se mencionó anteriormente, este arreglo posee un subsistema de enfoque y conducción de radiación que la lleva hacia un grupo de detectores, frente a los cuales se encuentra un conjunto de filtros o un espectro-radiómetro, el cual selecciona un

conjunto de intervalos de energía. Cada detector está adecuado para captar la radiación en el intervalo ΔE_j .

Los detectores generan un voltaje proporcional al resultado de haber integrado la radiación por unidad de tiempo por unidad de ángulo sólido. La señal de voltaje generada por los detectores, a medida que observa un CIV tras otro, se introduce a un convertidor análogo/digital que la cuantiza empleando una escala, comúnmente entre 0 y 255, por lo tanto el detector genera un 255 para el CIV más brillante y un cero para el más oscuro, la figura 1.5 (tomada de Lira 2002) muestra el proceso que se está describiendo.

Todos estos valores se almacenan en algún dispositivo conservando la posición relativa a la escena, esto se realiza para los η diferentes intervalos de energía o dicho de otra manera para los η rangos de longitudes de onda. Por lo tanto cada CIV tiene asociado η números que describen su respuesta espectral, en forma vectorial se escriben como:

$$P_{mi} = b_1, b_2, \dots, b_{\eta} \quad m_i$$

De esta forma se genera la imagen multispectral (Lira 2002).

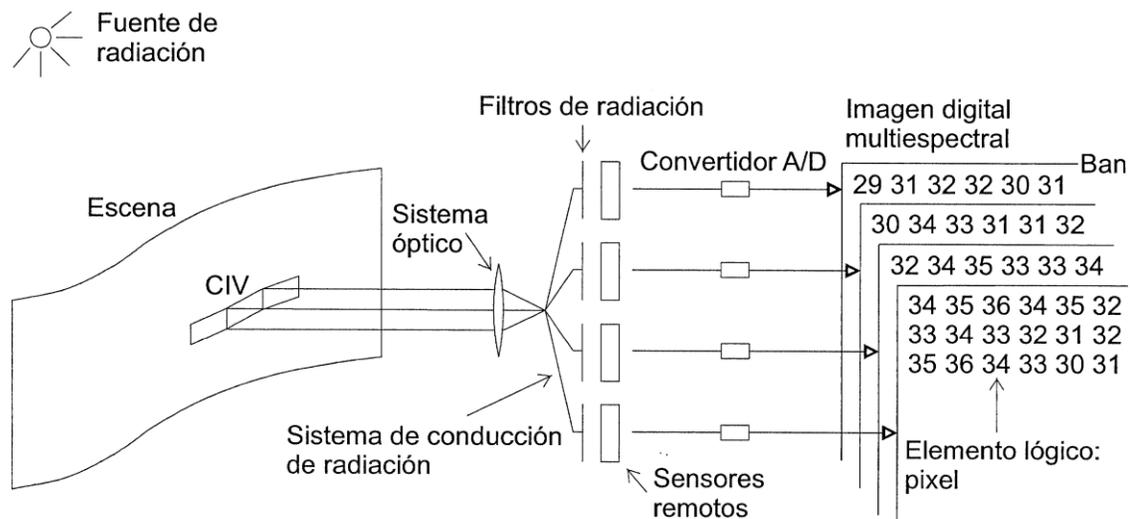


Fig. 1.5 Generación de imágenes multi-espectrales (Lira 2002).

1.4 Radiación electromagnética

Uno de los conceptos más importantes en la percepción remota es el de radiación electromagnética y las características que la definen. A continuación se dan algunos conceptos que son necesarios para explicar porqué se usan ciertas variables en el desarrollo de esta tesis.

La **radiación electromagnética** se define como un fenómeno ondulatorio de transporte de energía, formado por un campo magnético y uno eléctrico perpendiculares entre si, que oscilan a cierta frecuencia y se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro con una velocidad de 299 792 458 m/s en el vacío, también conocida como rapidez de la luz, y se representa como c .

Como la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio tiene **longitud de onda** (λ) la cual se define como la distancia lineal entre puntos correspondientes de ondas consecutivas, por ejemplo, entre cresta y cresta o valle y valle (Bueche 1973), se mide en metros aunque en percepción remota se utilizan comúnmente los micrómetros ($\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$) o los nanómetros ($\text{nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$).

La **frecuencia** (ν) de una onda es el número de ciclos que pasan por un punto dado, por segundo, sus unidades son los Hertz ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$).

La longitud de onda y la frecuencia de la radiación electromagnética están relacionadas por medio de la constante c .

$$c = \lambda \nu$$

La **energía** de una onda está dada por:

$$E = h\nu$$

Donde h es la constante de Planck cuyo valor es de $6.6256 \times 10^{-34} \text{ [J]}$.

El **espectro electromagnético** es el conjunto de frecuencias o longitudes de onda posibles en el que se manifiesta la radiación electromagnética.

En percepción remota es muy común caracterizar ondas electromagnéticas por la posición de la longitud de onda en el espectro electromagnético, por lo que se ha dividido el espectro en regiones dándole nombres dependiendo de sus características físicas.

Cabe mencionar que a la radiación que consta de una sola longitud de onda se le llama radiación monocromática, y al intervalo que comprende las longitudes de onda de 0.4 μm a 10.0 μm se le conoce como región óptica, al intervalo [0.4 - 0.7] μm se le conoce como región del visible, debido a que estas longitudes de onda son perceptibles por el ojo humano (Lira 2006).

Tabla 1.1 Espectro electromagnético

Región	Longitud de onda λ
Rayos X	[0.001 – 1.00] nm
Ultravioleta	[0.001 – 0.40] μm
Violeta	[0.40 – 0.45] μm
Azul	[0.45 – 0.51] μm
Verde	[0.51 – 0.56] μm
Amarillo	[0.56 – 0.59] μm
Anaranjado	[0.59 – 0.63] μm
Rojo	[0.63 – 0.70] μm
Infrarrojo cercano	[0.70 – 3.00] μm
Infrarrojo medio	[3.00 – 30.0] μm
Infrarrojo lejano	[30.0 – 100.0] μm
Microondas	[0.1 – 100.0] cm
Banda Q	[0.10 – 0.27] cm
Banda W	[0.27 – 0.40] cm
Banda V	[0.40 – 0.75] cm
Banda Ka	[0.75 – 1.11] cm
Banda K	[1.11 – 1.67] cm
Banda Ku	[1.67 – 2.50] cm



Banda X	[2.50 – 3.75] cm
Banda C	[3.75 – 7.50] cm
Banda S	[7.50 – 15.0] cm
Banda L	[15.0 – 30.0] cm
Banda P	[30.0 – 100.0] cm

Las bandas del Landsat utilizadas en esta tesis son: 1, 2, 3, 4, 5 y 7, cuyas aplicaciones al medio ambiente son las siguientes:

Tabla 1.2 Bandas del Landsat.

Banda TM	Longitudes de onda [μm]	Principales aplicaciones
1	0.45-0.52	Diseñado para la penetración de cuerpos de agua, haciéndolo útil para el mapeo de aguas costera. También es útil para la discriminación de vegetación/suelo, mapeo de tipos de bosque, e identificación de características culturales
2	0.53-0.60	Diseñado para medir el pico de reflectancia del verde para la discriminación de vegetación y valoración del vigor. También es útil para la identificación de características culturales
3	0.63-0.69	Diseñado para detectar la región de absorción de la clorofila ayudando en la diferenciación de especies de plantas. También es útil para la identificación de características culturales
4	0.78-0.90	Útil para la determinación de tipos de vegetación, vigor, y contenido de biomasa, para delineamiento de cuerpos de agua, y para la discriminación de humedad en suelos.
5	1.55-1.75	Indicativo de contenido de humedad en la vegetación. También es útil para la diferenciación de nieve de las nubes.
7	2.09-2.35	Útil para la discriminación de minerales y tipos de roca. También es sensible al contenido de humedad de la vegetación.

6	10.4-12.5	Útil en el análisis de la tensión de la vegetación, discriminación de humedad del suelo, y aplicaciones en mapeos termales.
---	-----------	---

Absortancia α . Es la razón del flujo radiante absorbido con respecto al flujo radiante incidente a una superficie.

Reflectancia ρ . Razón del flujo radiante reflejado con respecto al flujo radiante incidente a una superficie.

Transmitancia τ . La razón del flujo radiante transmitido con respecto al flujo radiante incidente a una superficie de tal manera que $\alpha + \rho + \tau = 1$.

Albedo (A). Es la razón del flujo radiante reflejado con respecto al que incide sobre una superficie, integrado sobre todas las longitudes de onda del espectro electromagnético por unidad de ángulo sólido.

Albedo hemisférico. Es el valor promedio de A sobre el hemisferio de todas las posibles direcciones.

Dispersión. Es el proceso por el cual la distribución de un haz de radiación es modificada al ser desviado, sobre un hemisferio, por una superficie o un medio.

En términos generales la dispersión de la radiación electromagnética depende de la longitud de onda y de la rugosidad de la superficie sobre la cual incide el haz de radiación electromagnética.

1.5 Interacción de la radiación electromagnética con la vegetación

1.5.1 Dispersión

En el caso de las imágenes Landsat, el sensor recibe la radiación electromagnética después de haber interactuado con la superficie terrestre y la atmósfera. La siguiente figura muestra las diferentes trayectorias que puede seguir una onda electromagnética antes de incidir en el sensor (fig. 1.6), aquí se puede ver que la radiación original E_{λ} puede:

- 1) Chocar con una partícula de la atmósfera e incidir en el sensor.
- 2) Dispersarse en la atmósfera e incidir en el civ de observación o en los civ's vecinos.
- 3) Llegar al civ de observación sin perturbación alguna.
- 4) Al reflejarse puede volver a dispersarse en la atmosfera o incidir directamente en el sensor.

Por lo tanto lo que mide el sensor no solo porta información del civ que está registrando, sino que también recibe radiación dispersada por la atmosfera y por los civ's vecinos.

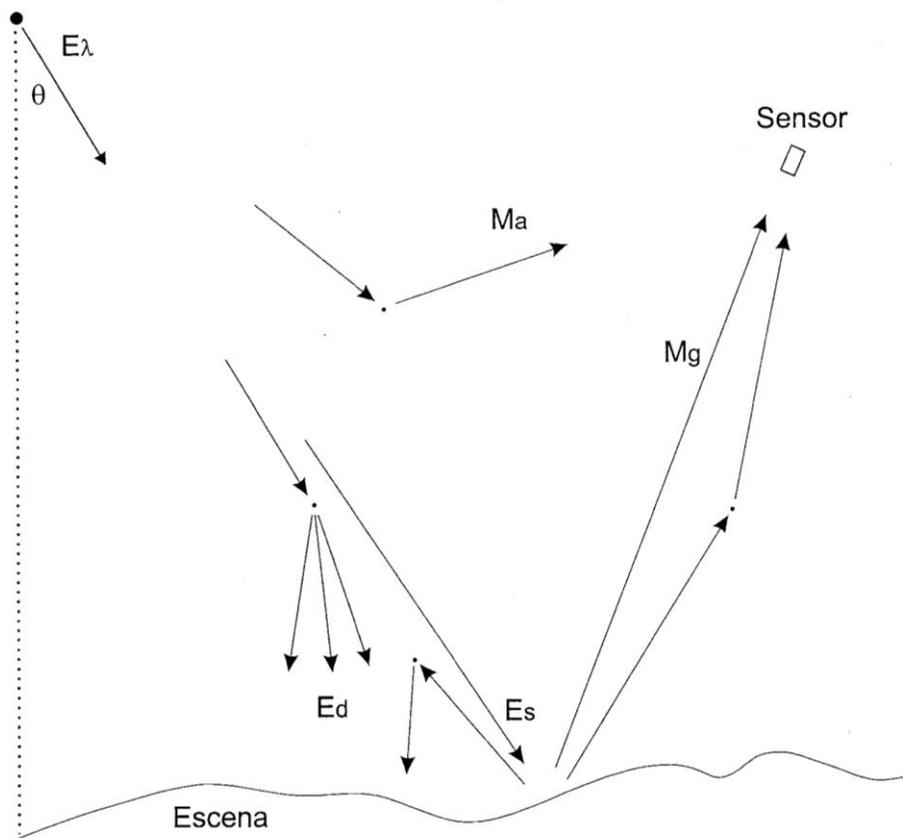


Fig. 1.6 Interacción de la radiación con la atmósfera y la superficie terrestre (Lira 2006).

La interacción con la atmósfera se da de la siguiente manera, la radiación proveniente del sol contiene una gran cantidad de frecuencias, la cual es dispersada o absorbida por la atmósfera dependiendo de su longitud de onda, a continuación se mencionan los tipos de dispersión que existen.

La dispersión de Rayleigh ocurre cuando el diámetro de las moléculas (d) es más pequeño que la longitud de onda (λ) de la radiación incidente ($d < \lambda$), esta dispersión es inversamente proporcional a la longitud de onda a la cuarta potencia $1/\lambda^4$, lo cual implica que para longitudes de onda cortas es mayor que para longitudes de onda grandes (Jensen 1996).

La dispersión por aerosoles (Mie) ocurre cuando $d \approx \lambda$ y está en función fundamentalmente del contenido de vapor de agua, polvo, contaminantes, desechos

industriales y otras partículas de aerosoles presentes en la atmósfera (Jensen 1996 y Lira 2006).

La absorción no selectiva se da cuando la longitud de onda es mucho menor que el diámetro de las partículas (Lira 2006). El agua y otros gases son los que dominan este tipo de absorción y afectan mayormente a la radiación con longitudes de onda superiores a 0.8 μm .

De lo mencionado anteriormente se puede decir que la dispersión atmosférica puede adicionar brillantez en la imagen en las longitudes de onda corta, mientras que la absorción atmosférica puede restar brillantez en las longitudes de onda grandes (Jensen 1996).

A pesar de esta perturbación en la mayoría de las investigaciones de percepción remota relacionadas con la cobertura de la Tierra, se ignora la corrección atmosférica. Esto puede deberse a que las señales provenientes del suelo, agua, vegetación y zonas urbanas son lo suficientemente fuertes y diferentes para que la atenuación atmosférica no distorsione la señal importante del terreno (Jensen 2006).

Por esta razón no se realizan correcciones atmosféricas a las imágenes utilizadas en esta tesis, ya que el objetivo es diferenciar las zonas boscosas de áreas urbanas u otros tipos de coberturas, sin interesarnos el valor original de la respuesta del terreno, ya que si se suma brillantez en las longitudes de onda corta se suma brillantez sobre toda el área de estudio, al igual que cuando se resta brillantez en las longitudes de onda larga se resta sobre todo el terreno. Por lo tanto no sería de mucha utilidad corregir por efectos atmosféricos.

Lo que si nos interesa saber es la variabilidad de la respuesta espectral de la vegetación para distinguir qué variables nos conviene utilizar con el fin de poder diferenciarla del resto de la imagen sin que los cambios estacionales influyan considerablemente.

1.5.2 Respuesta espectral de la vegetación.

Una de las principales características de la vegetación es que es un sistema vivo que esta continuamente cambiando, debido a ciclos estacionales o a cambios ambientales, por lo que se han estudiado cuidadosamente los procesos que se llevan a cabo cuando la vegetación es sana, sufre un cambio o cuando muere. Esto nos sirve para comprender los cambios que presenta la respuesta espectral cuando la cobertura vegetal de la tierra sufre un aumento o disminución en la densidad de cobertura vegetal.

El proceso se desarrolla de la siguiente manera: la radiación incidente Φ_i proveniente del sol interactúa con los pigmentos, agua, y espacios de aire intercelulares dentro de la hoja de la planta. La cantidad de flujo radiante reflejado (Φ_r), absorbido (Φ_α), y transmitido por la hoja es igual a la cantidad de flujo radiante incidente.

$$\Phi_{i_\lambda} = \Phi_{r_\lambda} + \Phi_{\alpha_\lambda} + \Phi_{\tau_\lambda}$$

que también se puede expresar como:

$$i_\lambda = r_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda$$

Donde r_λ es la reflectancia hemisférica espectral de la hoja, α_λ es la absorptancia hemisférica espectral y τ_λ es la transmitancia hemisférica espectral de la hoja. Esta relación se puede expresar como:

$$r_\lambda = i_\lambda - \alpha_\lambda + \tau_\lambda$$

donde la energía reflejada por la superficie de la hoja de la planta es igual a la energía incidente menos la energía absorbida directamente por la planta para la fotosíntesis u otros propósitos, más la cantidad de energía transmitida directamente a través de la hoja o sobre otras hojas o bien hacia el terreno (Jensen 2000).

Cada molécula absorbe o refleja en una longitud de onda característica. Las moléculas de una planta verde común han evolucionado de tal manera que absorben muy bien longitudes de onda en la región del visible (0.35 - 0.7 μ m), estas moléculas son llamadas pigmentos y se encuentran dentro de los cloroplastos donde se lleva a cabo la fotosíntesis,

la clorofila es la más importante de éstos, y es esencial para el proceso de la fotosíntesis (fig. 1.7). Captura la luz de las regiones violeta, azul y roja del espectro y la transforma en energía química mediante una serie de reacciones, este pigmento es el que domina para darle la coloración verdosa, ya que tiene una baja absorción la región del verde y amarillo (comparada con la luz azul y roja).

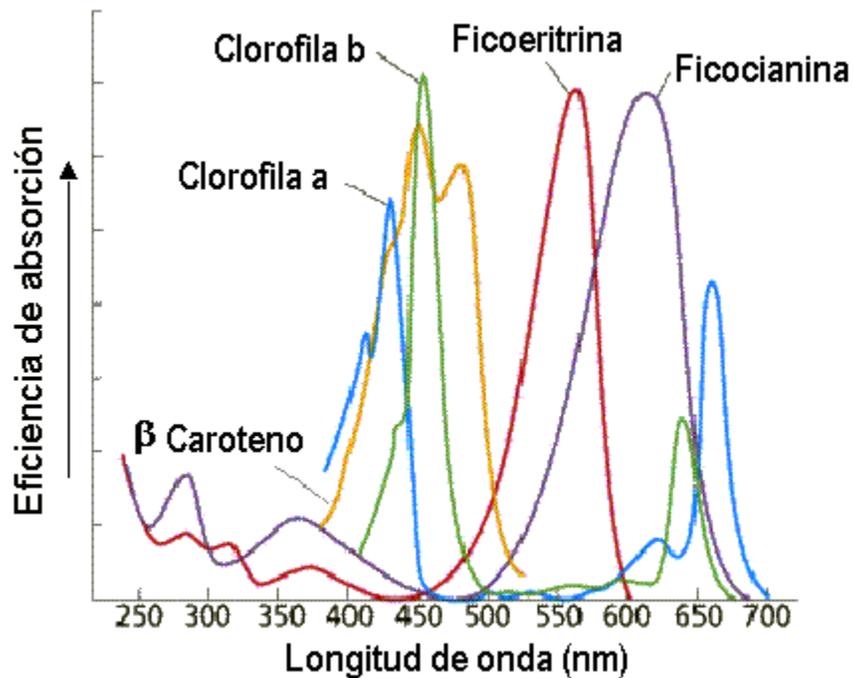


Fig. 1.7 Espectro de absorción de pigmentos importantes (Curtis y Barnes 2000).

Otros pigmentos presentes en las plantas son el β -caroteno, la ficoeritrina y la ficocianina, entre otros. En la figura 1.7 se observa que el espectro de absorción del β -caroteno absorbe principalmente en la región del azul. La ficoeritrina absorbe principalmente la luz verde y la ficocianina absorbe la luz roja y verde.

Cuando la vegetación experimenta el proceso de senescencia los pigmentos de clorofila disminuyen permitiendo que los carotenos y otros pigmentos sean dominantes. Por ejemplo, en el invierno, la producción de clorofila cesa, causando una coloración amarilla en el follaje de los árboles debido a los carotenos y otros pigmentos específicos (Jensen 2000).

Cuando una planta está bajo tensión y/o decremento en la producción de clorofila, la falta en la pigmentación de la clorofila típicamente causa que la planta absorba menos radiación en dichas bandas de absorción. Tales plantas tienen una reflectancia mucho mayor, particularmente en la porción verde y roja del espectro, y por lo tanto se ven amarillentas (Jensen 2000).

La respuesta espectral de la vegetación sana se muestra en la siguiente figura, con las respectivas bandas del sensor Landsat 7:

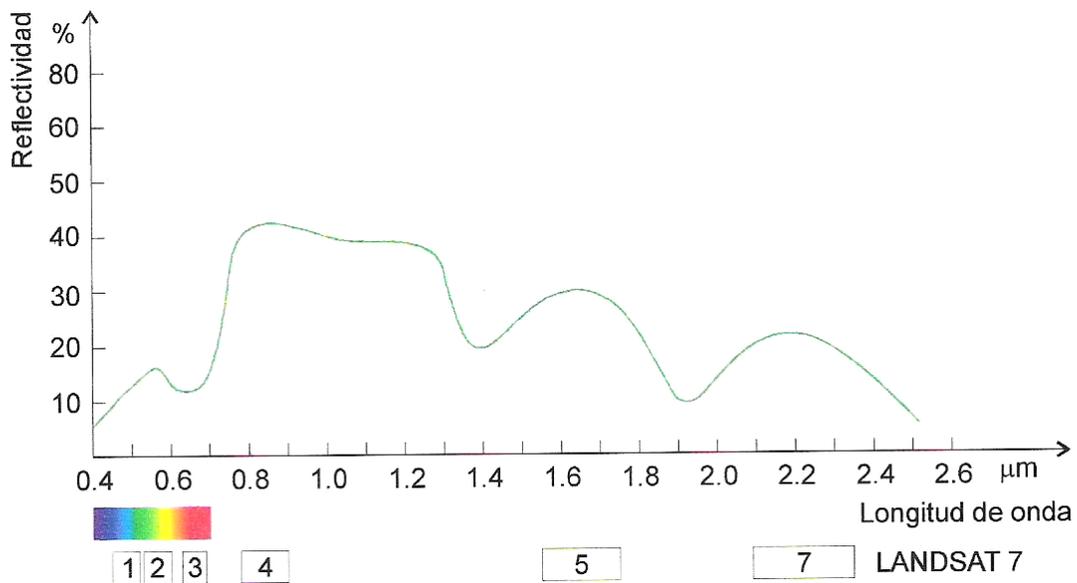


Fig. 1.8 Respuesta espectral de la vegetación (Lira 2006)

Esta respuesta es dominada por la presencia de hojas sanas, sin embargo las hojas de los árboles presentan ciertas condiciones dependiendo de la estación del año. Jensen (2000) muestra las diferentes etapas que sufre una hoja de *Liquidambar styraciflua* L. (sweetgum tree), con su respectiva respuesta espectral (fig. 1.9).

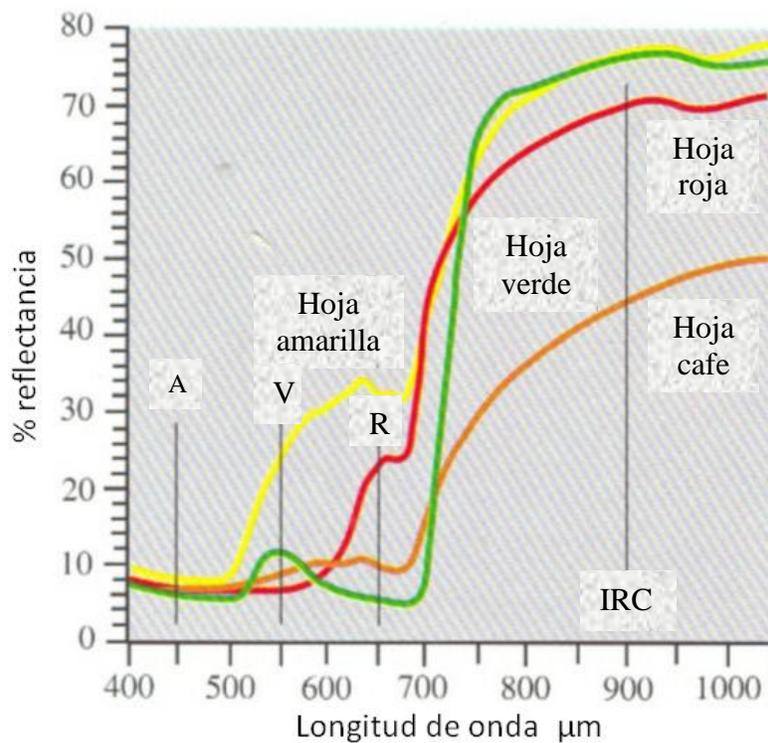
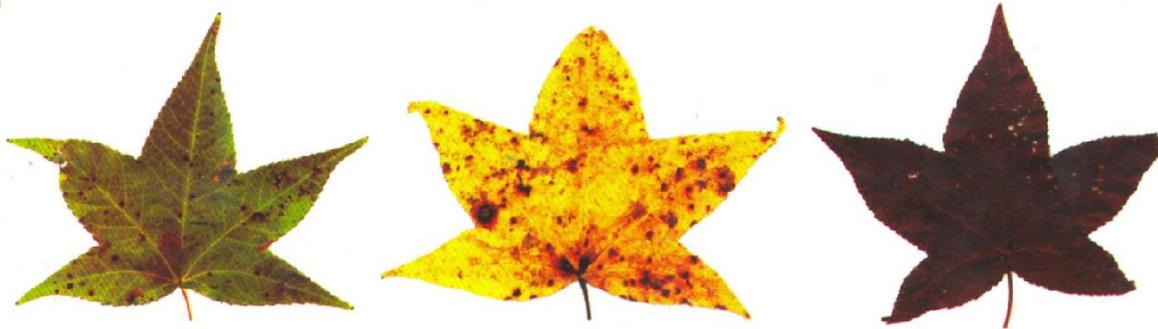


Fig. 1.9 Etapas de la vegetación (Modificada de Jensen 2006)

La hoja verde indica que aun se encuentra fotosintetizando produciendo un espectro de reflectancia sano típico con fuertes bandas de absorción en las regiones azul y roja, y un pico en la reflectancia en la región del verde y una alta reflectancia en el infrarrojo cercano.

La hoja amarilla se encuentra en estado de senescencia, por lo que hay una disminución en los pigmentos de clorofila, y se reflejan relativamente grandes cantidades de luz verde y roja. La hoja amarilla refleja menos flujo radiante en el infrarrojo cercano que una hoja

verde sana. Sin embargo, la reflectancia en el infrarrojo cercano a 900 nm (banda 4 del TM) es muy similar a una hoja verde sana.

La hoja café oscuro produce una curva de reflectancia espectral con una respuesta baja en azul, verde, y rojo. Esta combinación produce una apariencia café oscura. La reflectancia en el infrarrojo cercano también disminuye.

La vegetación presente en el valle de México también presenta ciclos semejantes al ejemplo anterior, en especial la vegetación caducifolia, cuyo estado depende de la estación en la que fue adquirida la imagen y de las condiciones climáticas que se presentaron en cada año.

Estas variaciones en la vegetación crean confusión cuando se realizan los bitmaps, ya que dependiendo de las especies que se encuentren en los bosques la respuesta espectral variará año con año.

Este tipo de variación influye notablemente en los resultados, a pesar de que la variable canónica textura depende del arreglo espacial de los pixels, como se muestra en el capítulo 3, esta variable nos ayuda a minimizar esta variación aunque no lo hace por completo, ya que el modelo de texturas discrimina las zonas de textura suave como pueden ser los pastizales, zonas agrícolas, entre otras.

Para estudiar la morfología del cambio en zonas boscosas en el Valle de México se adquirieron imágenes Landsat cuyas fechas se detallan en la tabla 1.2. En la tabla 1.3 se muestra la referencia espacial de todas la imágenes.

Tabla 1.2 Fecha de adquisición de las imágenes

Fecha	Estación
7 de marzo de 1989	Invierno
24 de mayo de 1991	Primavera
21 de noviembre de 1993	Otoño
14 de enero de 1996	Invierno
20 de febrero de 1998	Invierno
23 de febrero de 1999	Invierno
1 de abril del 2001	Primavera

Tabla 1.3 Referencia espacial de las imágenes

	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	X [m]	Y [m]	X [°]	Y [°]
Esquina superior izquierda	432231.00 E	2171187.00 N	99°38'46.92" W	19°38'4.94" N
Esquina inferior derecha	559141.50 E	2083236.00 N	98°26'19.05" W	18°50'24.60" N

Las imágenes que se ilustran posteriormente muestran una composición en falso color RGB de las bandas 7, 4 y 3, se elige esta combinación porque la banda 7 nos da información del contenido de humedad de la vegetación, una alta reflectancia en la banda 4 nos indica que la vegetación es sana así como una reflectancia baja en la banda 3 indica que aun se encuentra fotosintetizando, la combinación de estas bandas nos da como resultado una coloración verde para la vegetación sana, tonos morados para la ciudad y tonos rojos para los suelos secos. En las imágenes se puede ver que el estado de la

vegetación varía notablemente en cada estación, en especial la imagen del 21 de noviembre de 1993, la cual muestra una aparente mayor cobertura vegetal comparada con el resto de las imágenes.

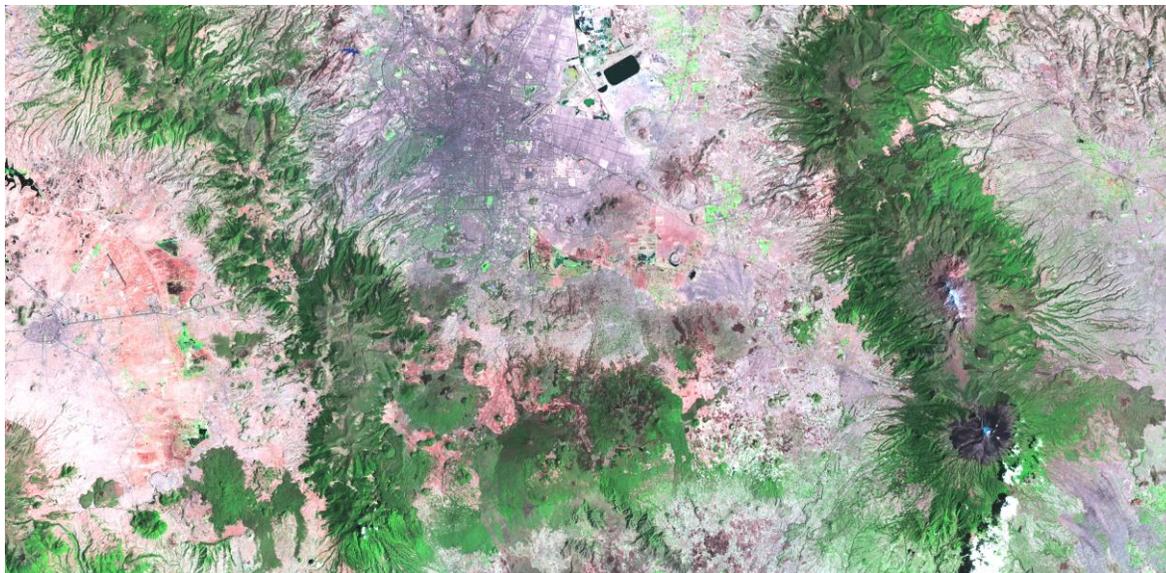


Fig. 1.10 Imagen del 7 de marzo de 1989 (invierno).

0 30 Km

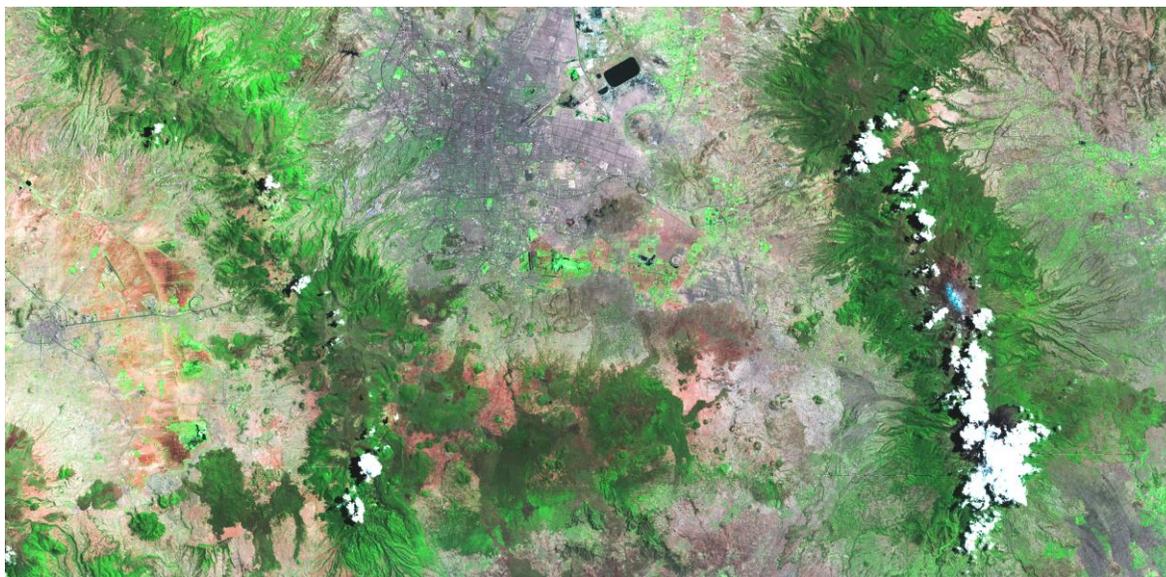


Fig. 1.11 Imagen del 24 de mayo de 1991 (primavera).

0 30 Km

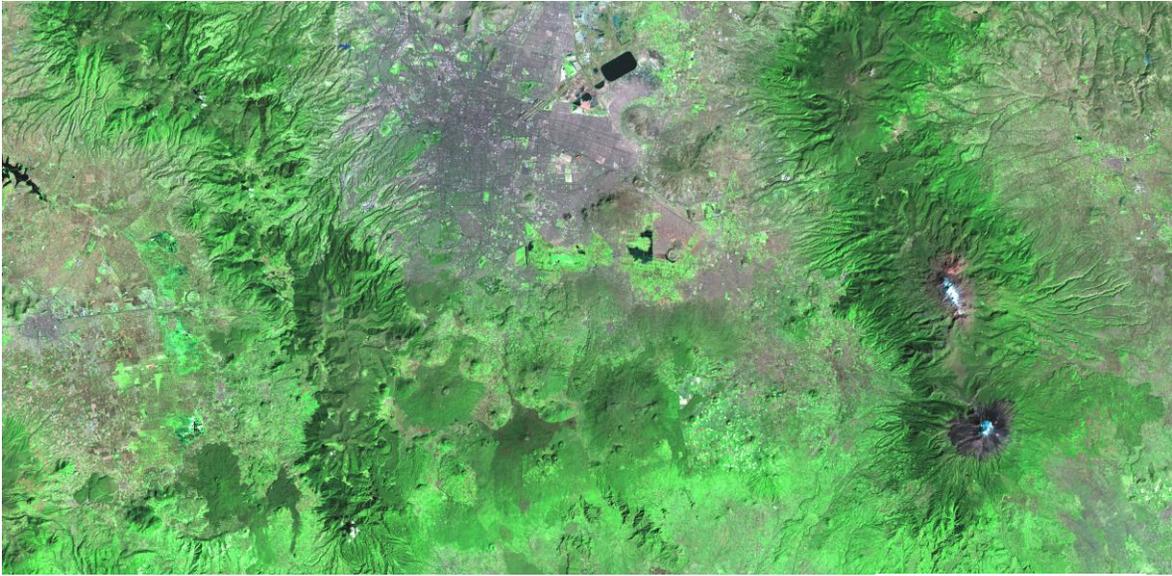


Fig. 1.12 Imagen del 21 de noviembre de 1993 (otoño).

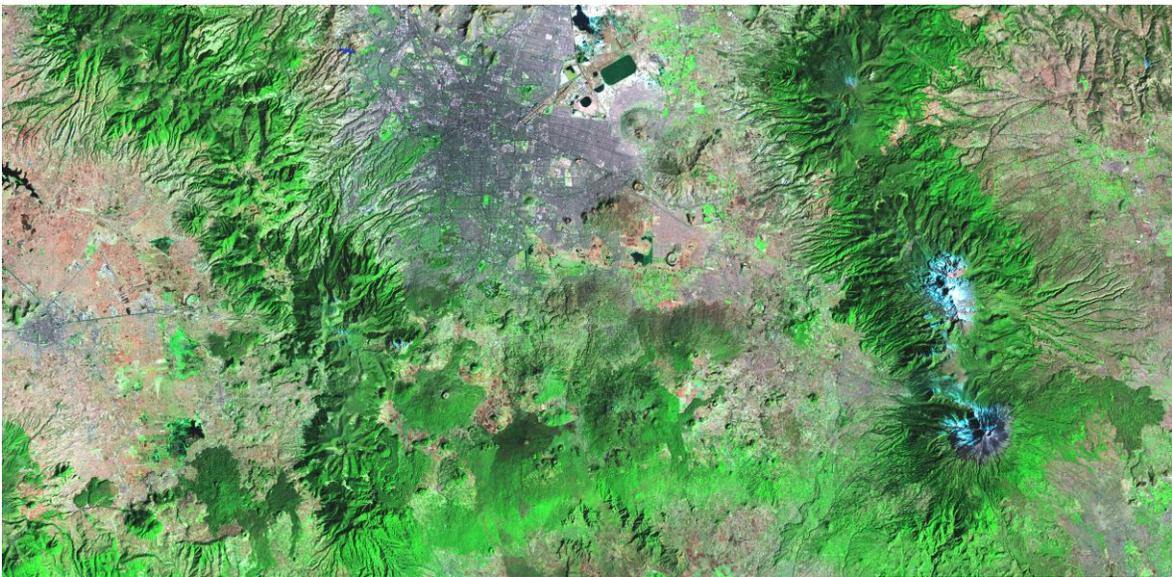


Fig. 1.13 Imagen del 14 de enero de 1996 (invierno).



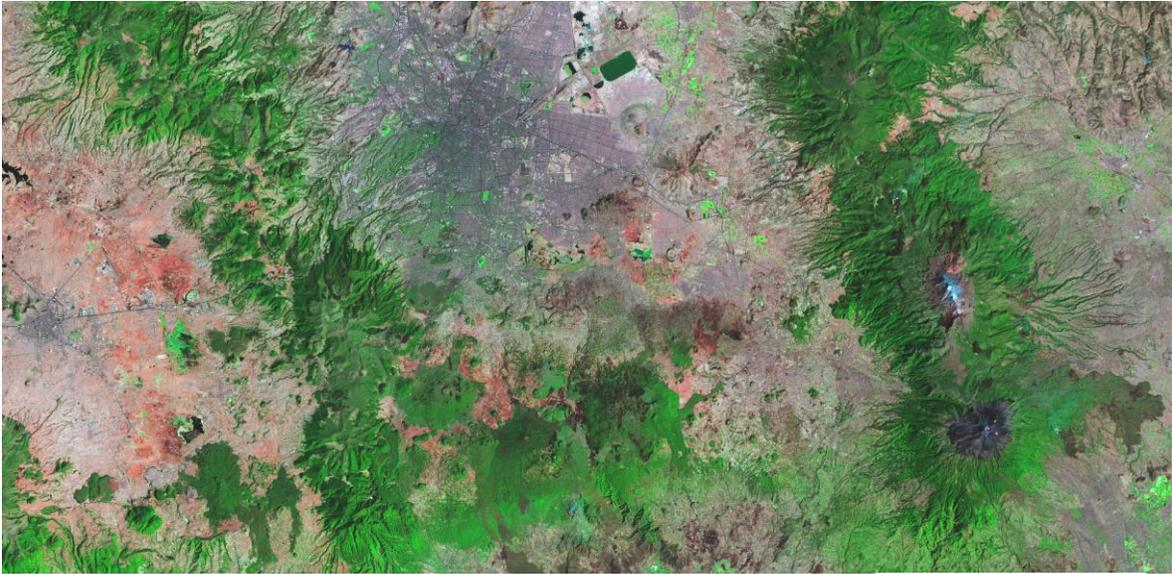


Fig. 1.14 Imagen del 20 de febrero de 1998 (invierno).

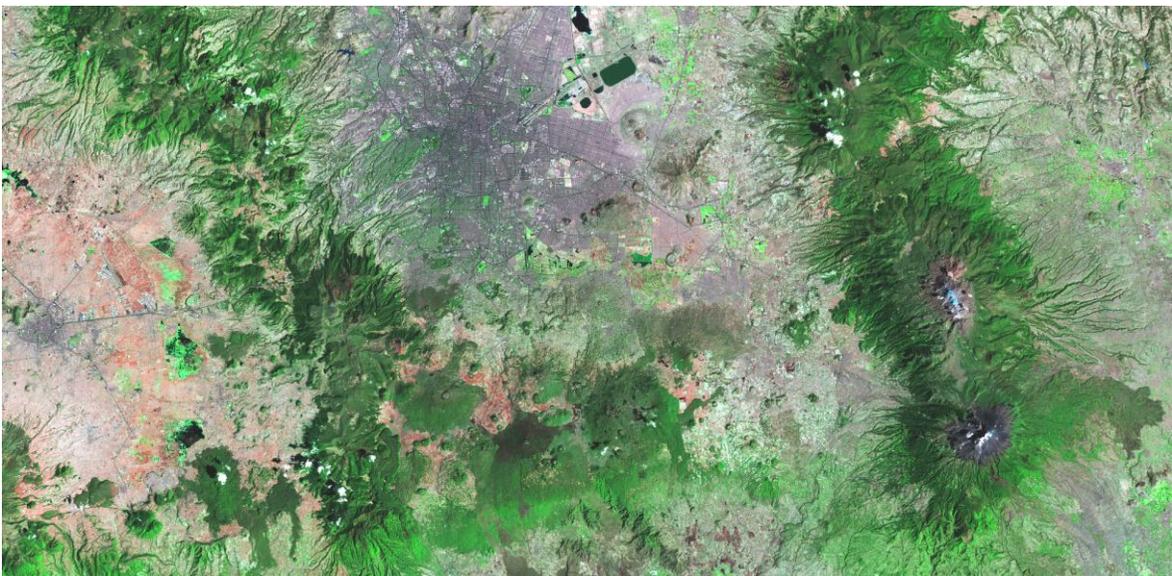


Fig. 1.15 Imagen del 23 de febrero de 1999 (invierno).



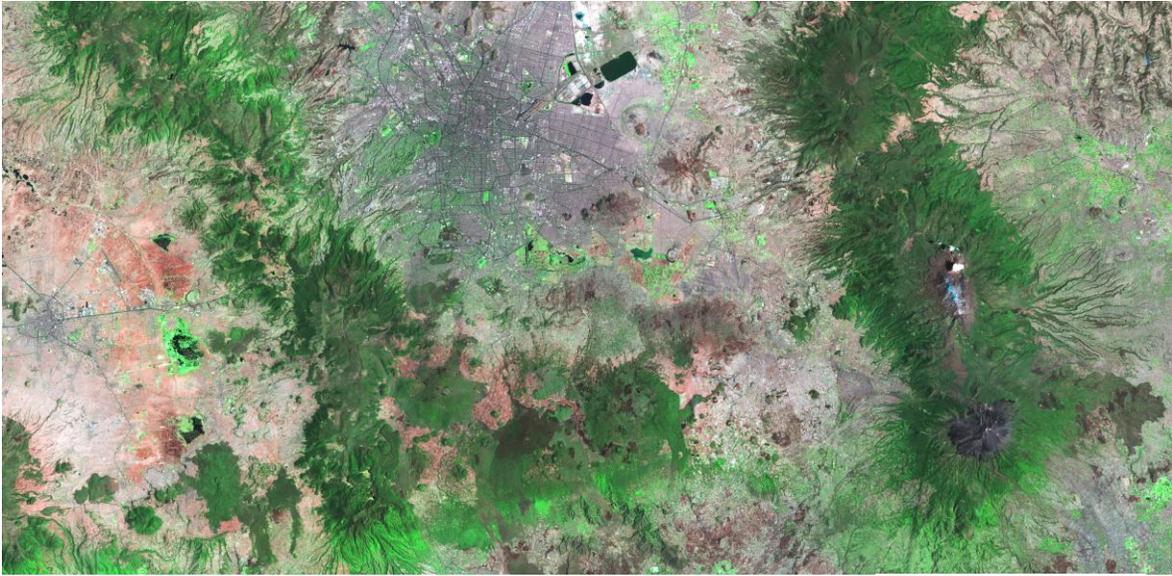


Fig. 1.16 Imagen del 1 de abril del 2001 (primavera).



Capítulo 2

DEFORESTACIÓN EN EL VALLE DE MÉXICO

2.1 Vegetación existente en el valle de México

Una de las principales características de la vegetación natural del valle de México es que siempre ha sido abundante y variada gracias a su ubicación geográfica, la cual se clasifica como intertropical, su clima es templado de altitud elevada, además las cordilleras circundantes crean un efecto aislante, sumado a esto los gradientes altitudinales y el mosaico geológico del cual está formado, crean un gran número de medio ambientes, frecuentemente caracterizados por distintos tipos de vegetación (Ezcurra *et al.* 2006).

Ezcurra *et al.* (2006) recolecta la información más importante acerca de la vegetación existente en el valle, tomando como referencia los trabajos de Rzedowski (1954, 1969, 1975, 1979, 2001) y Sanders (1976). A continuación se hace un resumen de la gran variedad de vegetación que puede estar presente en valle con sus respectivas características.

- Acuática y subacuática

Zona: Sistema lacustre.

La drástica reducción de los lagos ha causado la desaparición de muchas especies, permitiendo que especies exóticas, particularmente el lirio acuático, se vuelvan predominantes. La re-vegetación del lago seco de Texcoco permitió el establecimiento de hierbas y malezas halófilas.

- Halofitas

Estas especies se encuentran con frecuencia como pastizales bajos que crecen en suelos muy salinos y mal desecados. A una altura aproximada de 2200 m.

Con la desecación artificial del valle, actualmente su distribución se ha extendido a los antiguos lechos del lago. Esta vegetación está amenazada en parte por el crecimiento del área urbana, pero aún más por las descargas de aguas residuales, parte de las cuales tienden a acumularse en las áreas inferiores del valle.

Las asociaciones salinas de la cuenca muestran la fisonomía de un pastizal bajo y tupido. En estas comunidades vegetales predominan pastos que se propagan por estolones. También hay arbustos bajos como los romeritos (*Suaeda nigra*).

- Matorral xerófilo

Tierras bajas, en suelos profundos y delgados. Crecen alrededor de los 2250-2700 m. La precipitación es de 400-700 mm.

Se desarrollan en zonas relativamente planas y secas que rodean el sistema lacustre, incluida la región norte y en los pedregales.

Este tipo de vegetación incluye varias comunidades de arbustos, nopaleras, uña de gato, yuca o palma del desierto y la cenicilla; especies de zonas áridas. Su característica más distintiva es su fisonomía de matorral y las adaptaciones de las plantas a la aridez. En la parte sur del valle, esta vegetación aparece principalmente en un suelo que ha sido afectado por el flujo extensivo de lava que cubrió las faldas del Ajusco después de la erupción del volcán del Xitle. El área se conoce como el Pedregal de San Ángel.

En la parte inferior del Pedregal, hasta hace pocas décadas era común un matorral conocido como "el matorral de palo loco", esta comunidad se caracteriza por el palo loco, el tepozán, algunas especies de copal y gran cantidad de especies herbáceas, muchas de ellas endémicas, que han ido colonizando las formaciones basálticas irregulares.

Arriba de los 2800 m, pueden encontrarse pinos en depósitos de suelo sedimentario formados en las irregularidades de la lava. Los tepozanes, que son frecuentes en todo el pedregal, son indicadores de alteración ambiental; estos árboles son importantes colonizadores secundarios. Algunas especies, incluida una especie de orquídea y otra especie de cactus, son endémicas y están en grave peligro de extinción debido al

crecimiento de la ciudad. Actualmente el pedregal ocupa aproximadamente 3 km² de los 40 km² que tenía originalmente.

- Pastizales

Se encuentran distribuidos en diferentes ambientes con suelos superficiales o profundos, a una altitud de 2250 a 4300 m, la precipitación media es de 700-1200 mm

En muchos casos, los pastizales son comunidades secundarias que a la larga pueden ser sustituidas por árboles. En algunos casos coexisten con arbustos.

Hay pastizales en varias partes del valle de México. La más importante de estas formaciones es la de los pastizales de *Hilaria cenchroides* en el noroeste, cerca de Huehuetoca y Tepozotlán y también en las zonas bajas del Popocatepetl e Iztaccíhuatl.

- Matorral de encinos chaparros

Se encuentra en el pie de monte inferior, en limos arenosos. A una altura entre 2300 y 3100 m. La precipitación media es de 700-900 mm.

Probablemente una comunidad inducida por incendios. Los suelos de esas laderas son muy vulnerables a la erosión.

Se presenta en áreas semiáridas, existen evidencias de que esta comunidad es el resultado de la degradación de bosques de pino y encino.

Presente al noreste del valle en áreas semiáridas.

- Bosque de juníperos

Crece en la primera parte del pie de monte superior, se caracteriza por suelos arcillosos someros. La altura en la que se les puede encontrar es de 2400-2800 m. La precipitación media es de 600-800 mm. La temperatura se encuentra entre 11 y 14 °C.

Los bosques de juníperos son abiertos formados por arbustos o árboles bajos (menos de 6 m), probablemente comunidades secundarias. Debido a la baja cobertura del dosel, abundan las especies del sotobosque.

Estos bosques son comunes en el norte y este de la cuenca. Se desarrollan en laderas secas y planicies semiáridas. La especie dominante en estos bosques es el junípero (*Juniperus deppeana*), un árbol pequeño de cerca de 4 m de altura, con troncos verdes y jóvenes y pequeñas hojas escamosas. Según Rzedowski (1975), los bosques de juníperos han sido inducidos en muchos casos por la destrucción de bosques anteriormente existentes de pinos y encinos.

- Bosques de encino

Se encuentra desde el pie de monte superior hasta las serranías. Una silvicultura inadecuada ha reducido su área de distribución original. Los suelos son someros o profundos, y las heladas frecuentes. La altura en la que se desarrollan esta entre 2350 y 3100 m. La precipitación media es de 700-1200 mm.

Existe un gran número de especies, y su distribución sigue el gradiente altitudinal.

Sin embargo, los encinos forman frecuentemente bosques bajos, de 5 a 12 metros de altura, y por regla general constituyen manchones densos en el piso altitudinal inmediatamente inferior a los bosques de pino. En las extensiones basálticas del Pedregal de San Ángel, al sur de la cuenca, se encontraba un bosque mixto de encinos que ha sucumbido casi por completo con el avance del desarrollo urbano.

- Bosques de pino

Comunidades perennifolias, que crecen en suelos someros, rocosos o profundos en la serranía. La altitud a las que se les encuentra es de 2350-4000 m. La precipitación media es de 700 a 1200 mm.

La agricultura, el apacentamiento y la tala han alterado fuertemente estas comunidades.

Los pinos forman comunidades vegetales típicas de las laderas de las montañas que rodean la cuenca, especialmente en el sur.

Los pinos forman las comunidades más propensas a incendios forestales, a menudo provocados por pastores de ovejas entre febrero y abril.

Su distribución está altamente influenciada por el gradiente altitudinal.

- Bosques mesófilos

Son planicies aluviales elevadas. La altitud a la que se encuentran esta entre los 2500 y 3000 m. La precipitación es de 1000 mm aproximadamente.

Se encuentra en suelos profundos y zonas protegidas de vientos fuertes y heladas. Una gran proporción de su extensión original ha sido transformada en áreas de cultivo.

Los bosques mesófilos son una comunidad rara en el valle de México, que ocupa no más de 2 km² en toda la región. Este bosque se desarrolla en las cañadas y laderas protegidas de las pendientes inferiores del volcán Iztaccíhuatl y de la Sierra de las Cruces.

Su característica más importante es la abundancia de musgos y helechos, y de enredaderas leñosas que cubren las ramas y troncos de los árboles.

- Bosques de abeto (Oyamel)

Característicos de la serranía. Crecen en suelos profundos, bien desecados y fértiles a una altura entre 2700 y 3500 m. La precipitación de estos lugares es de 1000 a 1500 mm y la temperatura es de 7.5-13°C.

Son bosques densos, altos y perennifolios de 20 a 40 m de altura. Junto con *Pinus hartwegii*, estos bosques alcanzan el límite de la vegetación arbolada. Se utilizan para apacentar rebaños y para extraer madera.

Otros importantes componentes de esas comunidades son lo abedules, cedros blancos, encinos, oyameles o romerillos, sauces y capulines. El sotobosque es escaso, está formado por musgos y plantas umbrófilas.

2.2 Perturbaciones sobre la vegetación natural

La vegetación original, antes del inicio de la agricultura y en especial de la intervención de las civilizaciones azteca y teotihuacana, fue mucho mas abundante de lo que es ahora, sin embargo la ocupación humana que ha tenido por más de 7000 años ha traído como consecuencia un cambio en el medio ambiente, desde transformaciones de los sistemas naturales hasta la eliminación radical de ecosistemas completos con la extinción de especies y la degradación de zonas aledañas (Ezcurra *et al.* 2006).

En la actualidad la concentración humana de aproximadamente 18 millones de personas tiene múltiples consecuencias ecológicas sobre el valle, desgraciadamente el crecimiento urbano y demográfico continúan de forma semejante a otras grandes ciudades de países en desarrollo como Sao Paulo, Calcuta, Bombay, Buenos Aires, Río de Janeiro y Caracas. A diferencia de estas ciudades, en países industrializados como Canadá y Estados Unidos, se ha dejado de concentrar sus poblaciones en zonas urbanas (fig. 2.1).

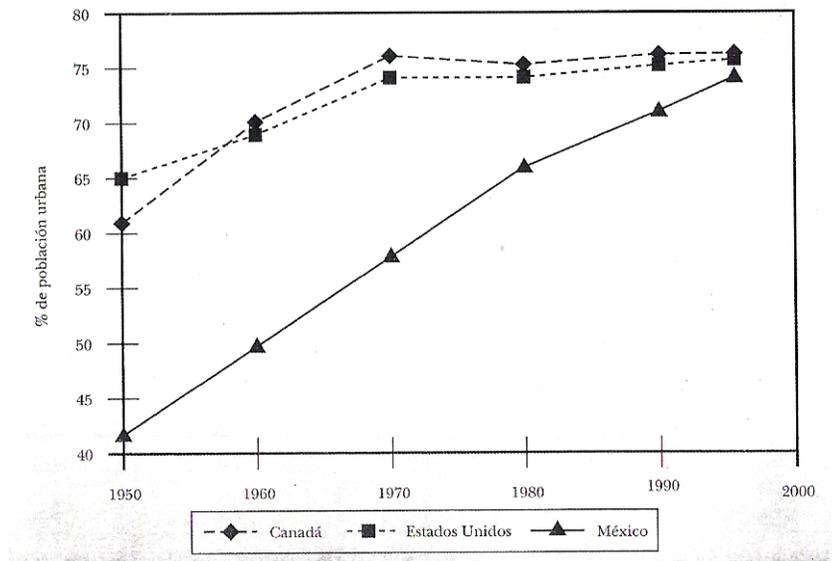


Fig. 2.1 Porcentaje de la población que vive en zonas urbanas en tres países de América del Norte (Ezcurra *et al.* 2006).

En las naciones no industrializadas, como México, el crecimiento urbano se ha concentrado en una o pocas ciudades gigantescas, frecuentemente llamadas “megapolis”

o “megaciudades”. Estas inmensas concentraciones urbanas han generado cierta preocupación en torno a su sustentabilidad a largo plazo (Ezcurra *et al.* 2006).

La presente tesis tiene como objetivo central medir el área, perímetro y dimensión fractal de las zonas boscosas de diferentes años (de 1989 al 2001), con se esto aporta una herramienta más para el estudio del medio ambiente del valle de México.

2.3 Tipos de Afectación

A continuación se resume el tipo de afectación que han sufrido los diferentes tipos de vegetación:

- Bosque mesófilo

Este tipo de bosque es el que menor área ocupa. A finales del siglo XX se encontraba principalmente en las pendientes occidentales más bajas del Iztaccíhuatl, así como en algunas de las pendientes orientales de la Sierra de las Cruces, sin llegar a ocupar más de 2 km². Se considera que este tipo de vegetación debe de haber estado mejor representada, y distribuida de manera más continua en el valle de México. Como consecuencia de la profunda alteración que ésta ha sufrido, los bosques mesófilos han desaparecido prácticamente.

- Bosques de abeto, pino y encino

Estos bosques de coníferas y encinos ha sido profundamente perturbados ya que han sido utilizados como fuentes de madera para construcción, producción de papel y como combustible. Aunque hoy sólo se encuentran manchones dispersos de diferentes tamaños, los encinos fueron muy abundantes en el valle.

Chapultepec localizado sobre una elevación de la Sierra de las Cruces era originalmente un bosque de coníferas con predominio de ahuehuetes (*Taxodium mucronatum*). Actualmente, sólo es parque de 230 hectáreas de las iniciales 438 que abarcaba el bosque original, y gran parte de ellas han sido invadidas por especies no nativas como el eucalipto (*Eucalyptus*), sin embargo en el 2005 el gobierno del Distrito Federal realizó un

saneamiento del bosque y una remodelación que incluyó la limpieza de los lagos artificiales, la remoción de árboles enfermos, la reforestación con especies nativas .

- Pastizales

Melo y Alfaro (2000) reconocen que actualmente hay tres tipos de pastizales en la cuenca: halófilos, inducidos y zacatonal de altura. Los primeros se desarrollan en las zonas donde la transformación de los cuerpos lacustres ha llevado a una acumulación de sales que restringe de manera importante el establecimiento de muchas especies. Por su parte, los pastizales inducidos han reemplazado a comunidades originales características de las partes bajas de las montañas y de planicies bajas. Los pastizales que se desarrollan arriba del límite de la vegetación arbórea pertenecen a las comunidades vegetales menos alteradas de la cuenca, Estas comunidades se conocen como zacatonal alpino y, en las laderas del Popocatepetl e Iztaccíhuatl, marcan el límite de vegetación definido por el gradiente altitudinal.

- Matorrales xerófilos

Se encuentra principalmente en el Pedregal de San Ángel sin embargo en menos de 20 años la vegetación original que cubría el flujo de lava casi desapareció, ahora solo queda menos de 3 km² del Pedregal original. Pueden hallarse pequeños manchones en algunas laderas e incluso en algunos jardines, pero la mayor parte se encuentra en el terreno del campus de Ciudad Universitaria.

Otra parte del Pedregal también fue declarada zona protegida llamado Parque Ecológico de la Ciudad de México. Como resultado, actualmente están protegidos manchones de bosques de encino abiertos y densos, así como algunos bien conservados de los característicos arbustos de palo loco (*Senecio praecox*) y de siempreviva (*Sedum oxypetalum*). Otros fragmentos, colonizados por tepozanes (*Buddleia spp*), o sólo cubiertos por basalto desnudo y escasas especies rupícolas capaces de colonizar la roca desnuda son también frecuentes en esta zona.

En la Sierra de Guadalupe sigue presente una pequeña representación de matorrales xerófilos naturales.

- Suelo agrícola

Las tierras agrícolas de la parte oriental de la cuenca se vendieron como resultado de una fiebre especulativa que se dio desde los años treinta. En el sur de la cuenca también aparecen continuamente nuevos barrios habitacionales en lugares que se utilizaban para la agricultura. Las haciendas de Coapa son un ejemplo.

El siguiente mapa tomado del Inventario Nacional Forestal Distrito Federal (www.cnf.gob.mx/emapas), muestran el tipo de vegetación presente en el área de estudio (fig. 2.2).

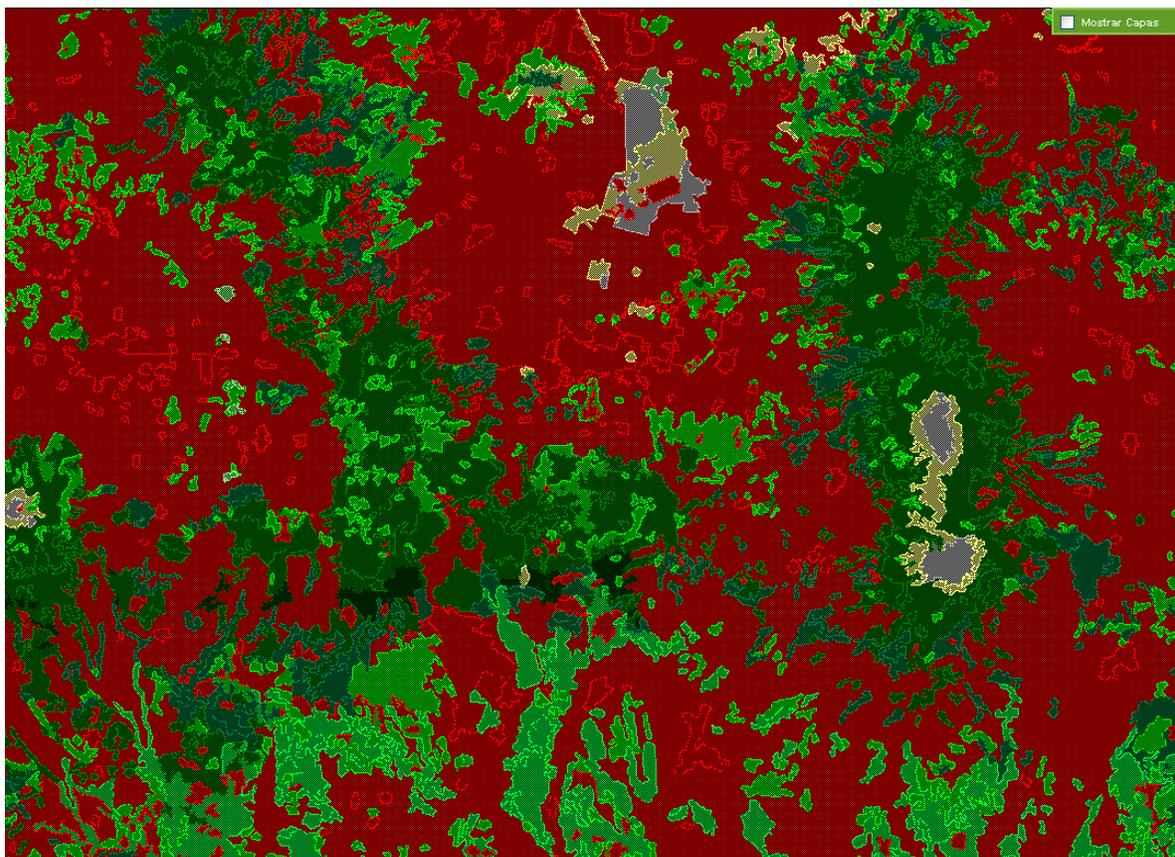


Fig. 2.2 Mapa de vegetación del área de estudio (INEGI 2000)

La referencia espacial del mapa (fig. 2.2) está en coordenadas UTM y es la siguiente:

Tabla 2.1 Referencia espacial para el mapa de INEGI (2000)

	x	y
Esquina superior izquierda	2733119.251m	856198.935 m
Esquina inferior derecha	2882981.869m	747081.088m

La asignación el tipo de uso de suelo que reporta INEGI en dicho mapa es el siguiente, aunque no todos ellos están presentes en el mapa:

	NO APLICABLE
	VEGETACION INDUCIDA
	MATORRAL XEROFILO
	VEGETACION HIDROFILO
	BOSQUE DE CONIFERAS
	SIN VEGETACION APARENTE
	BOSQUE DE ENCINO
	PASTIZAL
	ESPECIAL (OTROS TIPOS)
	SELVA CADUCIFOLIA
	SELVA ESPINOSA
	SELVA SUBCADUCIFOLIA
	BOSQUE MESOFILO DE MONTANA
	SELVA PERENNIFOLIA

El siguiente mapa es la carta de topografía del valle de México, en amarillo se distingue la zona urbana, en verde bosques, parques y reservas naturales; en azul algunos cuerpos de agua, también es posible identificar autopistas y avenidas principales (fig. 2.3).

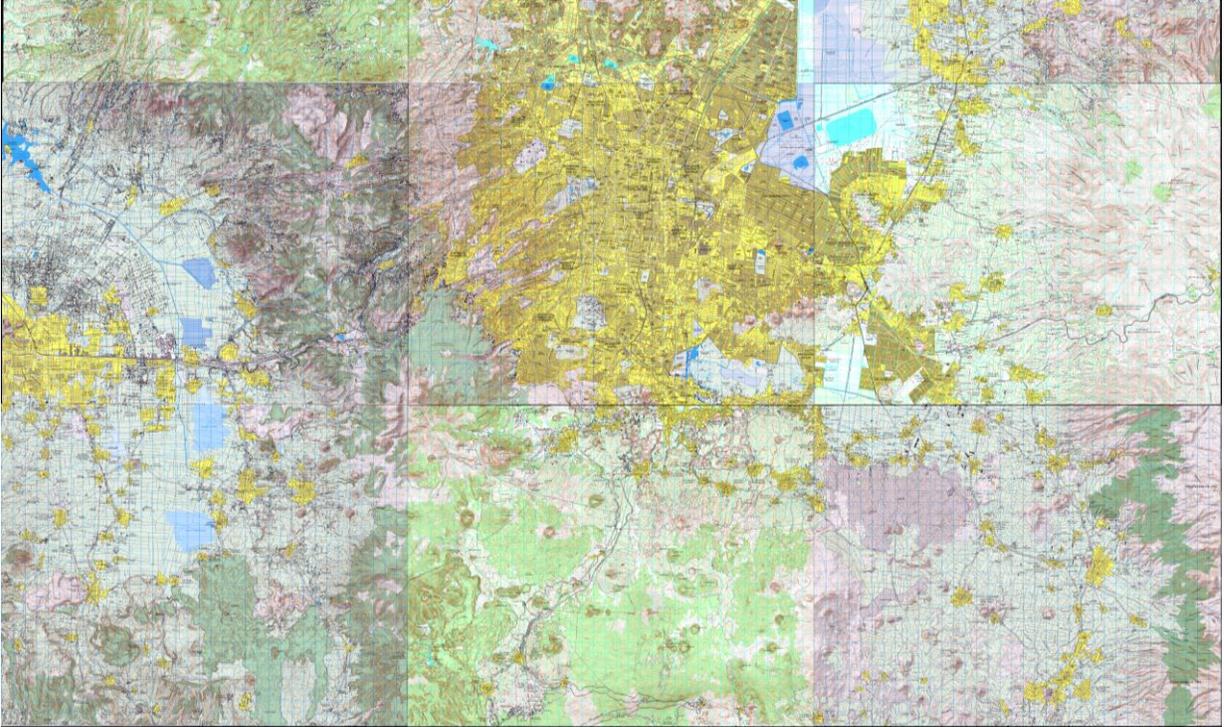


Fig. 2.3 Carta de topografía del Valle de México.

Capítulo 3

EXPANCIÓN CANÓNICA PARA MODELAR LA ZONA BOSCOSA

Cuando se realiza una descomposición en componentes principales el primer eje está orientado en la máxima dirección de dispersión de los datos, sin embargo puede darse el caso en el que las clases se mezclen entre si y sea difícil distinguirlas (fig. 3.1), existe una transformación semejante a esta en la que la separación de los clases se optimiza, este procedimiento está basado en el análisis canónico.

El primer eje de esta transformación está orientado de tal manera que las clases tienen la mayor separación (σ_A) posible de sus medias cuando son proyectadas en el nuevo eje, y tienen la menor varianza posible dentro de cada clase (σ_w) (fig. 3.2) (Richards y Jia 1999).

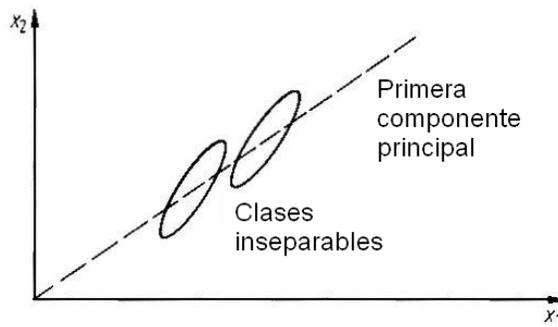


Fig. 3.1 Clases difíciles de distinguir con componentes principales.

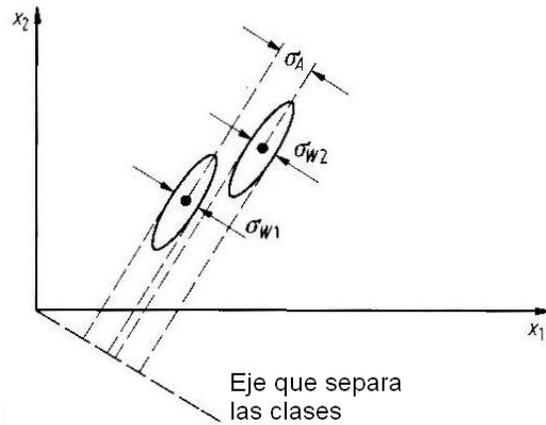


Fig. 3.2 Separación de clases mediante análisis canónico.

Los nuevos ejes o componentes son por definición ortogonales entre si y su correlación es cero, por lo que no se reduda en información. Se dice que estos ejes forman una expansión canónica. La representación de una imagen multiespectral está dada por:

$$g_i \ k,l = \mu_i^B + \sum_{j=1}^m a_{ij} X_j \ k,l$$

Donde $\mu^B = \mu_1^B, \mu_2^B, \dots, \mu_\gamma^B$ es un vector que representa la media de la imagen multiespectral $g = g_1, g_2, \dots, g_\gamma$ compuesta por γ bandas. Las funciones bidimensionales X_1, X_2, \dots, X_m son variables aleatorias de-correlacionadas con media cero. Las X_j son llamadas bandas generalizadas en términos de las cuales la imagen g es representada. Los coeficientes a_{ij} son funciones deterministas y k, l son las coordenadas de un píxel en la imagen (Lira 2002).

En esta tesis se eligen 3 variables con baja correlación entre si que se aproximan a una expansión canónica que modela la zona boscosa. Para esto es necesario tomar en cuenta las características más importantes que la describan; tres de ellas son: un albedo bajo, el vigor de vegetación de la zona boscosa es alto y tiene una textura rugosa, estas variables son independientes entre si, es decir, que no tienen relación una con otra, por lo que no

se redunda en información, este hecho nos ayuda a que las variables se aproximen a una expansión canónica.

En seguida se describen las características de cada una de las variables; para el albedo se utiliza la primera componente principal, para el vigor de la vegetación se utiliza la banda verdor de la transformación Kauth-Thomas y para la textura se usa la divergencia de las tres primeras componentes principales.

A continuación se explica cómo se descompone una imagen en componentes principales, posteriormente se discute la transformación Kauth-Thomas y finalmente se explica el concepto de textura por medio del operador divergencia.

3.1 Descomposición en componentes principales (DCP)

Cuando se tiene una gran cantidad de datos que de alguna manera están relacionados entre si, puede emplearse una técnica estadística llamada descomposición en componentes principales, la cual consiste en reducir el número de variables perdiendo la menor cantidad de información posible.

Las imágenes de satélite tienen cierto número de bandas, en nuestro caso el número de bandas corresponde al número de variables, el cual es de 6; en general existe una correlación entre estas, sobre todo cuando son contiguas, ya que una banda es adquirida para un cierto intervalo de energías y es de esperarse entonces que para intervalos cercanos o próximos la información correspondiente sea similar. En otras palabras, entre bandas contiguas existe una redundancia de información, que se traduce en que la matriz de covarianza de la imagen original tiene elementos diferentes de cero fuera de la diagonal (Lira 2002).

Esta redundancia en información puede evitarse si hacemos una transformación de tal manera que la correlación entre variables sea nula. Esto se logra de la siguiente manera:

Se define a la imagen multi-espectral original como $f(r)$ cuya matriz de covarianza se representa como K_f , a esta imagen se le aplica un operador A que actúa sobre el campo que forman los pixels de la imagen multi-espectral $f(r)$.

$$g(s) = A[f \ r]$$

La imagen de salida tiene una matriz de covarianza K_g , la cual debe ser diagonal, esto implica eliminar la redundancia de información o la correlación entre bandas, en otras palabras se dice que se reduce la dimensionalidad de la imagen multi-espectral, mediante el operador A .

$$K_g = AK_f A^t = \Lambda$$

A es una matriz unitaria, y sus renglones están compuestos por los eigenvectores de la matriz de covarianza K_f de las bandas originales. La matriz de covarianza de la imagen transformada K_g es una matriz diagonal cuyos elementos son los eigenvalores de K_f arreglados en forma decreciente.

Para obtener la matriz de transformación A se toma en cuenta que satisface la ecuación:

$$AK_f = \Lambda A$$

Y además se cumple que $\Lambda_{ij} = \lambda_i \delta_{ij}$, por lo tanto:

$$[K_f - \lambda_i I] \hat{e}_i = 0$$

$$|K_f - \lambda_i I| = 0$$

A los eigenvectores se les llama componentes principales y como los eigenvalores están arreglados de manera decreciente, entonces el contenido de información de la imagen es redistribuido entre estas componentes (o direcciones principales), de manera que la mayor información está concentrada en las primeras componentes o bandas de la imagen

de salida, mientras que en las restantes se tiene muy poca información y prácticamente todo el ruido en las últimas (Lira 2002).

La matriz de covarianza de la imagen original cuya dimensión es de M pixels por N líneas, está definida como:

$$K_f = \frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^{MN} f_i - \mu_f \quad f_i - \mu_f \quad ^t$$

donde t indica la transpuesta de la matriz columna $f_i - \mu_f$, y μ_f corresponde a la media de la imagen multispectral y se puede estimar con la siguiente relación:

$$\mu_f = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{MN} f_i$$

La dimensión de la matriz de covarianza es igual al número de bandas de entrada, representado como γ .

Para obtener los eigenvectores de la matriz de covarianza es necesario primero calcular los eigenvalores de la misma, esto se logra resolviendo la ecuación secular $|K_f - \lambda_i I| = 0$, donde I es la matriz identidad y λ_i son los eigenvalores. Al sustituir los valores de la matriz de covarianza en la ecuación secular se obtienen los eigenvalores y estos a su vez forman la matriz diagonal Λ .

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ & & \cdot & & & \\ & & \cdot & & & \\ & & \cdot & & & \\ 0 & 0 & & & & \lambda_\gamma \end{bmatrix}$$

Los eigenvectores satisfacen la ecuación $K_f \hat{e}_i = \lambda_i \hat{e}_i$, que es lo mismo que:

$$[K_f - \lambda_i I] \hat{e}_i = 0, \forall i = 1, 2, \dots, \gamma$$

Como $A_{ij} = e_i \cdot e_j$, se puede obtener los valores de e_i , considerando que $|\hat{e}_i| = 1$, con esto se tiene la matriz de transformación A, la cual al pre-multiplicarla por cada vector píxel de γ componentes obtenemos los valores del píxel en el nuevo sistema de referencia, con γ componentes.

Los elementos de la matriz de correlación $[R_f] = r_{mn}$ están dados por la siguiente relación:

$$\rho_{mn} = \frac{v_{mn}}{\sqrt{v_{mm} v_{nn}}}$$

donde los índices m y n van de 1 al número de bandas de la imagen multi-espectral y v_{mn} son los elementos de la matriz de covarianza K_f .

Para obtener la matriz de transformación A no es necesario calcular la matriz de correlación, sin embargo existen algunos autores que utilizan la matriz de correlación en lugar de utilizar la matriz de covarianza. Cuando utilizan esta matriz, se dice que las variables están estandarizadas o normalizadas.

Se puede calcular el porcentaje de la varianza σ^2 de las bandas resultantes de la transformación de la siguiente manera:

$$\% \sigma_q^2 = \frac{\lambda_q}{traza}$$

Esto quiere decir que se divide cada eigenvalor entre la traza de la matriz Λ , es decir, la suma de todos los eigenvalores. La varianza σ_q^2 es un vector de tantos elementos como bandas tenga la imagen multiespectral. Si la correlación entre las bandas originales es muy alta, los primeros elementos del vector σ_q^2 representarán el mayor porcentaje de información contenida en la imagen; y los últimos elementos de σ_q^2 representarán el menor porcentaje de información, es decir prácticamente el ruido de la imagen, por lo

tanto la esta transformación también separa la información del ruido de la imagen (Lira 2002).

Para las imágenes Landsat TM 4, 5 y 7 de siete bandas, la dimensionalidad intrínseca es de aproximadamente 3. Esto quiere decir que la mayor parte de la información de la imagen estará concentrada en las tres primeras componentes principales. Por lo que para algunos procesos es suficiente utilizar solo estas tres primeras componentes, ya que contienen la mayor parte de información, haciendo más óptimos los procesos ahorrando tiempo y minimizando los cálculos, como es el caso de la obtención de la divergencia, del cual se hablará más adelante.

Otro hecho importante es que el primer eigenvector describe la mayor parte de la variabilidad del conjunto de datos y puede ser interpretado como una medida de la variación del albedo (Galvao *et al.* 1995). Por lo tanto la primer componente principal nos puede ayudar a distinguir zonas donde la cobertura sea vegetal, ya que esta se caracteriza por tener un albedo bajo.

El bajo albedo de la vegetación se debe a que absorbe mucha radiación en las bandas 1, 2, y 3, aunque en las bandas 4, 5 y 7 tenga una reflectancia alta, la razón del flujo radiante reflejado con respecto al que incide sobre la vegetación, integrado sobre todas las longitudes de onda del espectro electromagnético por unidad de ángulo sólido, sigue siendo menor que la del concreto y suelos descubiertos.

En la figura 3.3 se muestra la respuesta espectral de la vegetación y suelos descubiertos, para ejemplificar lo anterior.

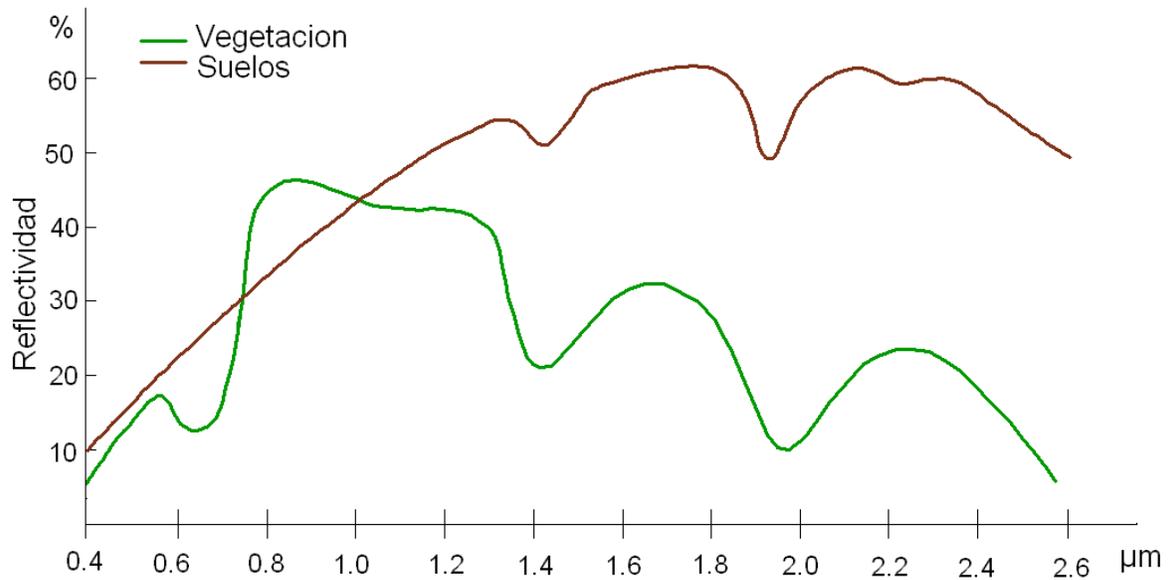


Fig. 3.3 Respuesta espectral de la vegetación y suelos descubiertos (Modificada de Lira 2006).

Sin embargo no es suficiente este parámetro para describir la vegetación, ya que algunos otros componentes de la imagen tienen igualmente un albedo bajo, como pueden ser los cuerpos de agua, las sombras y algunos flujos piroclásticos que se encuentran en la cima del volcán Popocatepetl, entre otros.

Se hizo una comparación entre la primera componente principal y la banda brillantez de la transformación Kauth-Thomas, sin embargo la primera componente mostró mejores resultados, en la figura 3.4 se muestra la primera componente principal de la imagen del 7 de marzo de 1989.

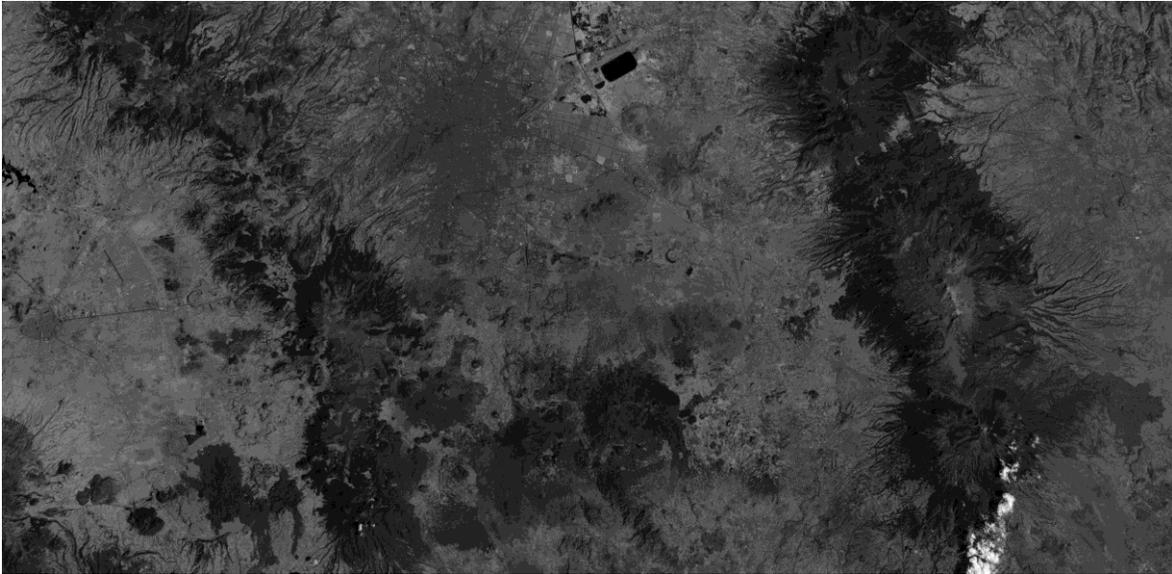


Fig. 3.4 Primera componente principal de la imagen del año 1989.

En esta imagen se puede ver que los suelos descubiertos tienen tonos claros indicando que su albedo es alto, así como la zona urbana y algunas nubes que se encuentran en la parte inferior derecha de la imagen, este contraste entre los diferentes tipos de cobertura nos ayudan a identificar entre las zonas que están siendo deforestadas ya que a medida que aumenta la deforestación la radiación reflejada aumenta porque la densidad de vegetación disminuye y el suelo queda expuesto. El valor del albedo se puede expresar entre cero y uno, o en valores de porcentaje, la siguiente tabla muestra algunos valores de albedo para ciertos tipos de cobertura:

Tabla 3.1 Albedo de algunos tipos de cobertura.

Tipo de cobertura	Albedo
Vegetación	0.1
Zona urbana	0.2
Suelo descubierto	0.3
Nieve	0.6

Al hacer el análisis visual de la figura 2.4 se puede observar que cuando el albedo de una zona es bajo no necesariamente indica que la cobertura sea vegetal, ya que los cuerpos de agua, las zonas de sombra y algunos tipos de roca tienen también un albedo bajo, por lo que es importante considerar las otras variables canónicas.

3.2 Transformación Kauth- Thomas

Una de las transformaciones más utilizadas para conocer el estado de la vegetación es la transformación Kauth-Thomas, la cual está basada en la técnica de ortogonalización secuencial Gram-Schmidt, la cual produce una transformación ortogonal de 4 bandas originales del sensor MSS, en un nuevo espacio de 4 dimensiones.

En la transformación se identifican 3 ejes importantes: el índice de brillantez de suelos (SBI) asociado con el albedo, el índice verdor de la vegetación (GVI) relacionado con el vigor de la vegetación y el índice de amarillez (YVI), que da una medida de la senescencia del cultivo. A la cuarta banda se le llama ausencia (NSI) y está asociada con efectos atmosféricos (Jensen 1996).

Estos índices pueden ser empleados para evaluar el estado de cultivos o para estudiar la cobertura vegetal de alguna región dada. Para las imágenes Landsat TM, la transformación Kauth-Thomas produce una imagen multi-espectral donde únicamente las tres primeras bandas contienen información significativa. Para estas imágenes las tres primeras bandas de la transformación reciben los nombres respectivos de brillantez, verdor y humedad (Lira 2002).

Los coeficientes calculados por Crist y Cicone (1984) son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Coeficientes de la transformación para imágenes TM.

	Banda TM					
Característica	1	2	3	4	5	7
Brillantez	0.33183	0.33121	0.55177	0.42514	0.48087	0.25252
Verdor	-0.24717	-0.16263	-0.40639	0.85468	0.05493	-0.11749
Humedad	0.13929	0.22490	0.40359	0.25178	-0.70133	-0.45732
4ª componente	0.84610	-0.70310	-0.46400	-0.0032	-0.04920	-0.01190

Los coeficientes de dicha transformación surgen de rotar los ejes originales de tal manera que el primer eje esté sobre la línea que forman los suelos en el espacio espectral (Línea que une los puntos A y B), como se muestra en la figura 3.5, el siguiente eje es perpendicular a esta línea portando información del contenido de vegetación, el valor de un pixel sobre este eje aumenta mientras más nos alejamos de la línea de suelo implicando una mayor cobertura vegetal (Puntos C, D y E). El orden de los ejes es establecido por las direcciones sucesivas de máxima variación (Jensen, 1996), el tercer eje es perpendicular a estos y nos da información del contenido de humedad del área de estudio.

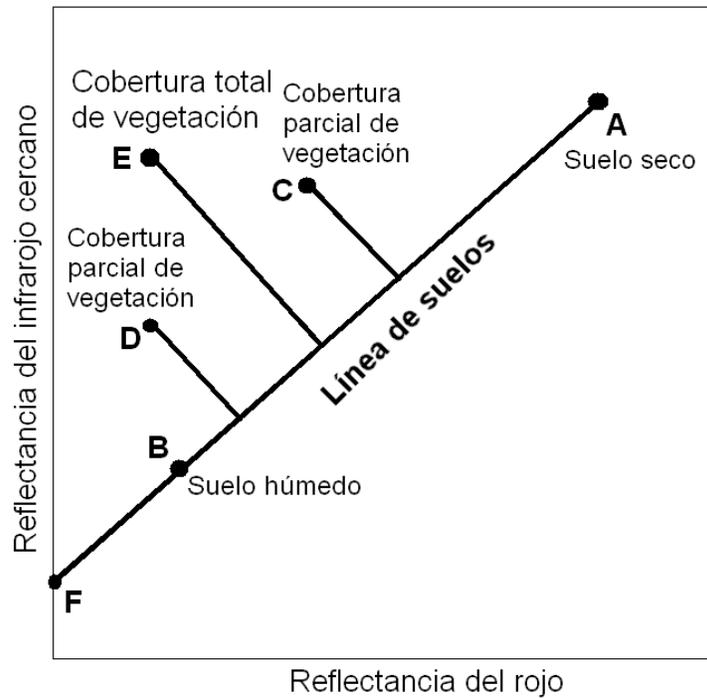


Fig 3.5 Espacio espectral de las bandas 3 y 4 del sensor TM (modificada de Jensen 2000).

En la figura 3.6 se muestra un histograma bidimensional de las bandas 3 y 4 del sensor TM de la imagen del año 1989. Haciendo un análisis de este histograma se encontró que la respuesta espectral de los bosques se encuentra por la zona del punto D de la figura 3.5.

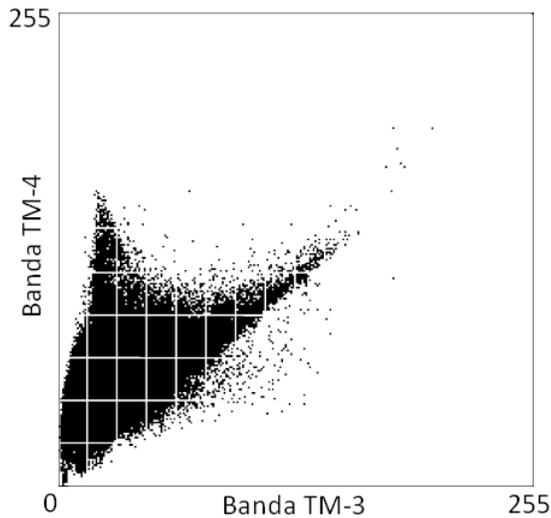
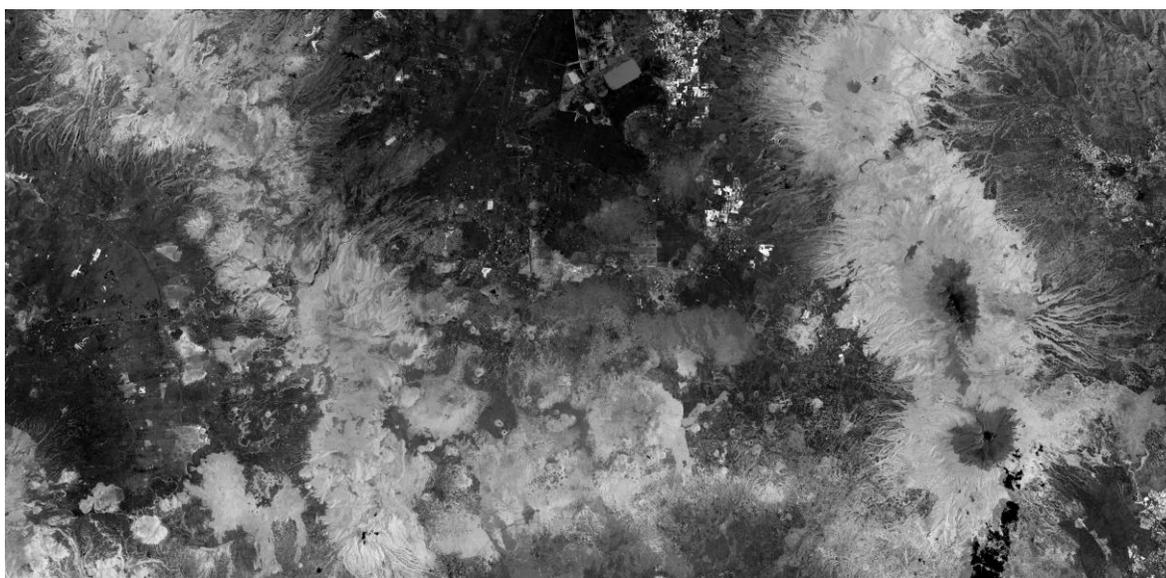


Fig. 3.6 Histograma bidimensional de las bandas 3 y 4 del sensor TM

Al realizar la transformación Kauth-Thomas, se obtuvo la siguiente banda verdor para la imagen del año 1989:



Vigor de vegetación bajo

Vigor de vegetación alto

Fig. 3.7 Banda verdor de la transformación Kauth –Thomas.

En esta imagen se puede ver que entre mas vegetación haya el tono es más brillante, además de que en esta variable los flujos piroclásticos que se encuentran en la cima del volcán Popocatepetl tiene valores totalmente diferentes a los de la zona boscosa, a diferencia de la variable albedo, en la que los tonos eran bajos al igual que la de los bosques creando confusión entre estos dos tipos de cobertura (fig. 3.8).

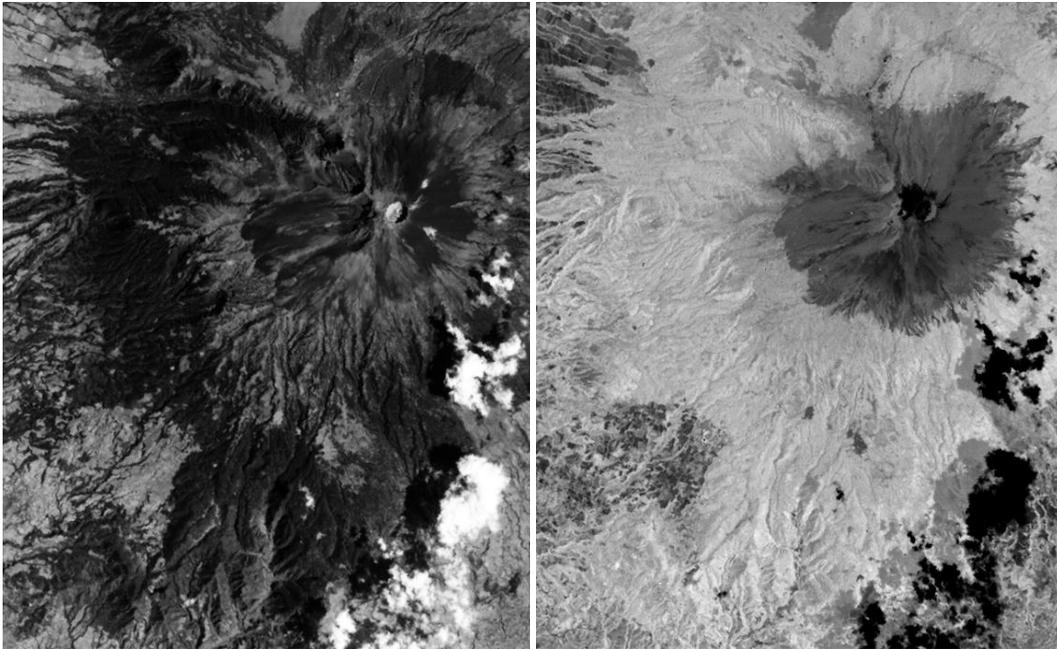


Fig. 3.8 Comparación de los resultados entre la primera componente principal (izquierda) y la banda verdor (derecha).

El uso de la variable verdor de la transformación Kauth-Thomas para describir el vigor de la vegetación nos ayuda a discriminar objetos que no se diferencian con la variable albedo, sin embargo aun existen ciertos tipos de cobertura que se podrían confundir con la zona boscosa, dos de ellos son las zonas agrícolas y los cuerpos de agua, ya que ambos tiene valores altos en la banda verdor y valores bajos en la primera componente principal (fig. 3.9 y 3.10).



Fig. 3.9 Banda verdor.



Fig 3.10 Primera componte principal.

En estas figuras se puede observar que las zonas de agricultura y algunos cuerpos de agua no cristalina tienen un valor alto en la banda verdor y un valor bajo en la componente principal 1, que representa el albedo, coincidiendo de esta manera con las características de las zonas boscosas. La tercera variable canónica nos ayudará a discriminar estos objetos mediante la textura de la imagen.

3.3 Textura

La tercera variable canónica corresponde a la textura de la imagen, por lo que se da una breve explicación del concepto de textura.

Generalmente la textura es observada en patrones estructurales de superficies de objetos como la madera, granos, arena, telas, entre otros objetos. La figura 3.11 muestra algunos ejemplos que corresponden a texturas de paja, tela y pasto (Brodatz 1966). El término textura se refiere a la repetición de elementos de textura básicos llamados *texels*. Un texel contiene varios pixels, cuya posición puede ser periódica, cuasi-periódica o aleatoria. Las texturas naturales son generalmente aleatorias, a diferencia de las texturas artificiales que son regularmente determinísticas o periódicas (Jain 1989).

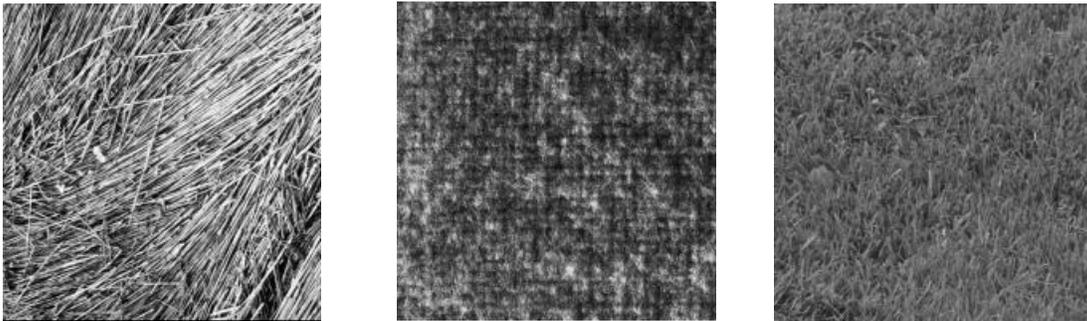


Fig. 3.11 Texturas de paja, tela y pasto.

En nuestras imágenes de satélite se observa que la textura de los diferentes tipos de cobertura varían notablemente, y aunque en algunos casos es aproximadamente aleatoria se observa que se repiten ciertas estructuras.

En el análisis de imágenes, existen modelos de texturas que están íntimamente relacionados con los modelos de rugosidad, de la siguiente manera, en un espacio de tres dimensiones (x, y, z) , en donde el plano x - y corresponde a las coordenadas de cada píxel y

el eje z a los valores digitales (DN) de una imagen mono-espectral, la superficie que se forma nos da una idea de la rugosidad de la imagen, diciendo que es suave donde los pixels cambian poco su valor y rugosa donde cambian abruptamente; esta rugosidad la podemos asociar con la textura de la imagen, además de esto la textura depende del arreglo espacial que tienen los tonos, y se distingue una zona de otra por tener diferente patrón espacial.

Existen diferentes modelos matemáticos que expresan la relación espacial entre pixels vecinos, estos modelos consideran las tres características básicas presentes en la textura de una imagen:

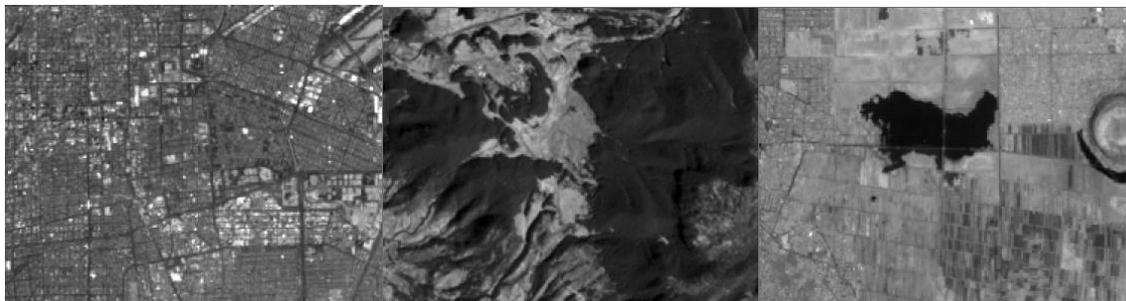
- 1.-Un cierto orden local se repite sobre una región que es relativamente grande comparada con el tamaño del orden.
- 2.-El orden consiste en un cierto arreglo de partes elementales.
- 3.- Las partes están compuestas de entidades aproximadamente uniformes, teniendo más o menos las mismas dimensiones dentro de la región de textura; dichas partes pueden ocurrir en cualquier dirección (Lira 2002).

Cabe mencionar que la textura depende de la escala a la que se observe la escena y es posible que una textura de cierta dimensión esté compuesta por varias sub-texturas.

Para medir la textura existen varios métodos en los que se considera la homogeneidad de los niveles de gris y el arreglo espacial de los pixels en una ventana, como por ejemplo la matriz de coocurrencia y sus descriptores (Contraste, Probabilidad Máxima, Homogeneidad, Entropía), los patrones locales binarios (LBP) (Ojala *et al.* 2002) y la dimensión fractal (Sarkar y Chaudhuri 1994, Vuduc 1997), entre otros; cabe mencionar que estos métodos trabajan con imágenes mono-banda. Sin embargo existe otro método que mide la textura considerando la característica multispectral de las imágenes de satélite mediante el operador divergencia (Lira y Rodríguez 2006).

En nuestras imágenes se observa que las zonas urbanas muestran ciertos patrones formados por calles y avenidas (fig. 3.12 a)). En el caso de las zonas boscosas (fig. 3.12 b))

la textura difiere notablemente de las zonas de agricultura y cuerpos de agua, como se observa en la figura 3.12 c), las cuales fueron tomadas de la primera componente principal de la imagen correspondiente al 1 de abril del 2001.



a) Ciudad b) Bosque c) Campos de cultivo y cuerpo de agua

Fig. 3.12 Texturas presentes en las imágenes multiespectrales.

Como se puede ver las imágenes con las que se cuenta están formadas de un mosaico de texturas, por lo que se probaron diferentes métodos para obtener el mejor modelo y de esta manera formar la expansión canónica.

3.3.1 LBP

Uno de los métodos probados es el de la clasificación de texturas invariantes a la escala de grises y a la rotación basándose en patrones locales binarios (LBP por sus siglas en inglés) (Ojala *et al.* 2002). El método consiste en reconocer que ciertos LBP, llamados “uniformes”, son propiedades fundamentales de la textura local de la imagen.

El operador detecta estos patrones “uniformes” el cual es invariante a la escala de grises y a la rotación. La importancia de este concepto es que la textura puede confundirse debido a una iluminación desigual de la escena o a una variación en la orientación, escala o apariencia visual (Ojala *et al.* 2002).

El operador detecta estos LBP en una vecindad circular de cualquier cuantización del espacio angular y a cualquier resolución espacial, la vecindad compuesta por P miembros

de radio R está denotado por $LBP_{P,R}^{riu2}$. El parámetro P controla la cuantización del espacio angular, mientras que R determina la resolución espacial del operador.

Para obtener la invarianza de la escala de grises, se sustrae el valor de gris del pixel central (g_c) a los valores grises de la vecindad circular simétrica. Para regiones constantes, las diferencias son cero en todas las direcciones. En un borde con pendiente suave, el operador registra la diferencia máxima en la dirección de gradiente y valores de cero a lo largo del límite y, para un punto las diferencias son altas en todas las direcciones.

Para la invarianza a la rotación, lo que hace el operador es rotar el conjunto vecindad en sentido de las manecillas del reloj. El operador se expresa como:

$$LBP_{PR}^{riu2} = \begin{cases} \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c) & \text{si } U LBP_{PR} \leq 2 \\ P + 1, & \text{otro caso} \end{cases}$$

Donde

$$U LBP_{PR} = \left| s g_{p-1} - g_c - s g_0 - g_c \right| + \sum_{p=1}^{p-1} \left| s g_p - g_c - s g_{p-1} - g_c \right|$$

Al aplicar este operador a la primera componente principal por contener el mayor porcentaje de información de la imagen del año 2001 se obtiene el siguiente resultado (fig. 3.13):

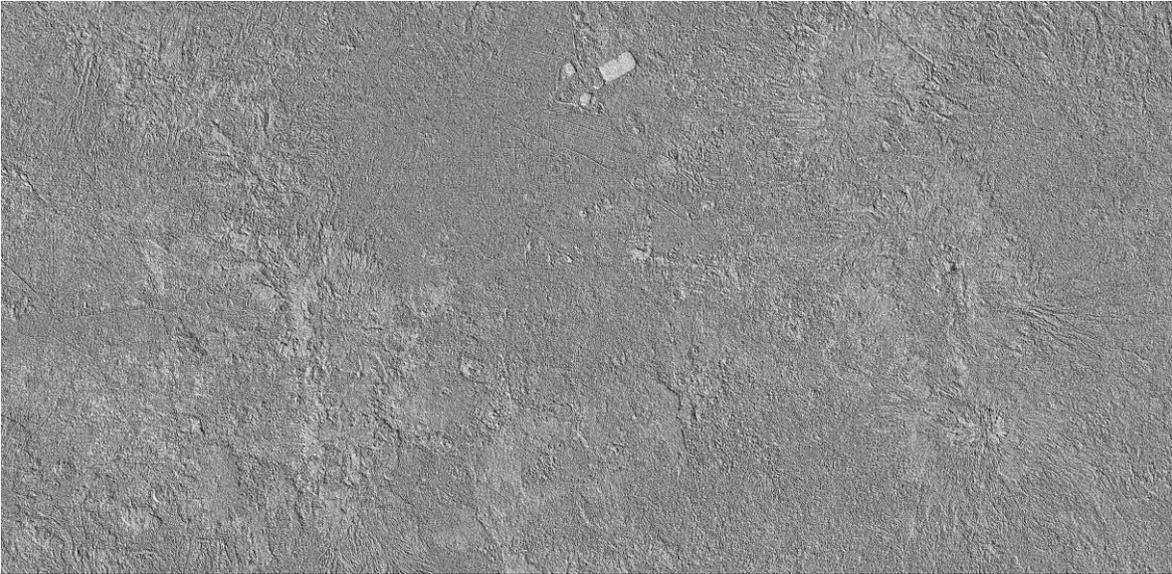


Fig 3.13 Textura utilizando LBP.

Para esta imagen se utilizó un radio de $R=1$ y $P=4$, sin embargo los resultados no son los esperados, esto puede deberse a que los patrones contenidos en la imagen no son totalmente uniformes como se espera que lo sean, además de que el algoritmo trabaja sobre cierto umbral el cual es establecido dependiendo del valor del pixel central de cada ventana, por lo que el contraste global de valores de gris de la zona boscosa, de la ciudad y suelos descubiertos se pierde a medida que el operador se vuelve invariante a la escala de grises en cada ventana.

También se aplicó dicho operador para los siguientes radios y número de elementos: $R=1$ y $P=8$, $R=1.5$ y $P=12$, $R=2$ y $P=16$, $R=3$ y $P=24$. Sin embargo los resultados no mejoraron, por lo que no se presentan dichas imágenes.

Otra desventaja de este operador es que solo se aplica a una imagen monobanda, perdiendo información de otras componentes o bandas, por lo que se concluye que este operador no es útil para el fin de esta tesis ya que no es un buen descriptor de la textura de nuestras imágenes multiespectrales.

3.3.2 Entropía, Homogeneidad y Contraste (Matriz de Co-ocurrencia)

Otra forma de obtener la textura de una imagen es mediante los descriptores entropía, homogeneidad y contraste, los cuales se calculan mediante la matriz de co-ocurrencia.

La matriz de co-ocurrencia es un histograma bidimensional de niveles de gris para un par de pixels (pixel de referencia y pixel vecino) que están separados por una relación espacial compuesta en algunas direcciones del código de Freeman. Esta matriz se aproxima a la distribución de probabilidad del conjunto de pares de pixels.

Dicho en otras palabras la matriz de co-ocurrencia nos indica cuantas veces ocurren los vectores formados por los niveles de grises en una ventana de cierto tamaño.

La matriz de co-ocurrencia consta de un solo elemento distinto de cero cuando la textura de la ventana es completamente uniforme, es decir todos los pixels tienen el mismo valor. A medida que la textura se hace heterogénea, aparecen más elementos diferentes de cero en la matriz. El número y distribución de elementos es un reflejo del tipo de textura, por lo tanto la matriz de co-ocurrencia proporciona una medida de la heterogeneidad de la textura (Lira 2002).

Para poder medir el contenido de información textural que tiene la matriz de co-ocurrencia se emplean los llamados descriptores, entre ellos se encuentran:

Contraste:

$$C_n = \sum_i \sum_j |i - j|^2 c_{i,j}$$

Homogeneidad:

$$H = \sum_i \sum_i c_{i,i}^2$$

Entropía

$$\mathcal{E} = - \sum_i \sum_j c_{i,j} \log [c_{i,j}]$$

Donde $c_{i,j}$ son los elementos de la matriz de co-ocurrencia.

Se probaron estos descriptores, sin embargo el descriptor contraste fue el que mostró mejores resultados con 178 niveles de gris, los otros contenían solo 2 y 5 niveles para los descriptores homogeneidad y entropía, respectivamente. El tamaño de la ventana de cada descriptor fue de 5x5, al aumentar el tamaño disminuía la calidad de la imagen resultante así como el número de niveles de gris.

En la siguiente figura 3.14 se muestra el descriptor contraste, en ella se puede observar que se resaltan los bordes, y que los niveles de gris de la ciudad tiene los valores más altos diferenciándose de la zona boscosa, la cual tiene tonos oscuros indicando que la textura es suave; algunas zonas de cultivo tienen tonos semejantes a la de los bosques, esto puede deberse a que el descriptor contraste es una medida de la variación local en la imagen y es alta cuando la región local tiene un alto contraste en la escala espacial.

La textura de las zonas boscosas obtenida mediante este descriptor nos indica que la zona boscosa es una zona homogénea en la que los niveles de gris no varían tanto como en el área ocupada por la ciudad.

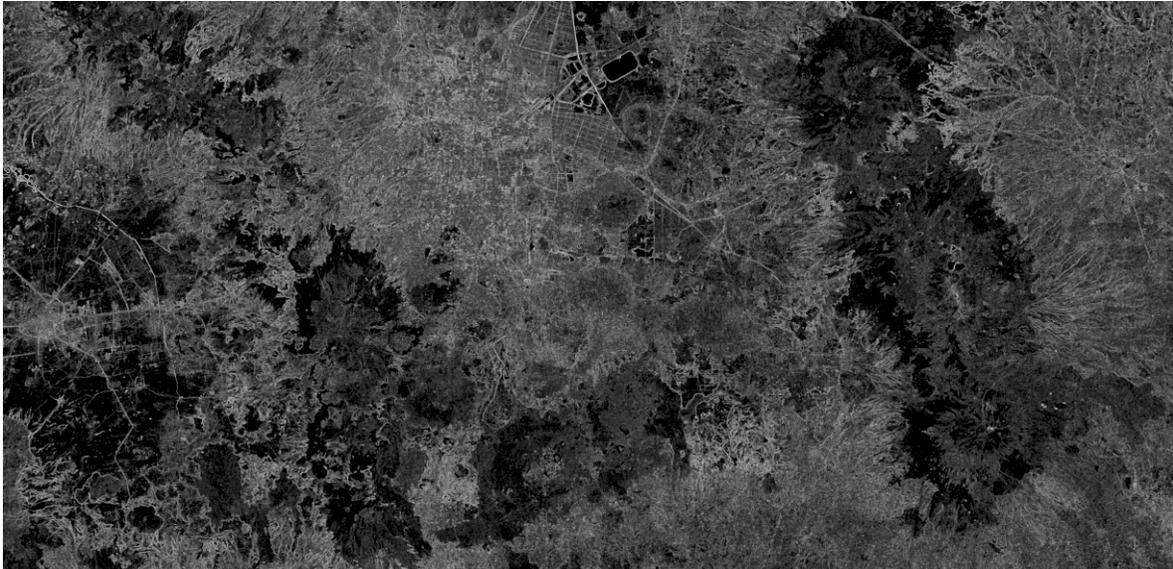


Fig. 3.14 Descriptor contraste aplicado a la primera componente de la imagen del año 2001.

Analizando cuidadosamente la textura de los bosques se puede ver que en la composición en falso color RGB de las componentes principales 3,1 y 2, en donde los bosques muestran tonos rosas, no es totalmente homogénea, sino que tiene variaciones locales, las cuales no se distinguen claramente en los tonos de gris de la primera componente principal (imagen central), es decir, su textura no es totalmente suave; por lo que estamos perdiendo información al usar una sola banda o componente, como se ve en la imagen derecha, en la que el descriptor contraste indica que la textura es suave para la zona boscosa, ignorando las variaciones que hay dentro de la zona boscosa, las cuales le deberían dar una textura rugosa.

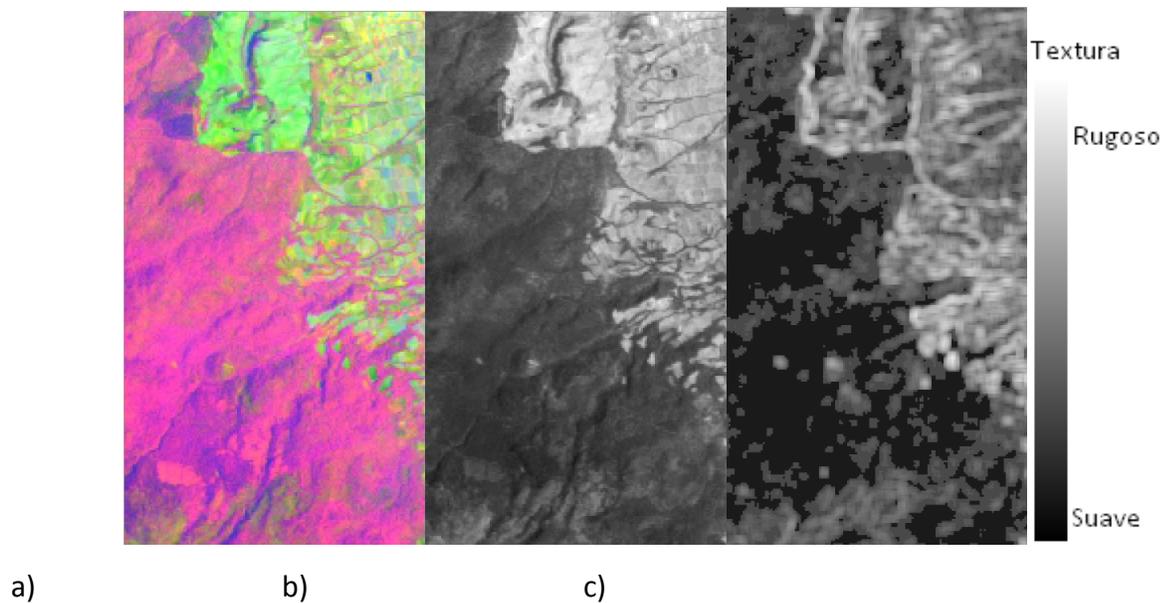


Fig. 3.15 En a) se ve una composición en falso color RGB de las componentes principales 3, 2 y 1, la figura b) muestra una porción de la primera componente principal y en c) se encuentra el descriptor contraste.

3.3.3 Divergencia

A diferencia de los operadores anteriores la divergencia opera con imágenes multi-espectrales, es decir, utiliza toda la información de las bandas de la imagen multi-espectral o también trabaja con el número de componentes que sean necesarias para no perder información importante.

Este operador se calcula de la siguiente manera, primero se genera un campo vectorial η -dimensional, donde η es el número de bandas de la imagen. Cada pixel es un vector de η componentes, donde cada componente corresponde al nivel de gris de cada banda o componente, el conjunto de todos los vectores pixel de la imagen multi-espectral forman un campo vectorial, este campo vectorial se representa como $U = u(x_1, x_2, \dots, x_\eta)$, donde x_i es la i -ésima coordenada de un sistema cartesiano de coordenadas de un espacio euclidiano.

Por otro lado, las variaciones de flujo del campo vectorial están asociadas a cambios en la textura de la imagen, estas variaciones pueden ser medidas por medio del operador divergencia (Lira y Rodríguez 2006), que se define como:

$$\nabla \cdot U = \sum_{i=1}^{\eta} \frac{\partial u_{x_i}}{\partial x_i}$$

El flujo está dado por:

$$\phi = \nabla \cdot U$$

Que también se puede expresar como:

$$\phi = \int \int_S U \cdot \hat{n} \, da$$

Considerando un hipercubo de tamaño $\delta_{x_1} \delta_{x_2} \delta_{x_3} \dots \delta_{x_\eta}$, donde δ_{x_i} es el lado a lo largo de la dirección de la coordenada x_i . Como una primera aproximación, el flujo a través de los lados del hipercubo está expresada como:

$$\phi_{x_i} = \left[u_{x_i}(x_1, \dots, x_i + \delta_{x_i}, x_{i+1}, \dots, x_\eta) - u_{x_i}(x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_\eta) \right] \delta_{x_1} \dots \delta_{x_{i-1}} \delta_{x_{i+1}} \dots \delta_{x_\eta}, \quad \forall x_i$$

Por lo tanto el flujo está dado por:

$$\phi = \sum_{i=1}^n \frac{\partial u_{x_i}}{\partial x_i}$$

Cuando el flujo es nulo indica que la región es suave, ya que los pixels tienen valores similares formando un cúmulo en una pequeña región con densidad homogénea.

Cuando el flujo es positivo o negativo indica que la textura es rugosa y entre más rugosa sea mayor será la variación de flujo. Cuando el flujo es positivo la textura cambia de suave a rugosa y cuando es negativo cambia de rugosa a suave (Lira y Rodríguez 2006).

Si $u = \rho v$, la ecuación de continuidad para el hipercubo:

$$\frac{\partial^n \rho}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

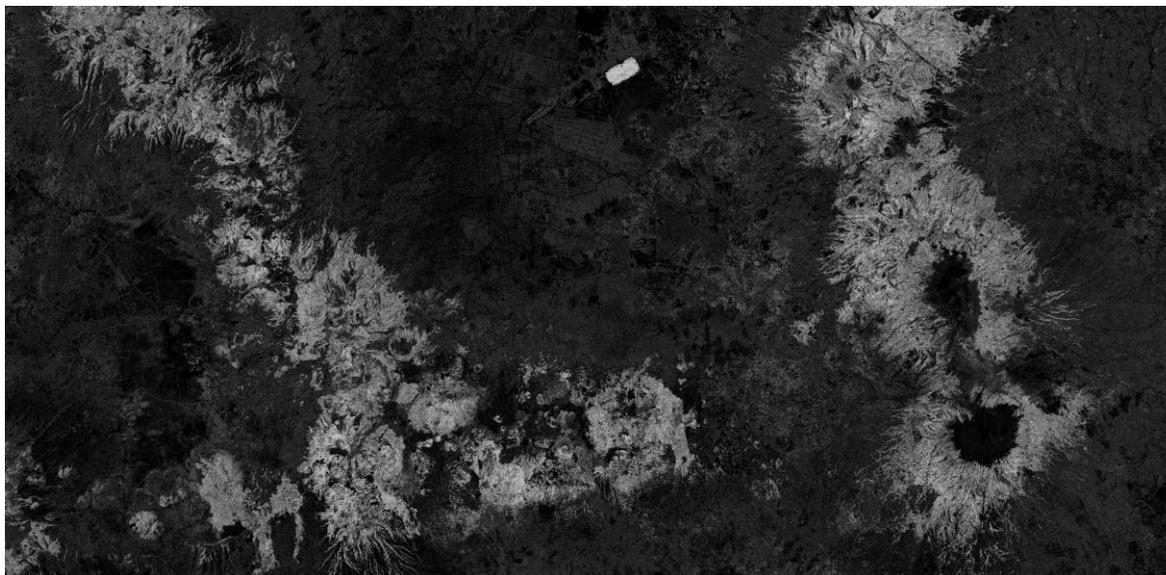
Establece que el flujo neto emergiendo del volumen resulta en un decremento de la densidad dentro del volumen, por lo que la densidad es un parámetro de rugosidad, cuando hay altos cambios de ρ se asocian a texturas rugosas; y bajos cambios de ρ están asociados con texturas suaves (Lira y Rodríguez 2006).

La siguiente imagen (fig. 3.16) muestra el resultado de haber aplicado el operador divergencia a las tres primeras componentes principales de la imagen del año 2001.

En esta imagen se observa que la textura de los bosques es rugosa debido a que toma en cuenta las variaciones en las tres componentes principales. Esta consideración nos ayudó a obtener la verdadera textura de las zonas boscosas, a diferencia del descriptor contraste, ayudándonos a diferenciarla de las zonas de agricultura, cuya textura va de intermedia a rugosa, sin embargo aquellos campos de cultivo que presentan una textura intermedia crean confusión con las zonas boscosas.

Otro objeto que creó confusión fue el cuerpo de agua Nabor Carrillo localizado al norte de la zona de estudio (fig. 3.16), este cuerpo de agua presenta una textura rugosa a pesar de que es suave, esto se debe a que los cuerpos de agua tienen una reflectividad muy baja

comparada con la superficie terrestre, entonces la razón señal/ruido es muy baja, por lo tanto la textura rugosa corresponde al ruido de la señal y no a la señal misma. Este problema no se presenta a medida que el contenido de sedimentos aumenta en los cuerpos de agua, ya que la razón señal/ruido aumenta (Lira y Rodríguez 2006).



Suave

Rugoso

Fig. 3.16 Divergencia de las tres primeras componentes principales de la imagen del año 2001.

En la siguiente figura se puede ver que la zona boscosa está bien representada por el modelo de texturas, sin embargo existen algunos campos de cultivo que tienen una textura intermedia al igual que algunas zonas de bosques (fig. 3.16).

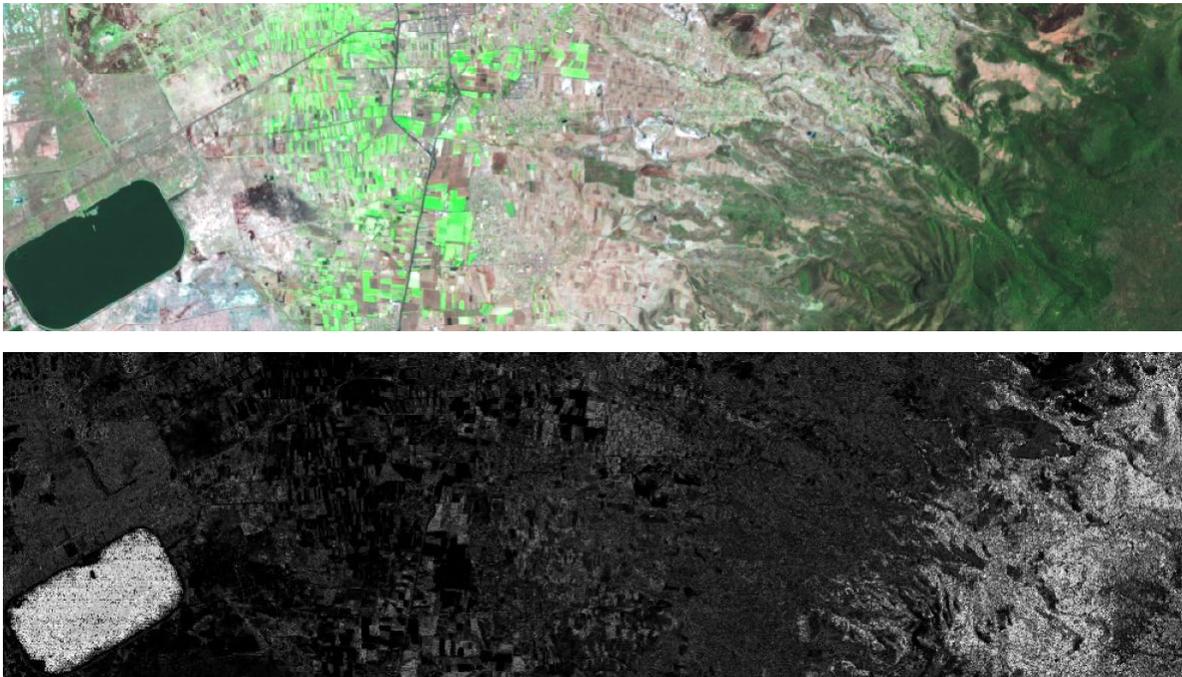


Fig. 3.16 Texturas de un cuerpo de agua, zonas de agricultura y bosques.

Este resultado crea un poco de confusión cuando se utiliza el algoritmo ISODATA para segmentar la imagen, sin embargo a pesar de estos inconvenientes el modelo de texturas mostró buenos resultados al identificar zonas deforestadas, ya que a medida que disminuye la cobertura de bosques la textura se va haciendo suave.

3.4 Segmentación de la zona boscosa del valle de México

Para segmentar las imágenes se utilizó el algoritmo ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques), el cual es un clasificador espectral puntual no supervisado que trabaja de la siguiente manera:

Se colocan arbitrariamente centroides iniciales (μ_n con $n=1,2,\dots$, etc.) dentro del espacio espectral que define la imagen, posteriormente se calcula la distancia de los pixels a los centroides iniciales asignándolos al de mínima distancia, con esto se generan cúmulos. Estos cúmulos no pueden exceder de cierta desviación estándar que es establecida por el usuario, de ser así el cúmulo es dividido y aumenta en una unidad el número de cúmulos, aunque también puede ocurrir lo contrario, que el cúmulo sea demasiado pequeño, que no contiene los suficientes pixels para formar un cúmulo (el número mínimo de pixels también es establecido por el usuario), en este caso el cúmulo se fusiona con otro y se disminuye en una unidad el número de cúmulos, por otro lado existe un número máximo de cúmulos que pueden ser aglutinados. Si los centroides se encuentran a una distancia muy corta, el cúmulo se fusiona, esta distancia es establecida previamente. Después de esto se calcula nuevamente el vector de media para cada cúmulo el cual se convierte en el nuevo centroide, y se repite el procedimiento de aglutinación, partición y reasignación del centroide hasta que las medias de los cúmulos coincidan con las del paso anterior, o también el algoritmo verifica si el número de iteraciones excede al prefijado. En caso negativo se repite el algoritmo (Lira 2006).

Para esta tesis los parámetros utilizados fueron:

Tabla 3.3 Parámetros para la segmentación de las imágenes

Parámetros utilizados	
Número de centroides iniciales	20
Número de muestras mínimas en un cúmulo	50
Máxima desviación estándar permitida	5%
Mínima distancia requerida entre cúmulos	1
Máximo número de pares de cúmulos que pueden ser aglutinados	5
Número de iteraciones permitidas	30

A partir de esto se obtiene la segmentación de la imagen utilizando como bandas de entrada las tres variables canónicas elegidas: primera componente principal, banda verdor de la transformación Kauth-Thomas y divergencia de las tres primeras componentes de cada imagen, el programa utilizado para realizar esta segmentación fue PCI Geomatics.

Las imágenes segmentadas de todos los años se realizaron utilizando los parámetros antes mencionados, aunque en algunos casos se aumentó el número de centroides iniciales debido a que existía confusión entre clases y que no se solucionaba al disminuir la desviación estándar.

Un ejemplo del resultado obtenido es la siguiente imagen (fig. 3.17), en la que se pueden diferenciar claramente las zonas boscosas (tonos azul oscuro) del resto de la imagen. A excepción del cuerpo de agua Nabor Carrillo que se encuentra al norte, la confusión de este cuerpo se debe a que coinciden los valores de las tres variables, es decir, tiene un bajo albedo, el valor de nivel de gris de la banda verdor y el de la divergencia es semejante a la de los bosques.

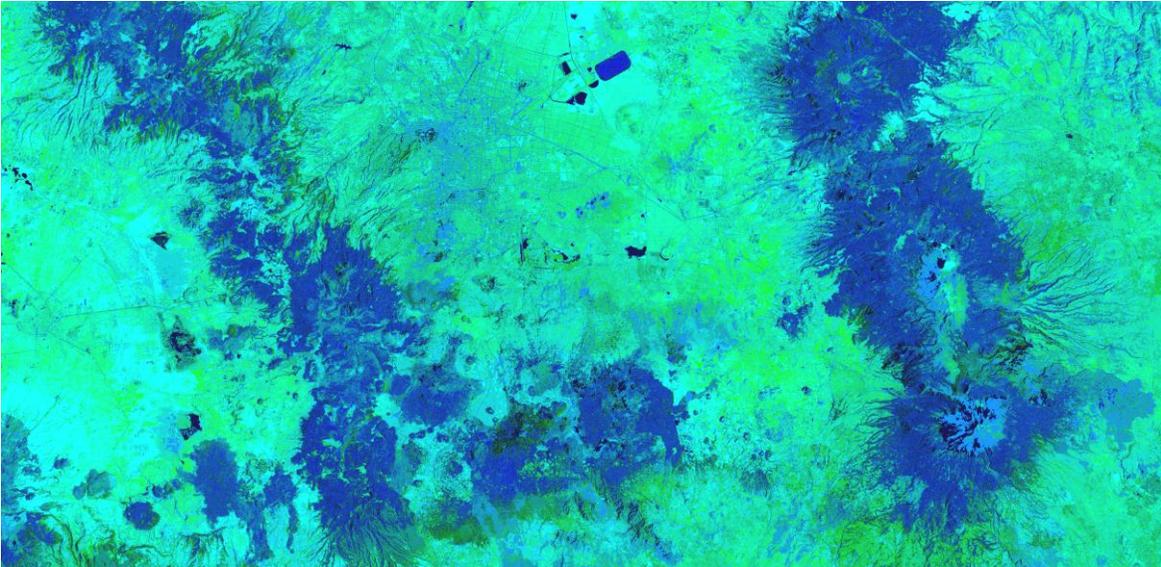


Fig. 3.17 Segmentación de una imagen multispectral.

A partir de esta imagen se asigna cada cúmulo a la clase de bosques o a la clase que contiene al resto de la imagen, como se explica en el siguiente tema.

3.5 Generación de Bitmaps

Un bitmap es una imagen binaria en la que se distinguen dos valores: unos y ceros, en el caso de esta tesis uno está referido a la región de interés, que son los bosques, y cero al resto de la imagen.

La importancia de realizar un buen bitmap radica en que al final del trabajo se cuantifica el área, perímetro y dimensión fractal de la zona boscosa. El procedimiento o la metodología que se siguió para cada imagen fue tomar como base la composición en falso color RGB de las bandas 4, 3, 2 y 7, 4, 3, además de mapas de INEGI correspondientes a la zona de estudio, para así distinguir las zonas boscosas de otros tipos de cobertura como la ciudad, los campos de cultivo, suelos descubiertos, cuerpos de agua y otros tipos de vegetación como pueden ser los matorrales, las halófitas y la vegetación acuática, entre otros.

Para poder generar los bitmaps a partir de las bandas originales de cada imagen se hizo lo siguiente:

- Se tomaron las 6 bandas de cada fecha (Banda 1, 2, 3, 4, 5, 7)
- Se les hizo una transformación Kauth-Thomas. De este proceso se tomo solo la banda verdor, la cual representa el vigor de la vegetación.
- Por otro lado se hizo una descomposición en Componentes Principales de las bandas originales.
- Se tomaron las 3 primeras Componentes Principales y se obtuvo su divergencia en 3-D, esto representa la textura de la imagen.
- Se toma la Primera Componente Principal para describir el albedo del área de estudio.
- Del proceso anterior se obtienen 3 imágenes: la Divergencia, la primera Componente Principal y la Banda verdor, las cuales se meten a un clasificador ISODATA.
- De la segmentación de imagen obtenida al aplicar el clasificador ISODATA, se hace una asignación de cada clase, dando el valor de 1 si corresponde a bosque y 0 si no lo es.

De esta manera se obtienen los bitmaps para cada año, el siguiente diagrama muestra este proceso (fig. 3.18).

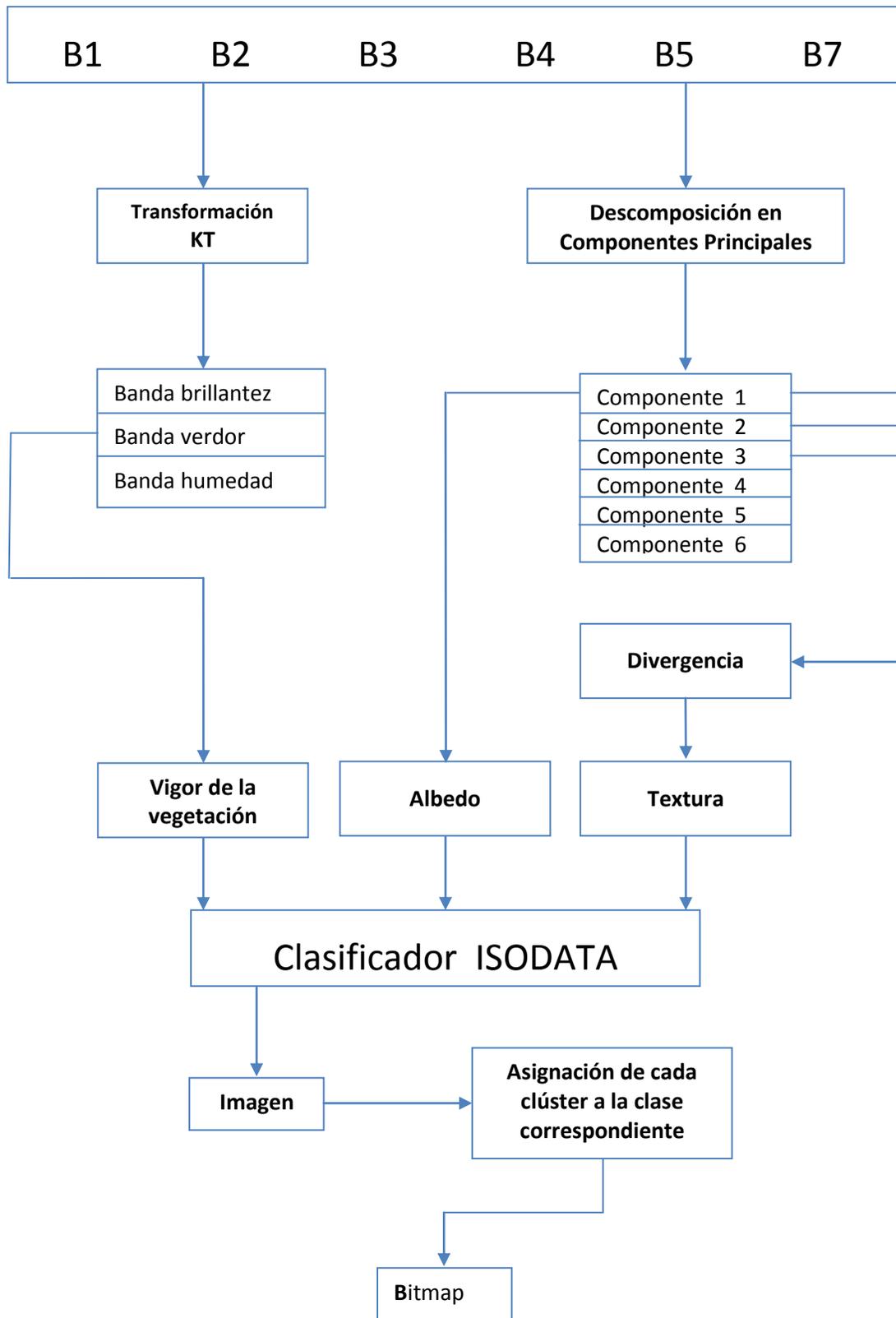


Fig. 3.18 Diagrama del procedimiento para generar bitmaps.

Capítulo 4

DETECCIÓN DE CAMBIOS

4.1 Métodos de detección de cambios

Los ecosistemas están cambiando continuamente, definiendo cambio como “una alteración en los componentes de la superficie de la cobertura vegetal” (Milne 1998) o como un movimiento espectral/espacial de una entidad de vegetación sobre el tiempo (Luna 1983). La razón de este cambio puede ser dramática y/o abrupta, por ejemplo por incendios o inundaciones; o puede ser sutil o gradual.

Generalmente se distingue entre la *conversión* de la cobertura, es decir, el reemplazamiento completo de un tipo de cobertura por otro; y *modificación* de la cobertura, es decir, cambios más sutiles que afectan el carácter de la cobertura sin cambiar su clasificación de conjunto. Las modificaciones en la cobertura son generalmente más prevalentes que la conversión de la cobertura de la tierra (Coppin *et al.* 2004).

Algunas modificaciones en el ecosistema son inducidos por el hombre, por ejemplo la tala de árboles por zonas agrícolas, sin embargo otros tienen origen en desastres naturales como inundaciones y epidemias.

Khorram *et al.* (1999) se concentró en el ambiente espacial en la que los cambios ocurren de la siguiente manera: “algunos cambios pueden afectar áreas enteras uniformemente e instantáneamente, mientras que otros pueden tomar forma de avances lentos o retrocesos de las fronteras entre clases y otros cambios pueden tener texturas espaciales muy complejas.” En el contexto espacial, Khorram *et al.* (1999) propone 4 tipos de cambio donde las entidades espaciales: (1) llegan a ser de una categoría diferente, (2) se

expanden, se reducen o alteran su forma, (3) cambian su posición, y (4) se fragmentan o colisionan.

Sin embargo no todos los cambios pueden ser detectados y es probable que algunos cambios de interés no sean adquiridos muy bien, o en conjunto, por cualquier sistema dado. En otros casos los cambios pueden ser irreales debido a diferencias en absorción y dispersión atmosférica ya sea porque la concentración de vapor de agua y aerosoles a diferentes momentos en el tiempo es diferente; en otros casos los cambios pueden ser debido a variaciones en el cenit solar y/o ángulos de azimut o debido a inconsistencias en la calibración del sensor para imágenes separadas.

En la literatura se ha reportado varios métodos de detección de cambios que pueden ser agrupados en nueve categorías diferentes, más un grupo heterogéneo que contiene métodos híbridos y métodos menos utilizados (Coppin *et al.* 2004), estos métodos son los siguientes:

- 1) Comparación post-clasificación.
- 2) Análisis de composición.
- 3) Diferenciación univariada de la imagen.
- 4) División entre imágenes
- 5) Transformación lineal bi-temporal de datos
- 6) Análisis vectorial de cambio (Change vector analysis)
- 7) Regresión de imagen
- 8) Análisis espectral mezclado multi-temporal
- 9) Análisis espacial multi-dimensional de rasgos temporales
- 10) Algoritmos implementados híbridos y menos utilizados.

El método utilizado en esta tesis para detectar los cambios en las diferentes fechas puede considerarse del tipo **Comparación post-clasificación** debido a que se realiza una

clasificación individual para cada fecha y posteriormente se comparan las imágenes de cada fecha haciendo el análisis de la morfología de cada bitmap.

La comparación post-clasificación es algunas veces referida como “clasificación delta”. Esta envuelve los resultados de la clasificación espectral producidos independientemente de cada final del intervalo de tiempo de interés, seguidos por una comparación píxel por píxel segmento por segmento para detectar cambios en el tipo de cobertura.

La ventaja principal de la comparación post-clasificación reside en el hecho de que las dos fechas de las imágenes están clasificadas por separado, de tal modo que reduce al mínimo el problema de la calibración radiométrica entre fechas. Eligiendo el esquema apropiado de clasificación, este método se puede también hacer insensible a una variedad de tipos de cambios transitorios en las características seleccionadas del terreno que no son de ningún interés (Colwell *et al.* 1980).

4.2 Cambios en la vegetación

Existe una gran cantidad de cambios en los bosques debido a un gran número de fenómenos naturales, en las siguientes figuras se mostraran algunos ejemplos de cambios que no necesariamente se deben a deforestación sino que están más ligados a variaciones en las respuesta espectral debido a que el tiempo en cada año fue diferente y por lo tanto las lluvias, sequias y heladas, entre otros fenómenos fueron diferentes, ocasionando que la vegetación existente en los bosques tuviera diferencias en la absorción de la radiación electromagnética proveniente del sol. Esta variación trae como resultado una respuesta espectral diferente para cada imagen y por lo tanto la clasificación de algunas zonas cambia de una fecha a otra sin que esto implique que hubo deforestación, en lugar de esto diremos que hubo un cambio. Da acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2001, se

define como deforestación a “la conversión de los bosques a otro tipo de uso de la tierra o la reducción a largo plazo de la cubierta de copa por debajo del umbral mínimo del 10 por ciento” (FAO 2001).

Otra consideración que debe ser tomada es que la respuesta espectral de cada zona no solo depende del tipo de bosque presente, sino también del tipo de sotobosque que éste contenga y al porcentaje de cubierta de copa que caracterice a dicho bosque, por lo tanto el hecho de que algunas especies no sean caducifolias (como los pinos y abetos) no implica que la respuesta espectral no varíe estación con estación, ya que la contribución del sotobosque también es significativa, y por lo tanto puede parecer que hubo un cambio en zonas en las que el porcentaje de cubierta de copa sea baja y la respuesta espectral este más influenciada por el sotobosque. Estas zonas se confunden con aquellas que realmente están deforestadas, debido a que cuando la vegetación esta en proceso de senescencia su albedo aumenta, ocasionando que su respuesta espectral sea semejante al de zonas deforestadas cubiertas por pastizales, matorrales o vegetación secundaria o inducida.

En la siguiente figura (fig. 4.1) se muestra una secuencia de imágenes correspondientes al área de estudio que encierra el rectángulo blanco en la figura 4.1a. En estas imágenes se puede observar que la variación interanual para las diferentes fechas de adquisición tiene efectos importantes en la interpretación de las imágenes. Por ejemplo en la figura 4.1 b se encierra en el círculo blanco una zona cubierta por bosque de encino, en el círculo negro se tiene una zona cubierta por vegetación secundaria arbustiva (INEGI, carta uso de suelo y vegetación 1:250 000), en el año 1989 (fig. 4.1b) se distinguen claramente las diferencias que hay entre ambos tipos de cobertura, gracias a que la imagen fue tomada en un periodo de sequia y por lo tanto el bosque de encino que es menos influenciado por esta variabilidad interanual conserva su respuesta espectral casi constante sobre todas las fechas de adquisición (fig. 4.1b a 4.1h), sin embargo para el área cubierta por vegetación secundaria arbustiva la variabilidad interanual crea efectos en los que se podría llegar a

confundir esta vegetación secundaria con el bosque de encino, como se ve en la figura 4.1 c, d y e, (1991, 1993 y 1996). Esta confusión aparece en especial cuando el tiempo en cierto año es mas propicio para que la zona arbustiva sea más saludable, y su respuesta espectral sea semejante a la de los bosques.

Otros cambios que se distinguen en esta porción de la zona de estudio es que para el año 1991 (fig. 4.1c) hay una nube que cubre cierta parte de la imagen. Para el año de 1998 se puede ver que hay un incendio (fig. 4.1f), el humo que se genera cubre gran parte del bosque de encino y de la vegetación secundaria arbustiva ocasionando que el algoritmo empleado en esta tesis de cómo resultado que esta zona no pertenezca a la clase correspondiente al bosque (Bitmap de 1998, fig. 4.19).

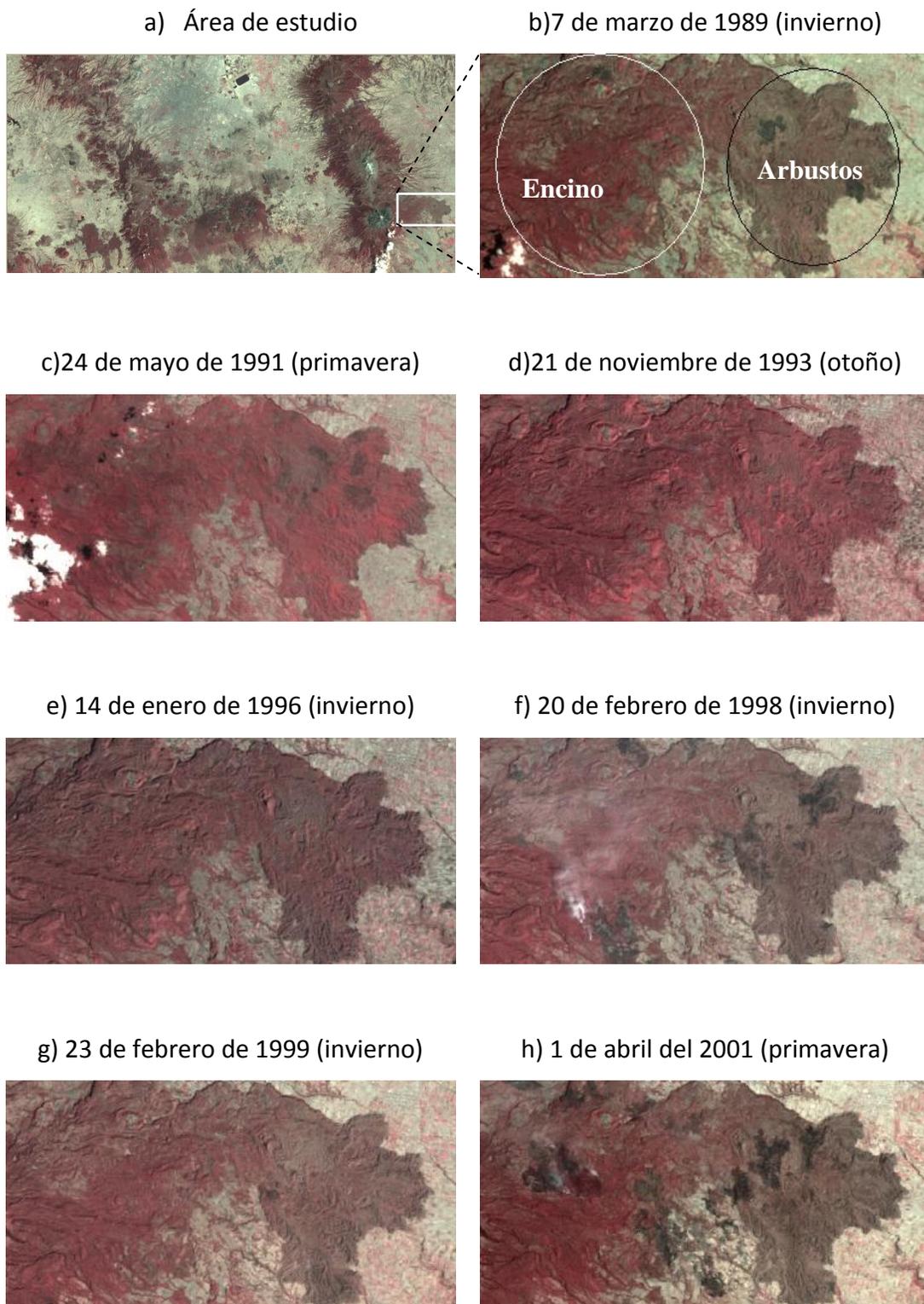


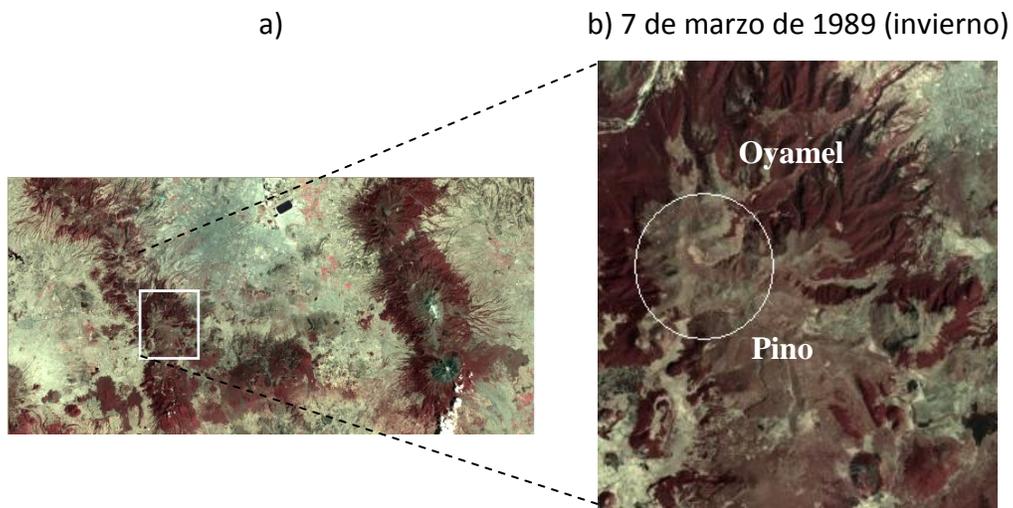
Fig. 4.1 Área de cambios

Otra zona que muestra cambios que no son necesariamente debido a deforestación o a perturbaciones ambientales es la que se muestra en la figura 4.2a encerrada en un rectángulo blanco. En la figura 4.2b se encierra en un círculo blanco una porción de bosque de pino (tonos cafés y rojos claros), que se distingue del bosque de oyamel (tonos rojos más intensos) (INEGI, carta uso de suelo y vegetación 1:250 000), en esta secuencia de imágenes (fig. 4.2b a 4.2h) se puede ver que el bosque de pino está fuertemente influenciado por el sotobosque y por lo tanto también está afectado por las variaciones interanuales. Por ejemplo para el año de 1989 (fig. 4.2b) se diferencian claramente estos dos tipos de bosque (el bosque de oyamel rodea al bosque de pino), sin embargo la respuesta espectral del bosque de pino es semejante a la de algunas zonas cubiertas por arbustos y en algunos casos estos dos tipos de cobertura se confunden por coincidir en la mayoría de las características que la describen, esta semejanza nos da como resultado una confusión entre los bosques de pino y la vegetación secundaria arbustiva.

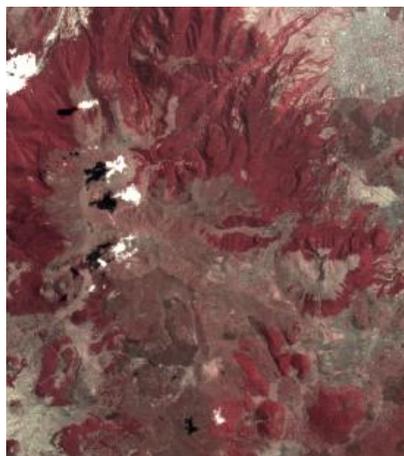
Otro cambio importante en esta zona se da en el año de 1991, 1993 y 2001 (4.2 c, d y h) en estos años el bosque de pino muestra tener un mayor vigor de la vegetación, este cambio no se debe a que haya habido deforestación y reforestación entre dichos años, sino que la respuesta espectral del sotobosque varió año con año, ya sea por la cantidad de lluvias, porque hubieron menos heladas, o por otros factores que no se están considerando.

Estos cambios los podemos interpretar gracias a que tenemos imágenes de diferentes fechas, y además sabemos por las cartas de INEGI, de que tipo de vegetación se trata, sin embargo el algoritmo que estamos utilizando solo detecta semejanzas y diferencias en la textura y respuesta espectral, esto nos ocasiona que al tener zonas con textura y respuesta espectral semejante el algoritmo las tome como iguales, por lo tanto zonas que sufren una disminución en la cubierta vegetal pueden interpretarse como una perturbación ambiental o deforestación. Esto sumado a que existe cierta confusión entre

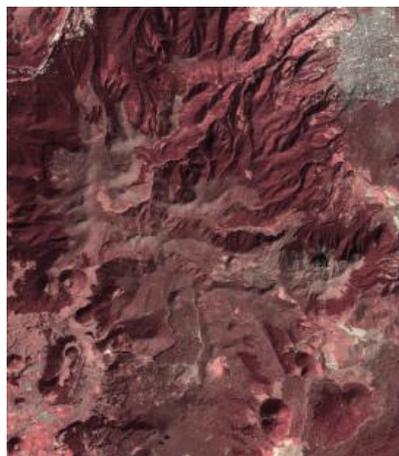
zonas arbustivas y bosques de pino crea ciertas zonas de cambio que no son debidas a perturbaciones ambientales.



c) 24 de mayo de 1991 (primavera)



d) 21 de noviembre de 1993 (otoño)



e) 14 de enero de 1996 (invierno)



f) 20 de febrero de 1998 (invierno)



g) 23 de febrero de 1999 (invierno)



h) 1 de abril del 2001 (primavera)

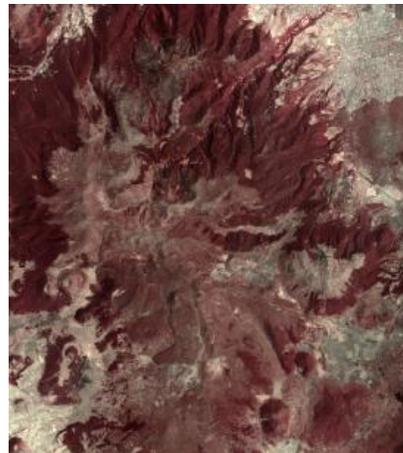


Fig.4.2 Bosque de pino y bosque de oyamel.

Así como esta zona existen otras que no se muestran detalladamente, sin embargo en los bitmaps (capítulo 4.3) esta confusión entre clases crea una variación en el área total de la zona boscosa, la cual no esta asociada directamente a una deforestación, sino a un cambio en los bosques y áreas vegetadas.

4.3 Resultados

Con base en la metodología que se describió en el capítulo 3.5, se obtuvieron los bitmaps de bosques para los años 1989, 1991, 1993, 1996, 1998, 1999 y 2001 (figs. 4.3 a 4.9). Estos bitmaps se generan tomando las tres características más importantes de la zona boscosa, estas son un albedo bajo, vigor de la vegetación alto, y una textura rugosa, estas tres características se modelan con la primera componente principal, la banda verdor la transformación Kauth-Thomas y la divergencia de las tres primeras componentes principales, como se explicó en el capítulo 3.

Para cada año se obtiene el área, perímetro y dimensión fractal de la clase, estos parámetros se explican detalladamente en el capítulo de morfología de bitmaps. Hay que tomar en cuenta que estos están influenciados por los cambios que se mencionaron anteriormente en el capítulo 4.2.

Al final de los bitmaps se resume en una tabla (tabla 4.1) los resultados obtenidos.

1989

Área total: 2,066,146,288 m²

Perímetro total: 32,248,548 m

Dimensión fractal de la clase: 1.4692



Fig. 4.3 Bitmap correspondiente al año 1989



0

30 Km

1991

Área total: 2,085,308,123 m²

Perímetro total: 37,598,853 m

Dimensión fractal de la clase: 1.5070

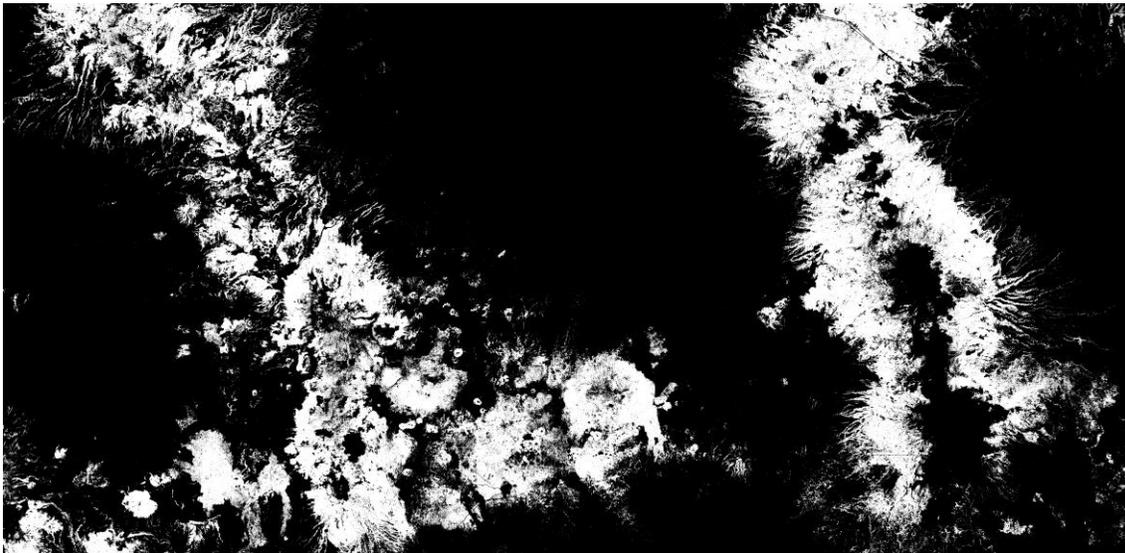


Fig. 4.4 Bitmap correspondiente al año 1991



0

30 Km

1993

Área total: 2,410,334,654 m²

Perímetro total: 63,792,234 m

Dimensión fractal de la clase: 1.5594



Fig. 4.5 Bitmap correspondiente al año 1993



0 30 Km

1996

Área total: 2,489,725,425 m²

Perímetro total: 49,361,772 m

Dimensión fractal de la clase: 1.5017

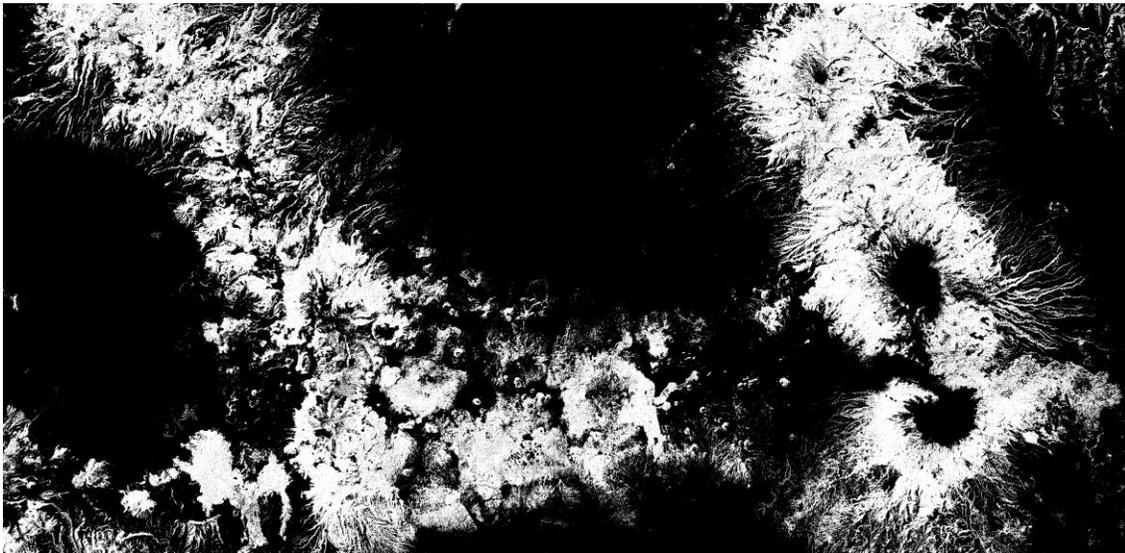


Fig. 4.6 Bitmap correspondiente al año 1996



0 30 Km

1998

Área total: 2,013,178,864 m²

Perímetro total: 40,445,718 m

Dimensión fractal de la clase: 1.5115



Fig. 4.7 Bitmap correspondiente al año 1998



0

30 Km

1999

Área total: 2,167,629,898 m²

Perímetro total: 52,880,382 m

Dimensión fractal de la clase: 1.5372

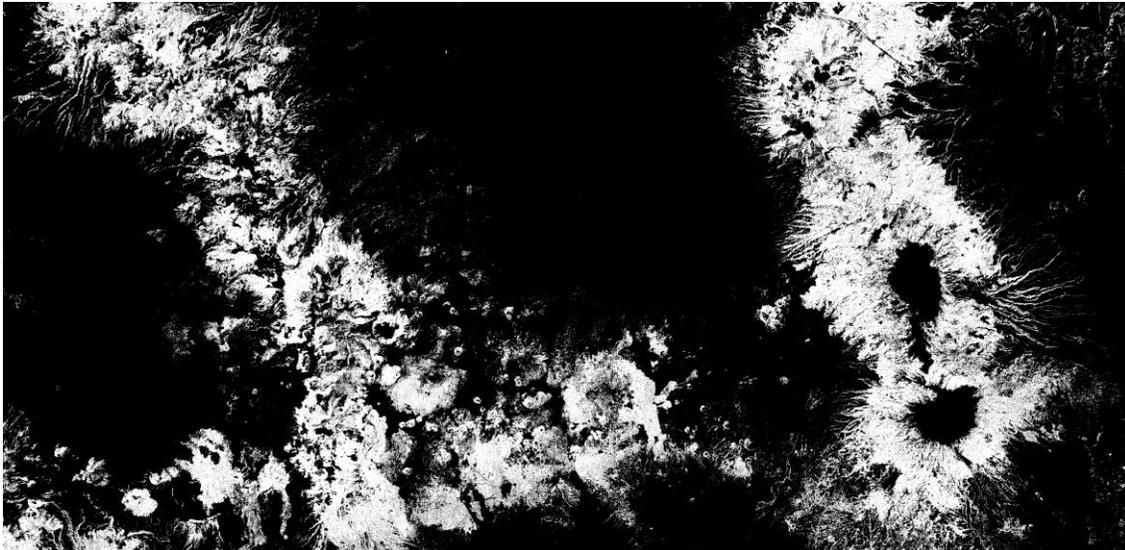


Fig. 4.8 Bitmap correspondiente al año 1999



0

30 Km

2001

Área total: 1,855,961,633 m²

Perímetro total: 46,298,022 m

Dimensión fractal de la clase: 1.5626

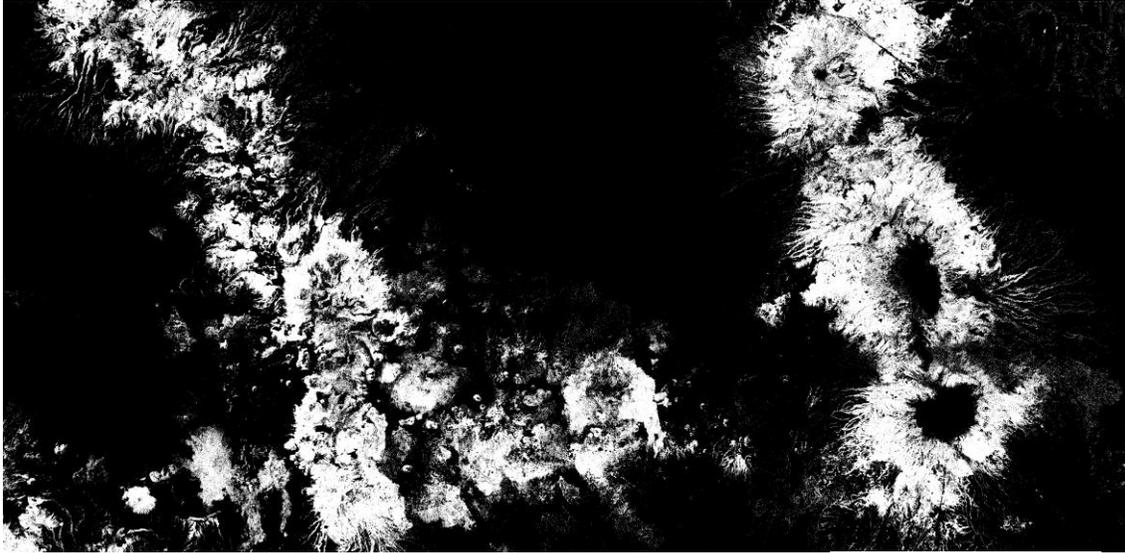


Fig. 4.9 Bitmap correspondiente al año 2001



4.4 Morfología de Bitmaps

4.4.1 Área y Perímetro

Para obtener el área y el perímetro de los bitmaps se utilizó el programa Fragstats, desarrollado por la Universidad de Massachusetts Amherst, para esto se considero que el tamaño de pixel es de 28.5x28.5 m (Landsat Technical Guide, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Los bitmaps están formados por parches, estos son regiones que están conectadas entre si, es decir, cada pixel esta conectado con otro, cuando se pierde la conexión entre pixels entonces se cambia de parche. La siguiente figura (fig. 4.10) es un ejemplo de los parches que forman el bitmap de 1996, cada uno tiene un color diferente.



Fig. 4.10 Parches correspondientes 1996

4.4.2 Dimensión Fractal

Un fractal es una figura geométrica con una estructura compleja y detallada a cualquier escala. Normalmente los fractales son auto semejantes, es decir, tienen la propiedad de que una pequeña sección de un fractal puede ser vista como una réplica a menor escala de todo el fractal. Estas figuras tienen una superficie finita pero con un perímetro de longitud infinita, y con un número infinito de vértices

Benoit B. Mandelbrot sugirió que las montañas, nubes, rocas de agregación, galaxias y otros fenómenos naturales son similares a los fractales (Peitgen *et al.* 1992).

Por lo tanto es conveniente obtener la dimensión fractal para así determinar el grado de complejidad de la forma de los parches que conforman cada bitmap.

En esta tesis se obtuvo la dimensión fractal de cada parche así como la dimensión fractal de la clase correspondiente al bosque, es decir, de todos los parches en conjunto, por medio del programa Fragstats. A continuación se da una breve explicación del algoritmo que utiliza el programa FRAGSTATS.

La **dimensión fractal de cada parche** se obtiene de la siguiente manera:

$$FRAC = \frac{2 \ln 0.25 p_{ij}}{\ln a_{ij}}$$

a_{ij} = área (m^2) del parche ij .

p_{ij} = perímetro (m) del parche ij .

El parámetro FRAC (dimensión fractal de cada parche) es mayor o igual a 1 y menor a o igual a 2, una dimensión fractal mayor a uno para un parche bidimensional indica que tanto se aleja de una geometría euclidiana (i. e., un incremento en la complejidad de la

forma). La dimensión fractal se aproxima a uno para formas con perímetros muy simples como cuadrados, y se aproxima a dos para formas muy complicadas, es decir, perímetros rugosos que saturan el plano (FRAGSTATS User Guidelines)

La **dimensión fractal de la clase** que representa al bosque se obtuvo mediante el comando PAFRAC del programa FRAGSTATS, el cual es calculado de la siguiente manera:

$$PAFRAC = \frac{2}{\frac{\left[n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \cdot \ln a_{ij} \right] - \left[\left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right) \left(\sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right) \right]}{\left(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2}}$$

a_{ij} = área (m^2) del parche ij .

p_{ij} = perímetro (m) del parche ij .

n_i = número de parches i en la escena.

PAFRAC es igual a dos dividido entre la pendiente de la línea de regresión lineal que ajusta los puntos dados por el logaritmo del perímetro del parche (m) contra el logaritmo del área del parche (m^2). La ecuación de regresión lineal estaría dada por:

$$\ln \text{ area} = b_1 \cdot \ln \text{ perim} + b_0$$

Esta ecuación es de la forma:

$$Y = b_1 X + b_0$$

Por lo tanto PAFRAC es igual a 2 dividido entre el coeficiente b_1 , es decir, la pendiente de la regresión por mínimos cuadrados de la distribución de puntos del logaritmo natural del perímetro y el área

El parámetro PAFRAC tienen las mismas características que FRAC, está en el intervalo de 1 a 2 y se aproxima a dos para formas muy complejas y a uno para formas euclidianas o simples, como se mencionó anteriormente. Para que se obtenga una buena aproximación se necesita que haya un buen número de parches (más de 10) y de diferentes tamaños, lo cual no es un problema en esta tesis ya que se cuenta con más de 20000 parches en cada fecha.

PAFRAC refleja la complejidad de la forma a través de un rango de escalas espaciales (tamaños de los parches). Esto solo tiene sentido si la relación entre los logaritmos del área y perímetro es lineal sobre todo el rango de los tamaños de los parches

Para determinar si la relación entre el perímetro y el área tiene un comportamiento fractal se graficó el logaritmo natural del perímetro contra el logaritmo natural del área (figs. 4.11, 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23)

En las gráficas 4.12, 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22, 4.24 se muestra la distribución de la dimensión fractal con respecto al número de parche (PID).

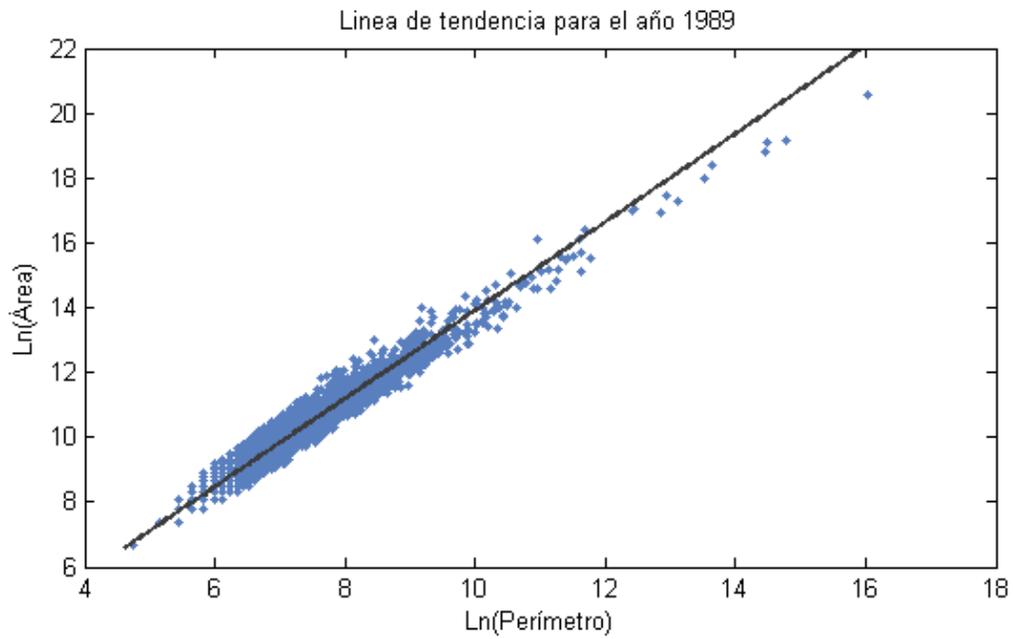


Fig. 4.11 Comportamiento fractal de los parches del bitmap de 1989.

La recta que ajusta los puntos para el año 1989 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.361 \cdot \ln \text{ perim} + 0.2914$$

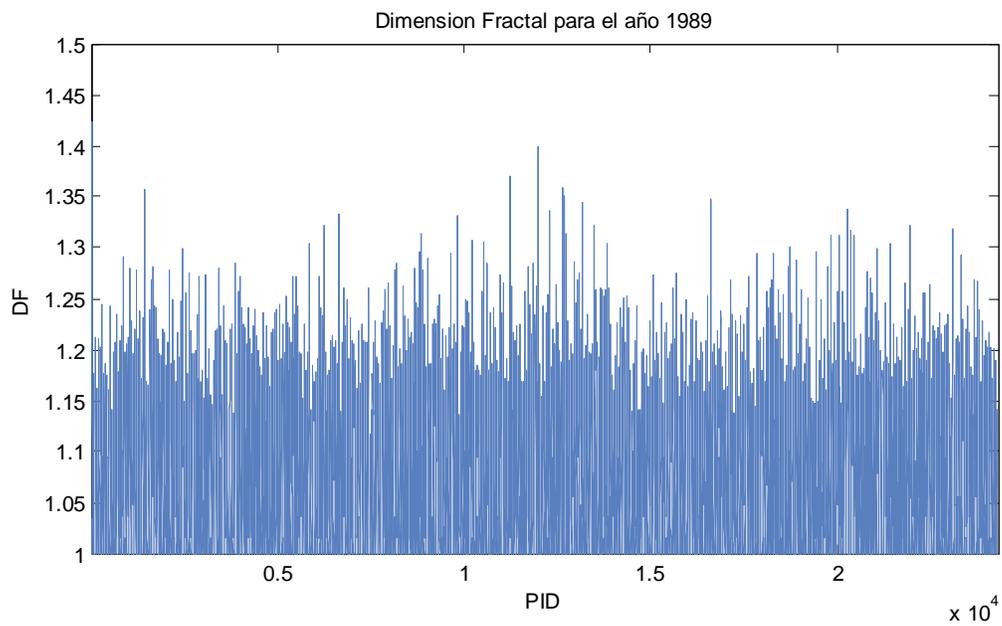


Fig. 4.12 Dimensión Fractal de parches para el año 1989.

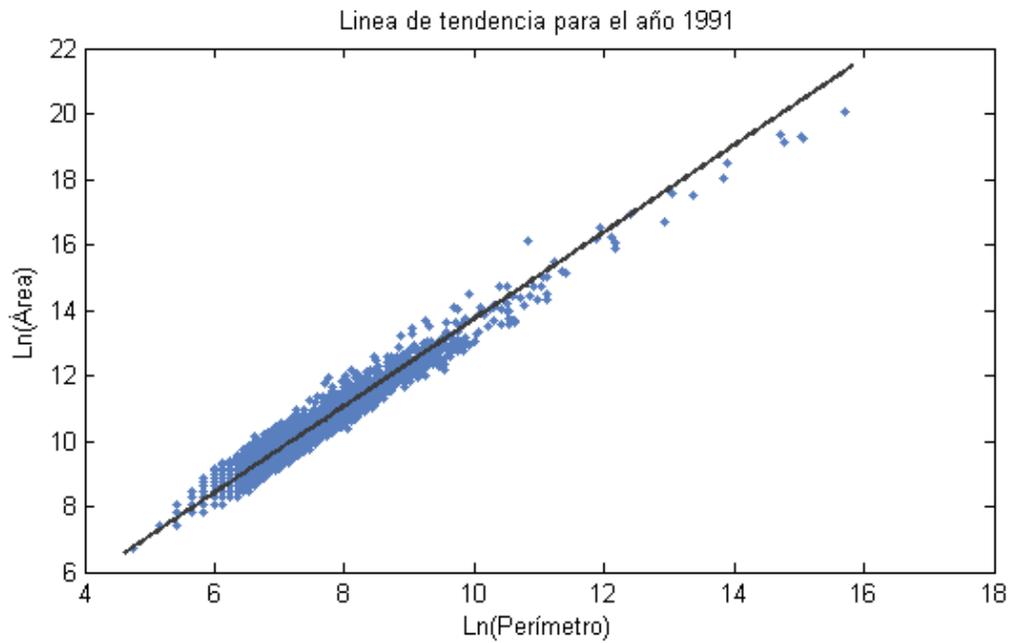


Fig. 4.13 Comportamiento fractal de los parches del bitmap de 1991.

La recta que ajusta los puntos para el año 1991 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.327 \cdot \ln \text{ perim} + 0.4474$$

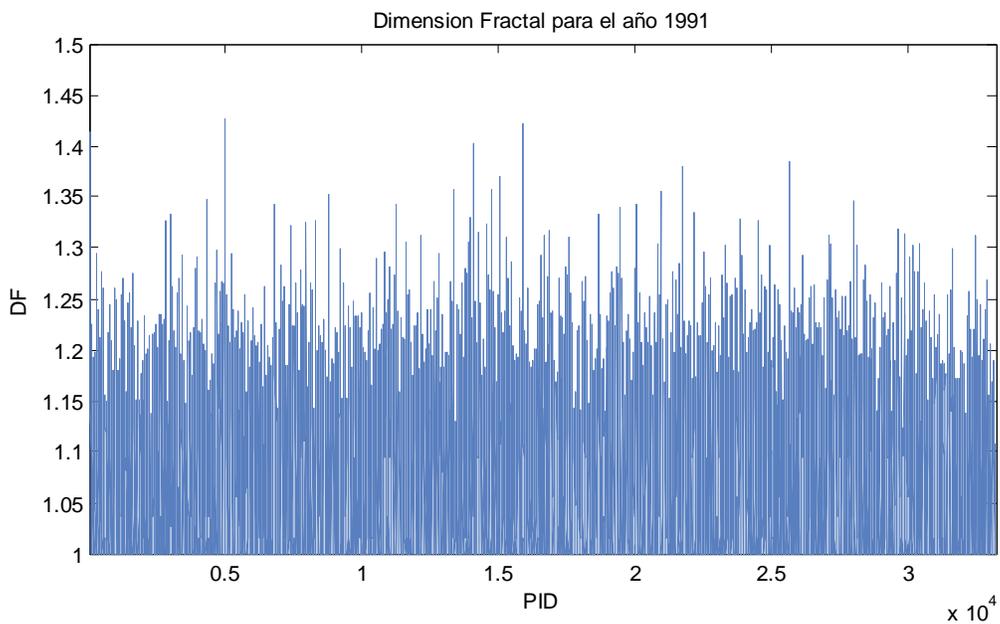


Fig. 4.14 Dimensión Fractal de parches para el año 1991

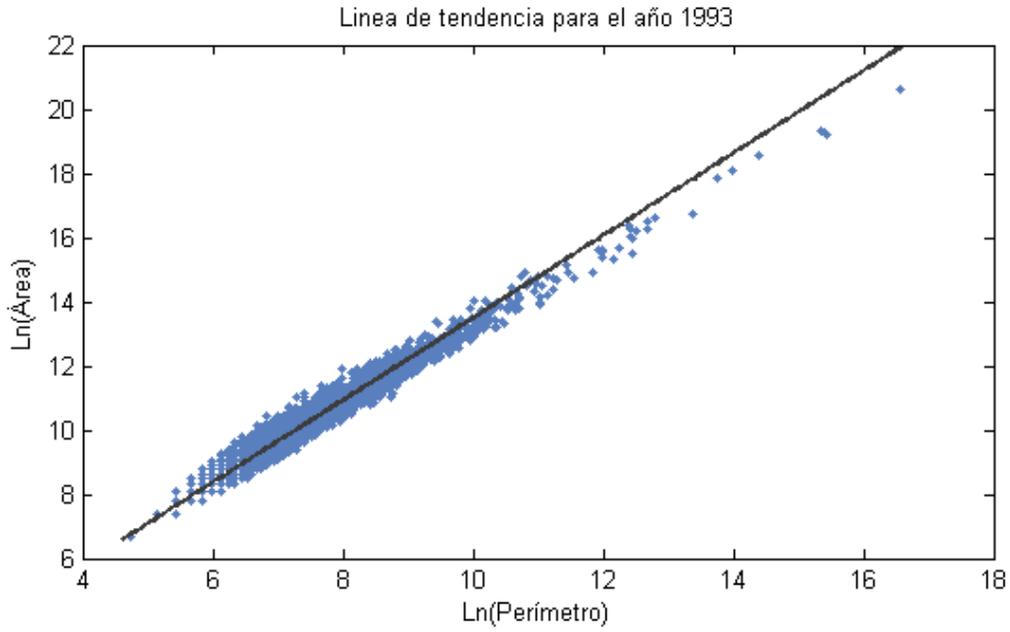


Fig. 4.15 Comportamiento fractal de los parches del bitmap de 1993.

La recta que ajusta los puntos para el año 1993 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.283 \cdot \ln \text{ perim} + 0.6573$$

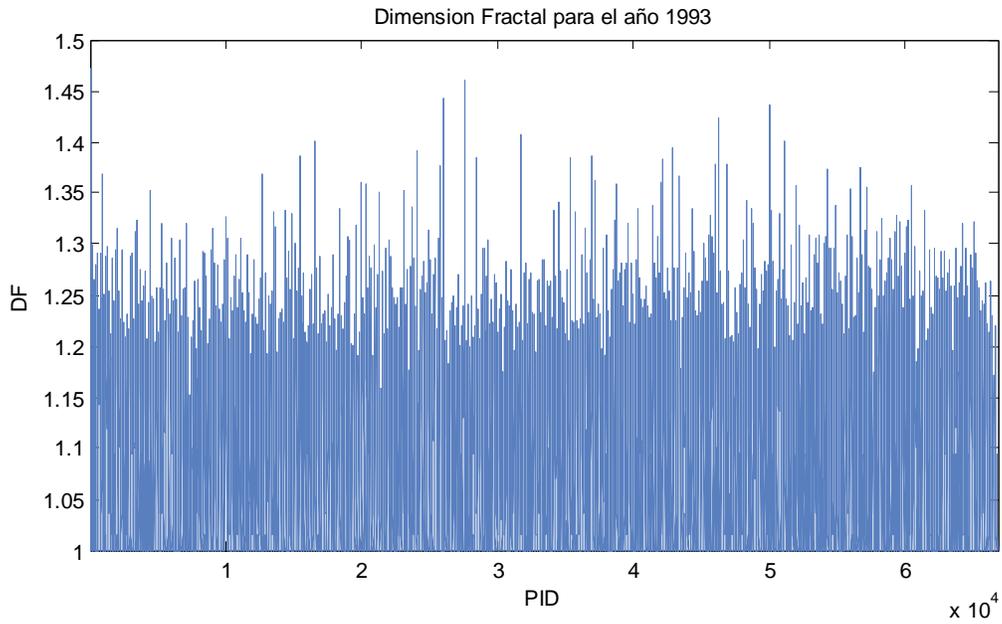


Fig. 4.16 Dimensión Fractal de parches para el año 1993.

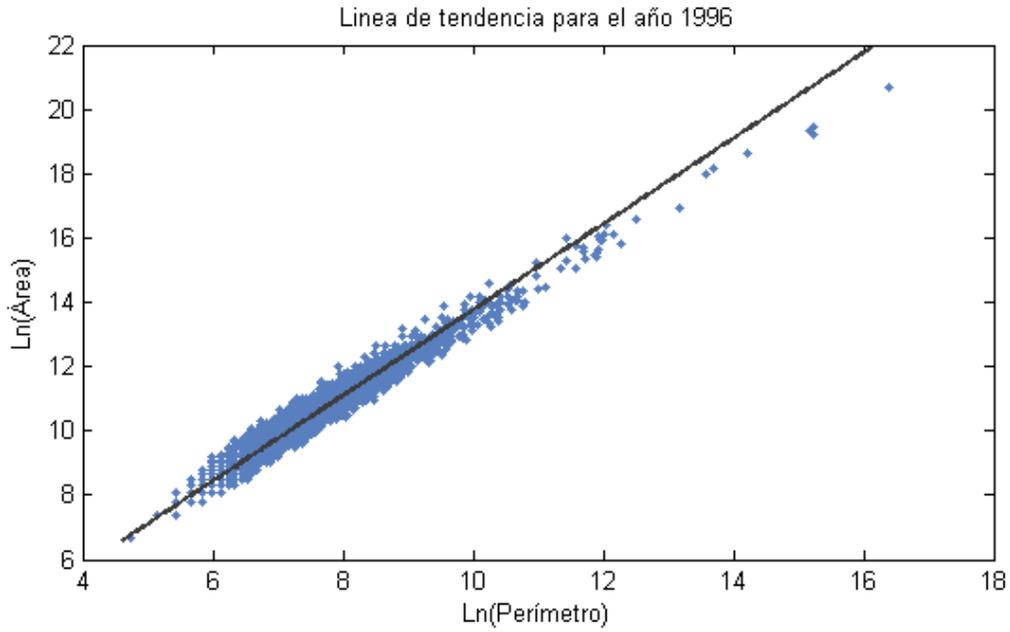


Fig. 4.17 Comportamiento fractal de los parches del bitmap de 1996.

La recta que ajusta los puntos para el año 1996 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.332 \cdot \ln \text{ perim} + 0.4321$$

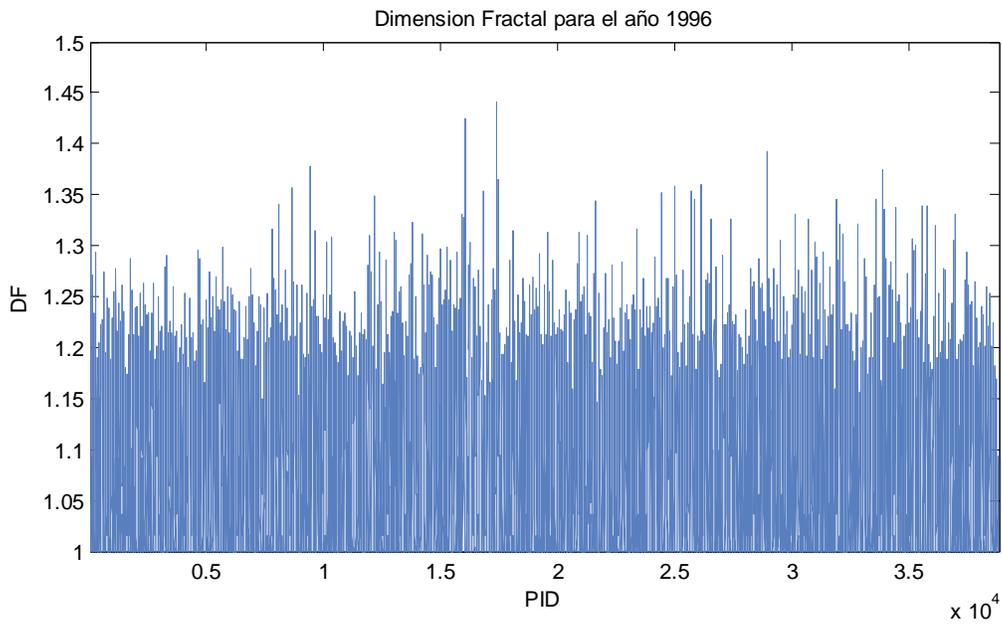


Fig. 4.18 Dimensión Fractal de parches para el año 1996.

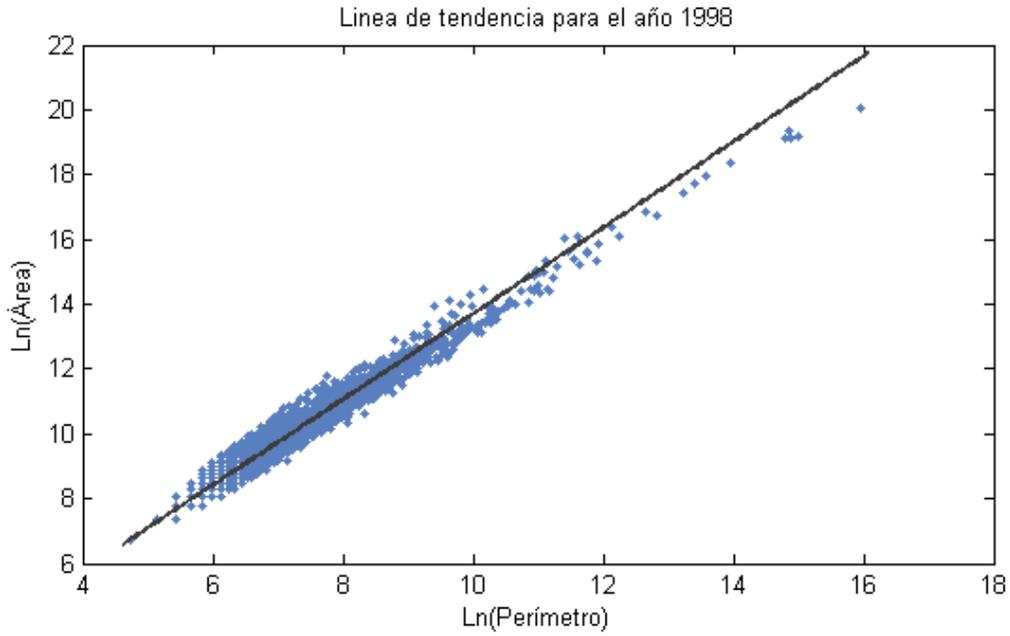


Fig. 4.19 Comportamiento fractal de los parches del bitmap de 1998.

La recta que ajusta los puntos para el año 1998 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.323 \cdot \ln \text{ perim} + 0.4653$$

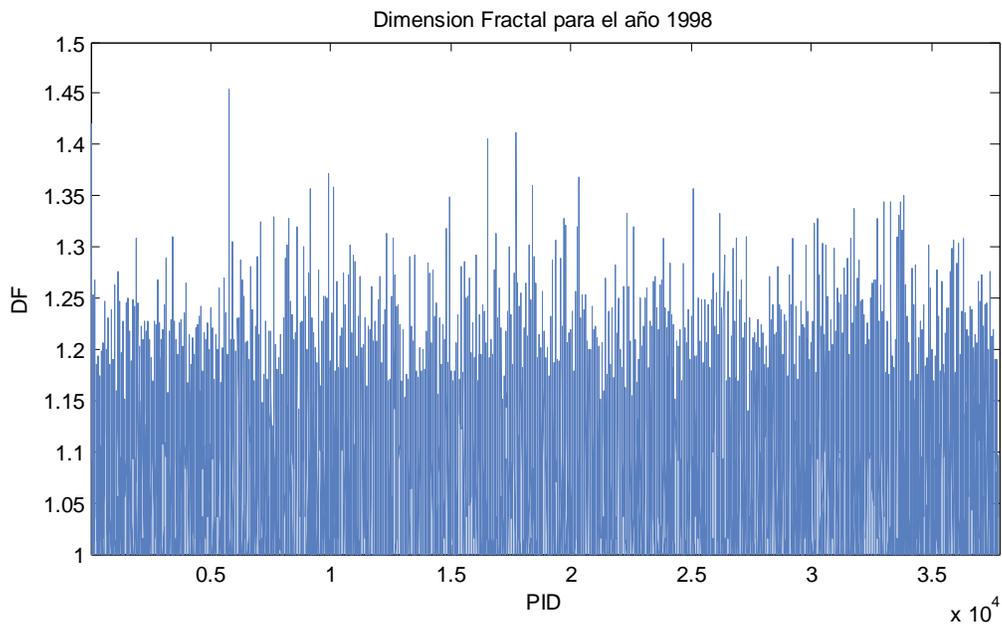


Fig. 4.20 Dimensión Fractal de parches para el año 1998.

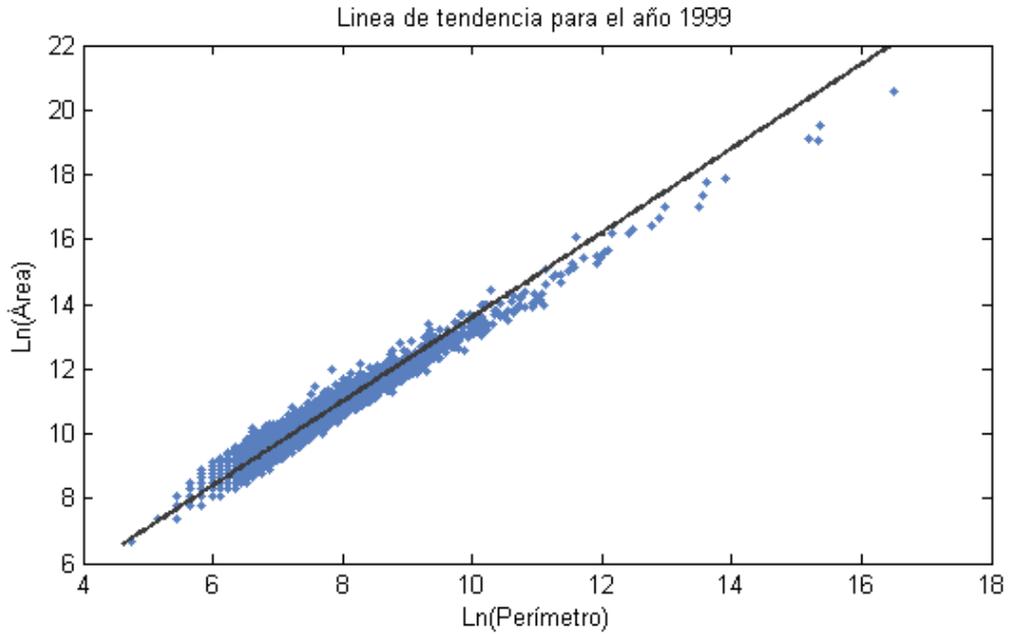


Fig. 4.21 Comportamiento fractal de los parches del bitmap de 1999.

La recta que ajusta los puntos para el año 1999 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.301 \cdot \ln \text{ perim} + 0.5803$$

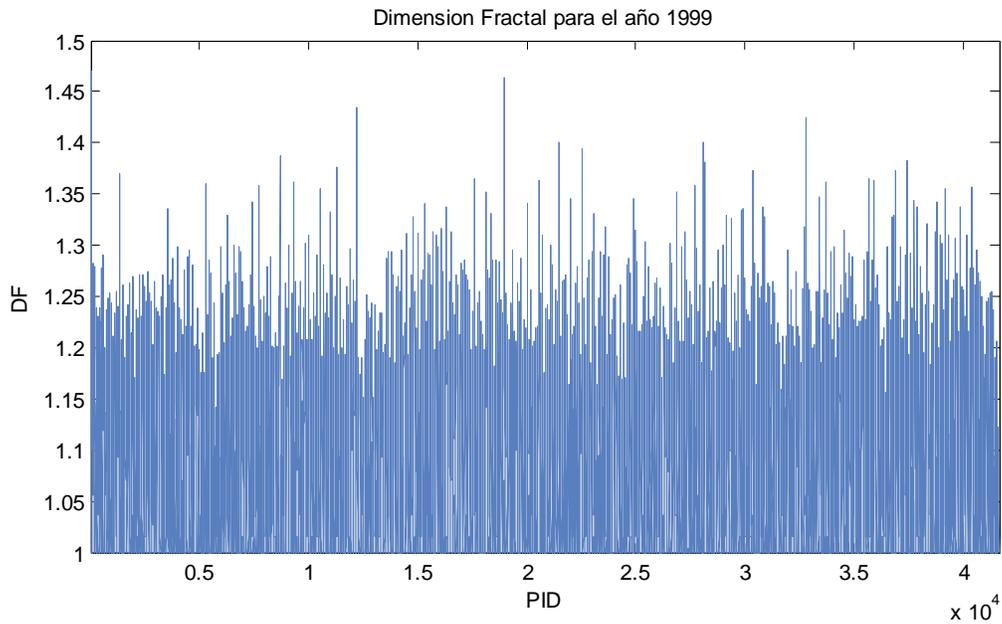


Fig. 4.22 Dimensión Fractal de parches para el año 1999.

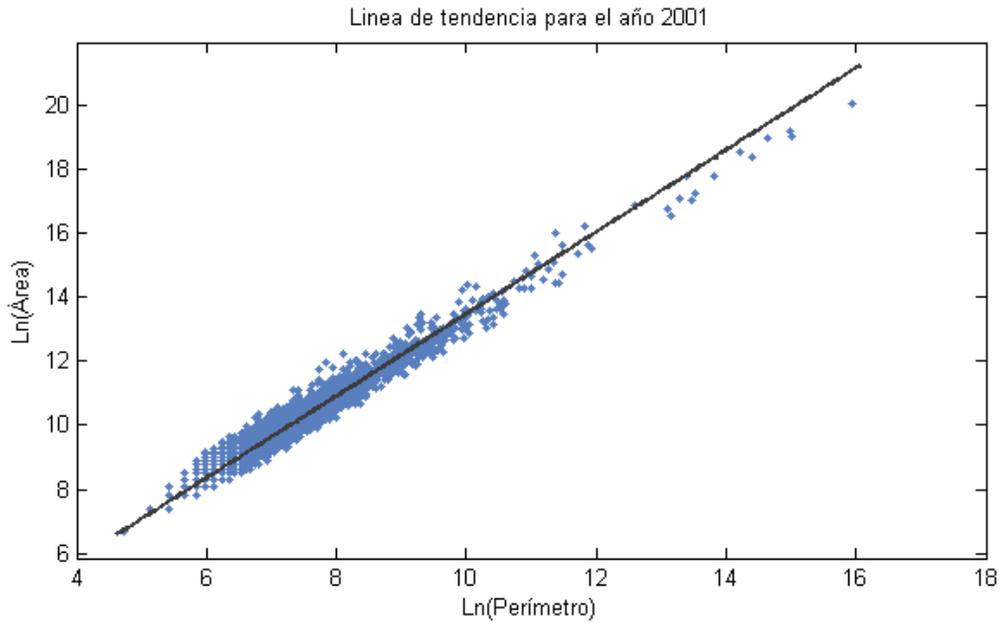


Fig. 4.23 Comportamiento fractal de los parches del bitmap del 2001.

La recta que ajusta los puntos para el año 2001 tiene la siguiente expresión:

$$\ln \text{ area} = 1.28 \cdot \ln \text{ perim} + 0.6611$$

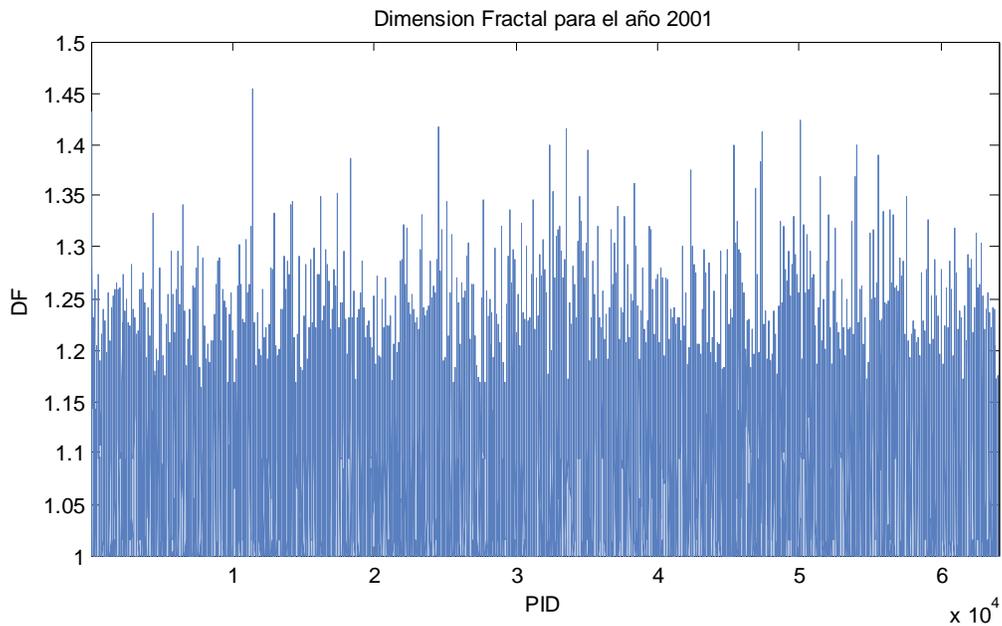


Fig. 4.24 Dimensión Fractal de parches para el año 2001

La relación que hay entre el logaritmo natural del perímetro y el logaritmo natural del área es lineal lo cual cumple con el requerimiento para obtener la dimensión fractal (PAFRAC) de la clase asociada al bosque, también se observa que sin importar el tamaño del parche los puntos tienden a estar sobre una línea (figs. 4.11, 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23), la siguiente tabla resume los resultados anteriores:

Tabla 4.1 Área, perímetro y dimensión fractal de la zona boscosa para los diferentes años

Año	no. de parches	Área	Perímetro	Dimensión fractal de la clase	Pendiente del ajuste lineal
1989	24309	2066146288	32248548	1.4692	1.361
1991	33241	2085308123	37598853	1.507	1.327
1993	66810	2410334654	63792234	1.5594	1.283
1996	38866	2489725425	49361772	1.5017	1.332
1998	37827	2013178864	40445718	1.5115	1.323
1999	41667	2167629898	52880382	1.5372	1.301
2001	64054	1855961633	46298022	1.5626	1.28

De la tabla 4.1 se puede observar que mientras que la dimensión fractal aumenta la pendiente que ajusta el logaritmo natural del área y del perímetro es inversamente proporcional a la dimensión fractal de la clase asociada al bosque. Esto indica que a medida que cada parche aumenta su perímetro y disminuye su área la dimensión fractal aumenta.

La distribución de la dimensión fractal para todos los años en estudio es la siguiente (fig. 4.25):

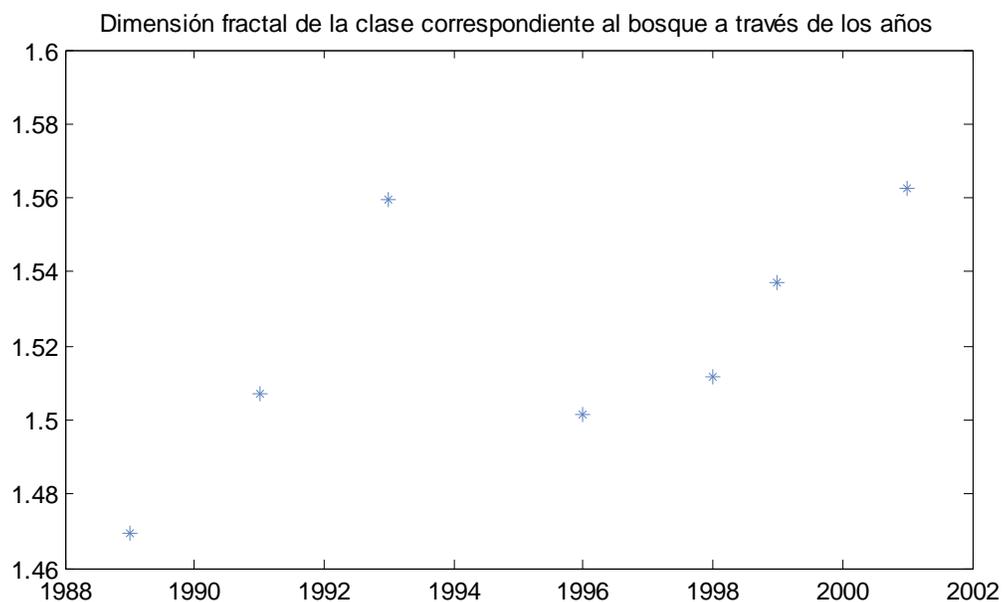


Fig. 4.25 Dimensión fractal a través de los años

Estas dimensiones fractales se refieren a todos los años en estudio, incluyendo los años 1991 el cual está influenciado por una nube que cubre gran parte del Popocatepetl e Iztaccíhuatl, y el año 1993 cuya imagen fue tomada en otoño por lo que está fuertemente influenciada por la estación del año. Si ignoramos estos años se puede ver que la dimensión fractal está aumentando.

En la imagen que se muestra a continuación (fig. 4.26) se muestran los cambios que hubieron entre 1989 y 2001, estos cambios pueden deberse a: cambios estacionales, deforestación, incendios, nubes, sombras, nevadas, entre otros.

En color blanco se representan aquellas zonas que sufrieron una disminución en la cobertura vegetal.

En color amarillo se muestran zonas que aumentaron su cobertura vegetal, ya sea por la estación del año, por la recuperación gracias a que el clima en ese lapso de tiempo fue favorable, por la recuperación de algún incendio, o porque la zona quedo libre de nieve o nubes que cubrieran la zona en la fecha anterior, entre otros fenómenos.

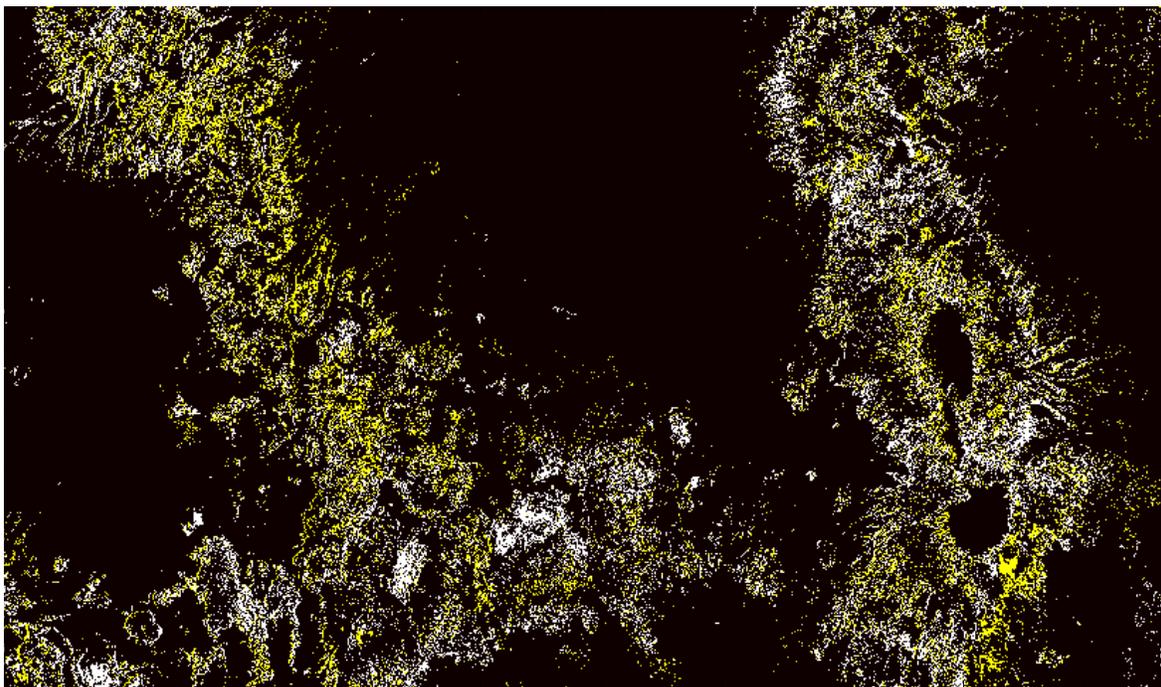


Fig. 4.26 Diferencias entre las fechas 1989-2001



4.5 Análisis de resultados

Cuando una zona boscosa está siendo deforestada presenta una disminución en la absorción de la radiación, así como también la textura de dichas zonas comienza a suavizarse, además, el contenido de humedad disminuye. Sin embargo no es sencillo localizar qué zonas están siendo deforestadas, debido a que la tala de arboles regularmente no es homogénea, es decir, que no hay un re-emplazamiento total de árboles o pinos por pastizales o suelos descubiertos, sino que se presenta como una disminución gradual en la cubierta de copa, y por lo tanto se podría considerar una modificación y no una conversión en la cobertura de la Tierra, como se menciono al principio de este capítulo.

De la tabla 4.1 se observa que el área no disminuye uniformemente como era de esperarse, debido a la deforestación, sino que varía año con año, aumentando y disminuyendo su área, esto se debe a que los bosques están fuertemente influenciados por el sotobosque el cual está cambiando constantemente dependiendo de qué tan saludable este en la fecha de adquisición de la imagen, también se debe a que la respuesta espectral de las zonas que ya han sufrido modificaciones por tala de arboles están sujetas al estado en el que se encuentre el sotobosque, así como del contenido de humedad que haya en dicha zona.

En las figuras 4.2g y 4.2h se observa que hay una perturbación en el bosque de oyamel que se encuentra en la parte superior central, esta modificación altera la respuesta espectral reflejándose como una disminución de bosques en los bitmaps (fig. 4.27), sin embargo esta perturbación es más evidente en el año 1999 (fig. 4.2 g) ya que para el 2001 se aprecia menos, debido a hay una recuperación de las especies restantes (fig. 4.2 h), lo cual se nota también en los bitmaps (fig. 4.27).

1999



2001



Fig. 4.27 Perturbación en el bosque de oyamel.

Este fenómeno se repite en otras zonas y es lo que está dando una variación en el área de las zonas deforestadas que además se mezclan con bosques que de por sí tienen un dosel arbóreo bajo.

La CNF (Comisión Nacional Forestal) reporta que la posible deforestación entre los años 2003-2005 y 2007 es la que se muestra en los siguientes mapas (fig. 4.26 y 4.27), en color naranja se reporta una *posible deforestación*, en verde áreas *sin cambios* y en azul *otros cambios*, también se muestra la división política de los estados en color amarillo:

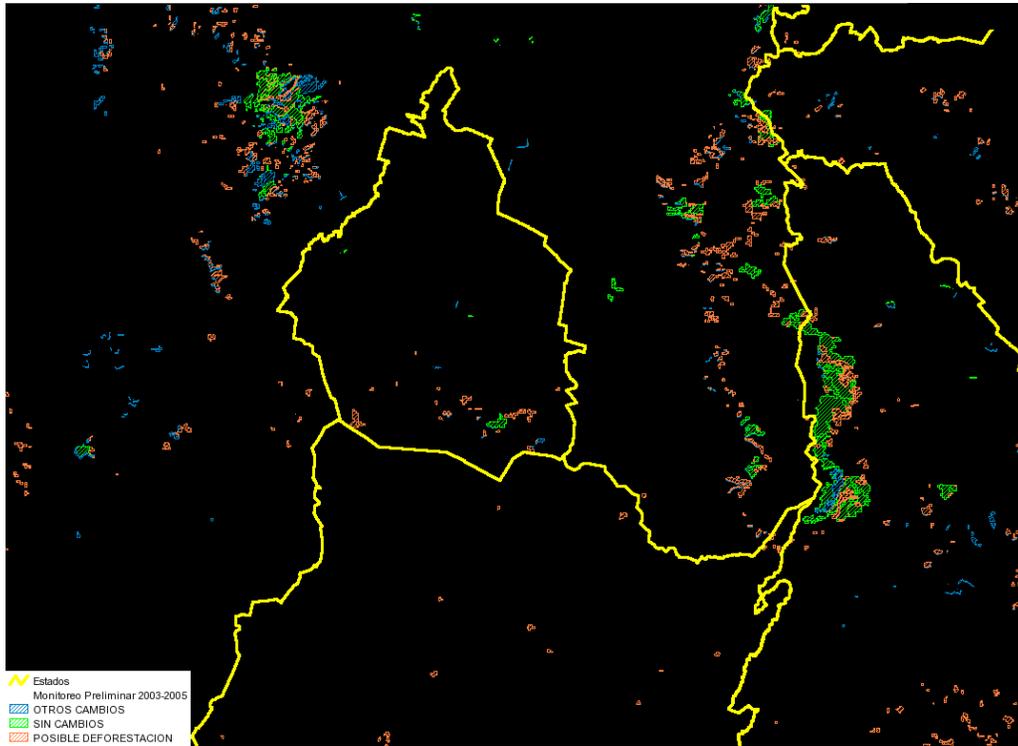


Fig. 4.28 Posible deforestación (CNF, 2005)

La referencia espacial del mapa (fig. 4.28) esta en coordenadas UTM, y es la siguiente (tabla 4.2):

Tabla 4.2 Referencia espacial para el mapa de CNF (2005)

	x	y
Esquina superior izquierda	2736692.278m	855840.476m
Esquina inferior derecha	2884576.634m	748163.04m

El siguiente mapa muestra en color rojo las zonas que tienen una posible deforestación, y en color amarillo la división política de los estados:

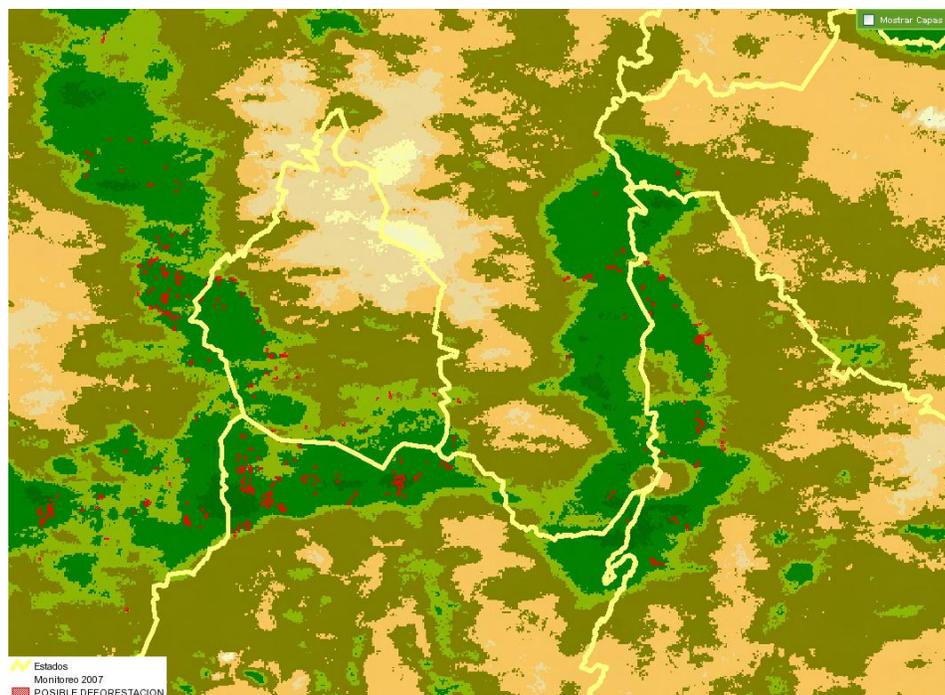


Fig. 4.29 Posible deforestación (FAO, 2007)

La referencia espacial del mapa (fig. 4.29) esta en coordenadas UTM y es la siguiente (tabla 4.3):

Tabla 4.3 Referencia espacial para el mapa de CNF (2007)

	x	y
Esquina superior izquierda	2745773.116m	863603.991m
Esquina inferior derecha	2904560.643m	747987.747m

El mapa de cambios que presentamos en esta tesis (4.26) difiere un poco del que reporta la CNF, ya que el mapa que mostramos no solo indica qué zonas sufrieron una degradación en la cobertura vegetal, sino también qué zonas muestran una recuperación, ya sea por fenómenos naturales que contribuyeron a un mejor desarrollo de especies caducifolias o especies que dependen del tiempo año con año.

Tomando en cuenta solo los años 1989 y 2001, se tiene una pérdida de $210,184,655 \text{ m}^2 = 21,018.4655$ hectáreas

Otra observación que se puede hacer es que la dimensión fractal de cada año tiene un aumento de 1.4692 a 1.5626, esto podría estar asociado a un cambio en la forma de los parches que representan al bosque, ya sea porque se están fragmentando o porque se están generando “huecos” dentro de los parches. En general la forma de los bitmaps cambia haciéndose más compleja, aumentando así su dimensión fractal.

Estos cambios son graduales en todos los bitmaps excepto el del año 1991 y 1993 (fig. 4.13 y 4.15). La imagen de 1991 esta afectada por una nube que cubre gran parte del Popocatepetl e Iztaccíhuatl y la imagen de 1993 fue obtenida el 21 de noviembre en otoño la cual está muy influenciada por la estación.

CONCLUSIONES

Con base en la metodología desarrollada en la presente tesis y los resultados alcanzados, es posible establecer las siguientes conclusiones

- Para este trabajo la Percepción Remota mostró ser una herramienta fundamental para el monitoreo del bosque circundante a la Ciudad de México.
- Para el análisis canónico las variables que mejor se ajustaron fueron: primera componente principal, banda verdor de la transformación Kauth-Thomas y la divergencia. Estas variables describen tres características principales de la vegetación que son: un bajo albedo, vigor de la vegetación alto y textura rugosa.
- En los años 1989, 1998 y 2001 la influencia de la variabilidad inter-anual fue menor, es por esto que son dichas imágenes las que tienen una mayor confiabilidad para decir que la cobertura de bosques esta disminuyendo.
- La generación de los bitmaps nos dio como resultado que el área de los bosques está disminuyendo ya que para el año de 1989 el área ocupada fue de $2,066,146,288\text{m}^2$, para 1998 fue de $2,013,178,864\text{m}^2$ y para el 2001 disminuyo a $1,855,961,633\text{m}^2$.
- Es importante notar que estos resultados están influenciados por las variaciones que tiene los bosques, debido a que están formados por una gran diversidad de especies que están cambiando continuamente dependiendo de las condiciones del tiempo en cada año.
- La relación entre el perímetro y el área de cada fecha muestran un comportamiento fractal cuya dimensión es de 1.4692 para 1989, 1.5017 para 1996, 1.5115 para 1998, 1.5372 para 1999 y 1.5626 para 2001. Estos resultados indican que la geometría tiene cambios sutiles y tiende a hacerse más compleja, conforme la dimensión fractal aumenta.
- Los principales retos para el monitoreo de cambios en ecosistemas son:
 - 1) detectar modificaciones además de conversiones.
 - 2) monitorear cambios rápidos y abruptos además de cambios progresivos e incrementales.
 - 3) separar variabilidad inter-anual.

Apéndice 1

Parámetros del sensor Thematic Mapper 4

HORIZONTAL_DATUM=WGS84;
EARTH_ELLIPSOID_SEMI-MAJOR_AXIS=6378137.000;
EARTH_ELLIPSOID_SEMI-MINOR_AXIS=6356752.314;
EARTH_ELLIPSOID_ORIGIN_OFFSET=0.000,0.000,0.000;
EARTH_ELLIPSOID_ROTATION_OFFSET=0.000000,0.000000,0.000000;
SATELLITE=LANDSAT_4;
SATELLITE_INSTRUMENT=TM;
PIXEL_SPACING=28.5000,28.5000;
PIXEL_SPACING_UNITS=METERS;
SUN_ELEVATION=49.71;
SUN_AZIMUTH=123.67;
NUMBER_OF_BANDS_IN_VOLUME=7;
BAND1_NAME=TM_BAND_1;
BAND1_WAVELENGTHS=0.45,0.52;
BAND1_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=0.6024314,-1.5200000;
BAND2_NAME=TM_BAND_2;
BAND2_WAVELENGTHS=0.52,0.60;
BAND2_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=1.1750981,-2.8399999;
BAND3_NAME=TM_BAND_3;
BAND3_WAVELENGTHS=0.63,0.69;
BAND3_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=0.8057647,-1.1700000;
BAND4_NAME=TM_BAND_4;
BAND4_WAVELENGTHS=0.76,0.90;
BAND4_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=0.8145490,-1.5100000;
BAND5_NAME=TM_BAND_5;
BAND5_WAVELENGTHS=1.55,1.75;
BAND5_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=0.1080784,-0.3700000;
BAND6_NAME=TM_BAND_6;
BAND6_WAVELENGTHS=10.40,12.50;
BAND6_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=0.0551582,1.2377996;
BAND7_NAME=TM_BAND_7;
BAND7_WAVELENGTHS=2.08,2.35;
BAND7_RADIOMETRIC_GAINS/BIAS=0.0569804,-0.1500000;

BIBLIOGRAFÍA

- Brodatz, P., 1966, "Textures: A Photographic Album for Artist and designers", Dover, New York.
- Byrne, G. F., Crapper, P. F., y Mayo, K. K., 1980, "Monitoring land cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data". *Remote Sensing of Environment*, vol. 10, 175–184.
- Colwell, J. E., Y Weber, F. P., 1981, "Forest change detection". *Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, USA (Ann Arbor, MI: ERIM), 839–852.
- Colwell, J. E., Davis, G., and Thomson, F., 1980, "Detection and measurement of changes in the production and quality of renewable resources". *USDA Forest Service Final Report 145300-4-F*, ERIM, Ann Arbor, MI, USA.
- CNF, www.cnf.gob.mx/emapas, 2000, "Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación", Escala 1:250,000, Serie II (CONTINUO NACIONAL), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática – INEGI.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., y Muys, B., 2004, "Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, 1565-1596.
- Bueche, F., 1983, "Fundamentos de Física". Mc Graw Hill, México.
- Ezcurra, E., Mazari, M., Pisanta, I., Guillermo, A., 2006, "La Cuenca de México". Fondo de Cultura Económica. México. 274 pp.
- FAO, 2001, "Global Forest Resources Assessment 2000". Main Report. FAO, Roma.
- FRA, 2001, "Causas y tendencia de la deforestación en América Latina". Departamento de Montes, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

- Ingebritsen, S. E., y Lyon, R. J. P., 1985, "Principal component analysis of multitemporal image pairs". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, 687–696.
- Jain, A.K., 1989, "Fundamentals of Image Processing". Prentice Hall, USA.
- Jensen, J. R., 1996, "Introductory digital image processing: a remote sensing perspective". Prentice Hall Series in Geographic Information Science. USA. p. 318.
- Jensen, J. R., 2000, "Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective". Ed. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. USA.
- Khorram, S., BIGING, G. S., Chrisman, N. R., Colby, D. R., Congalton, R. G., Dobson, J. E., Ferguson, R. L., Goodchild, M. F., Jensen, J. R., y Mace, T. H., 1999, "Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection". *ASPRS Monograph*, Bethesda, Md.
- Lira, J., 2006, "Introducción a la Percepción Remota", en edición.
- Lira, J., 1995, "La percepción remota nuestros ojos desde el espacio". FCE, México.
- Lira, J., 2002, "Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes". IPN-UNAM-FCE, México.
- Lira, J. e Hidalgo, L., 2007, "Segmentation of urban built up area using Fisher discriminant analysis", intensity and vegetation strengt of Landsat images. *Wseas Transactions of Signal Processing*, vol. 3. pp. 95-101.
- Lira, J., y Rodriguez, A., 2006, "A divergence operator to quantify texture from multi-spectral satellite images". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27. pp. 2683-2702.
- Lillesand, T. y Kiefer, R., 1994, "Remote Sensing and Image Interpretation". 3a ed. Ed. John Wiley and Sons, Inc. USA.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., y Moran E., 2004, "Change detection techniques". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, 2365-2407.
- Miller, A. B., Bryant, E. S., y Birnie, R. W., 1998, "An analysis of land cover changes in the northern forest of New England using multitemporal Landsat MSS data".

- International Journal of Remote Sensing, vol. 19, 245–265.
- Milne, A. K., 1988, "Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology". Proceedings of the IGARSS'88 Symposium Edinburgh, Scotland, ESA SP-284 (Noordwijk, Netherlands: ESA), pp. 541–544.
- Ojala, T., Pietikäinen, M., Mäenpää, T., 2002, "Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, pp. 971-987.
- Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D., 1992, "Chaos and Fractals: New Frontiers of Science", Springer Verlag, Alemania, Berlin, ISBN 0-387-97903-4
- Richards, J. A., Xiuping J., 1999, "Remote Sensing Digital Image Análisis, An Introduction". 3ª ed. Springer. Alemania.
- Sarkar, N., y Chaudhuri B., "An efficient Differencial Box-Counting Approach to Compute Fractal Dimension of Image". IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, vol. 24 no. 1, pp. 115-120.
- Silva, P., Santos, J., Shimabukuro, P., 2003, "Change Vector Analysis technique to monitor selective logging activities in Amazon". IEEE, vol. 4, pp. 2580-2582.
- Singh, A., 1986, "Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat". In Remote Sensing and Tropical Land Management, editado por Eden, M. y Parry, J., (New York: J. Wiley), pp 237–254.
- Vuduc R., 1997," Image segmentation using fractal dimension", IEEE.
- Lyon, J., Yuan, D., Lunetta, R., y Elvidge, C., 1998," A change detection experiment using vegetation indices". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 64, 143–150.