



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

ESTUDIO GEOESPACIAL PARA DETERMINAR ÁREAS

DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE ESPECIES

FORESTALES EN LA SIERRA NEVADA

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS, EN CIENCIAS FORESTALES.

PRESENTA:

LAURA LIZETT SOTO ORTEGA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

JULIO DE 2009

Chapingo, Estado de México



Estudio geoespacial para determinar áreas de distribución potencial de especies forestales en la Sierra Nevada.

Tesis realizada por **Laura Lizett Soto Ortega** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS, EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



M en C. Eduardo Vargas Pérez

ASESOR:



M en C Silvia Terrazas Domínguez

ASESOR



M en C. Enrique Guízar Nolasco

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado a las personas que han sido fundamentales en este paso de mi vida. Especialmente a mi amiga, compañera, cómplice e impulsora de mi vida, mi hija Ximena Nikte, que hace maravillosa la vida con sus ocurrencias, logros y simplemente con su sonrisa.

Agradezco a mi compañero de vida y sueños, Orlando Pantoja, por prestarme sus brazos para festejar los éxitos y consolarme siempre que lo necesite. Gracias mi amor por seguir el camino a mi lado.

A mi madre Rosa Ma. Soto, porque no siempre la comprendo, pero la amare toda la vida. Por siempre tener un minuto para escucharme, por ser incondicional, en las buenas, en las tristezas y en las muy malas. A mi hermana Alma Iseli que la adoro con toda mi alma y que siempre aguanta mis locuras.

Para mis dos grandes amigos, Jeannette Gálvez y Benjamín Vieyra, con los que además de compartir el maravilloso gusto por la Biología y el café, han sido un gran apoyo para mi vida tanto personal como profesional, ya que sin ellos no sería los que soy hoy.

Para mi papá Rolando Rosas que ha sido fundamental para realizar este proyecto y por ayudarme a aclarar el camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo, por los recursos otorgados durante mi estancia y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Al M en C. Eduardo Vargas Pérez y a la M en C. Silvia Terrazas, por el apoyo prestado en todo momento.

Al Programa de Movilidad Estudiantil promovido por la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), por tanto a la Banca Santander, que hacen posible la vinculación con otras Universidades, para el enriquecimiento de la enseñanza.

Al Profesor Gilberto Hernández, por toda la ayuda que me ha brindado desde que los conozco, por su amistad y apoyo incondicional. Gracias por su orientación, tiempo y por compartir sus conocimientos.

A Miguel Bravo, por su tolerancia, y su consejo, por haberme ayudado en este trabajo que no fue nada fácil para mí.

Gracias a Georgina Florencia, por sus siempre bien atinados consejo y su apoyo incondicional.

DATOS BIOGRÁFICOS

Laura Lizett Soto Ortega nació el jueves 7 de Febrero de 1980, en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México. Sus estudios de preparatoria los realizó de 1996 a 1999 en el CBtis 133, en Coacalco Edo. de México. Curso la licenciatura en Biología de 1999 a 2005 en la Universidad Autónoma Metropolitana. Colaboró durante tres años en el laboratorio de Comportamiento Animal de la UAM-I, en este tiempo coordinó grupos de trabajo, para el monitoreo del comportamiento del lobo mexicano *Canis lupus baleyi* en el Zoológico de Aragón y Chapultepec. También desarrolló un paquete educativo acerca del lobo mexicano, dirigido a niños, para educación ambiental; este trabajo fue presentado en el congreso de Mastozoología en el 2004.

Participó en el proyecto de Investigación en la UNAM, llamado Captura de Carbono y Paseo Ecológico Jaguaroundi, el cual, fue galardonado con una mención honorífica especial por parte del Premio al Merito Ecológico 2004, CECADESU – SEMARNAT. Colaboro en la elaboración del Catalogo Cartográfico de Lenguas Indígenas, para el Instituto Nacional de Lenguas Indígenas (INALI), 2006. Al participar en este trabajo bajo la coordinación del Biólogo Gilberto Hernández, nace una inquietud por el manejo de los Sistemas de Información Geográfica. Respondiendo a esta inquietud hace el examen en la Universidad Autónoma Chapingo, para ingresar al posgrado de Ciencias Forestales y realizar la maestría en el área de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota. Obtuvo una beca de movilidad Santander Universia 2008-I, ANUIES, para realizar una estancia de investigación en la UAM-I, en el laboratorio de Recursos Naturales, bajo la tutela del Biol. Gilberto Hernández.

Estudio geoespacial para determinar áreas de distribución potencial de especies forestales en la Sierra Nevada

Geospatial study to identify areas of potential distribution of species forest in the Sierra Nevada

Laura Lizett Soto Ortega

RESUMEN

El siguiente trabajo se realizó en un bosque de coníferas ubicado en la Sierra Nevada en el Estado de México.

El trabajo pretende establecer áreas de distribución potencial a través de dos metodologías, en la primera, se utilizó Percepción Remota, se hizo una clasificación digital de una imagen de satélite.

Dada la complejidad para clasificar zonas arbóreas con respuestas espectrales muy similares, no fue posible determinar áreas a nivel de especies, por lo que, se tomó como criterio de clasificación el tipo de hoja de los árboles, aprovechando las diferentes características ópticas de éstas, formando así tres grupos *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica* (hojas escuamiformes), *Quercus* (hojasas) y *Pinus* (hojas lineares).

En el segundo método se ocuparon Sistema de Información Geográfica, y a partir de variables, como orientación, altitud, pendiente, edafología y geología, se obtuvieron mapas booleanos para cada

especies, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *P. ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. leiophylla*, etc. Los resultados de esta metodología nos proporcionan áreas

potenciales de distribución para determinada especie, es decir áreas que cumplen con todos los requerimientos ecológicos para el establecimiento de la especie.

ABSTRACT

The following work was done in a pine forest that is located in the Sierra Nevada in State of Mexico.

The work was performed in order to establish potential distribution areas following two methodologies. In the first study, Remote Perception was applied--a digital system of classification--a satellite image was used.

Because of the complexity of classifying tree zones that delivered very similar results by spectrum, it was not possible to determine areas based on species. Therefore, I applied a criterion based on the classification of the types of leaves of the trees, taking advantage of the different visual characteristics, and thereby forming three groups: *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica* (slender leaves), *Quercus* (broad leaf), and *Pinus* (linear leaves).

In the second study, the System of Geographic Information was applied, and

based on variables such as aspect, altitude, slope, ground composition, and geology, Boolean maps were designed for each species, including *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *P. ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. leiophylla*, and others. The results of this methodology helped devise potential areas of distribution for each defined species, in other words, those that fulfil all of the ecological requirements for the establishment of each species.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vi
Tabla de contenido	viii
Lista de figuras	xii
Lista de cuadros	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	4
3. HIPÓTESIS	4
4. ÁREA DE ESTUDIO	5
4.1. Caracterización de la Sierra Nevada	6
4.2. La Sierra Volcánica Transversal o Eje Neovolcánico	7
4.3. Zonas relevantes en el Ordenamiento de la Sierra Nevada	8
4.3.1. Zona de pino en riesgo	8
4.3.2. Zona de oyamel - pino bajo manejo	9
4.3.3. Zona de encino – pino	11
5. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPECIES REPORTADAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO	13
5.1. <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	13
5.2. <i>Quercus laurina</i> Humb et Bonp	15
5.3. <i>Quercus rugosa</i> Née	17
5.4. <i>Cupressus lusitánica</i> Mill. var. <i>lusitánica</i>	20
5.5. <i>Pinus ayacahuite</i> var. <i>veitchii</i> (Roezl) G.R. Shaw	22

5.6. <i>Pinus montezumae</i> Lamb. var. <i>montezumae</i>	24
5.7. <i>Pinus leiophylla</i> Schl. & Cham. var. <i>leiophylla</i>	27
5.8. <i>Pinus teocote</i> Schl. & Cham.	28
6. TELEDETECCIÓN	30
6.1. Componentes de un Sistema de Teledetección	31
6.2. Superficies reflejantes	32
6.3. Principio físicos	33
6.4. Firmas espectrales	34
6.5. Imagen multiespectral	35
6.6. Resolución de un sensor	36
6.6.1. Resolución espacial	36
6.6.2. Resolución radiométrica	37
6.6.3. Resolución espectral	37
6.6.4. Resolución temporal.	37
6.7. Radiación	39
6.7.1. Energía radiante	39
6.7.2. Frecuencia	40
6.7.3. Longitud de onda	40
6.8. Refracción	40
6.9. Espectro electromagnético	41
6.9.1. Luz	43
6.9.2. Color	43
6.9.3. Pigmentos	43
6.9.4. Coeficiente de absorbencia	44
6.9.5. Transmisión	44
6.9.6. Absorbancia	44
6.9.7. Ley de Beer	44

6.9.8. Ley de Lambert	45
7. CORRECCIONES DE LA IMAGEN	46
7.1. Fuentes de error de una imagen espacial	47
7.2. Correcciones radiométricas	50
7.3. Reflectividad aparente: modelo simplificado	50
7.4. Correcciones atmosféricas	53
7.5. Correcciones de sombreado topográfico	53
7.6. Correcciones geométricas	56
7.7. Categorización o clasificación de la imagen	57
7.8. Macro – lenguaje de ERDAS (EML)	59
7.9. Clasificación digital	59
8. MATERIAL Y METODOLOGÍA	62
8.1. Clasificación digital	62
8.1.1. Correcciones geométricas	63
8.1.2. Índice de vegetación	65
8.1.3. Tipo de muestreo	66
8.1.4. Fases de la clasificación	67
8.1.5. Clasificador de máxima probabilidad	69
8.2. Mapas de la distribución potencial de especies forestales por medio de Sistemas de Información Geográfica.	70
8.2.1. Descripción de las variables	74
8.2.1.1. Geología	74
8.2.1.2. Edafología	74
8.2.1.3. Pendiente	75
8.2.1.4. Orientación	75

9. RESULTADOS	77
9.1. Clasificación digital.	77
9.2. Áreas de distribución potencial de especies forestales en la Sierra Nevada.	89
9.2.1. Distribución potencial de <i>Abies religiosa</i>	90
9.2.2. Distribución potencial de <i>Cupressus lusitanica</i>	91
9.2.3. Distribución potencial de la asociación de <i>Abies religiosa</i> , <i>Cupressus</i> sp y <i>Pinus montezumae</i>	92
9.2.4. Distribución potencial de <i>Quercus</i>	93
9.2.5. Distribución potencial de <i>Arbutus</i> (Madroño)	94
9.2.6. Distribución potencial de <i>Quercus</i> y <i>Arbutus</i> (Madroño)	95
9.2.7. Distribución potencial de <i>Pinus teocote</i>	96
9.2.8. Distribución potencial de <i>Pinus montezumae</i>	97
9.2.9. Distribución potencial de <i>Pinus leiophylla</i>	98
9.2.10. Distribución potencial de <i>Pinus ayacahuite</i>	99
9.2.11. Mapa de la distribución potencial de especies con hojas escumiformes en la Sierra Nevada, en el Edo. de México	100
9.2.12. Mapa de la distribución potencial de especies con hojas amplias (hojosas) en la Sierra Nevada, en el Edo. de México	101
9.2.13. Mapa de la distribución potencial de especies con hojas lineares en la Sierra Nevada, en el Edo. de México.	102
10. DISCUSIÓN	103
10.1. Clasificación digital.	103
10.2. Áreas potenciales de distribución.	104
11. CONCLUSIÓN	105
12. BIBLIOGRAFÍA	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1a. Muestra la ubicación del Estado de México dentro del territorio mexicano.

Figura 1b Muestra el área de estudio dentro del Estado de México.

Figura 2. Muestra la ubicación geográfica de la ladera dentro del Estado de México (área de estudio).

Figura 3. Muestran los principales componentes de un sistema de Teledetección pasivo (Tomado de Marcelo Miranda Salas, Departamento de Ciencias Forestales. Abril, 2007)

Figura 4. Propagación de la energía electromagnética.

Figura 5. Se observan las firmas espectrales que distinguen a diferentes coberturas de la tierra. (Tomado de León Fanpaulieb, 2007).

Figura 6. Resolución temporal. Modelo de exploración de Landsat y órbitas sucesivas (Taranik, 1978)

Figura 7: El espectro electromagnético. Tomado de Salisbury, 1994.

Figura 8. Calculo simplificado de la reflectividad. Tomado de Chuvieco, 2006

Figura 9. Efectos atmosféricos sobre el cálculo de la reflectividad. Tomado de Chuvieco, 2006

Figura 10. Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor. Tomado de Chuvieco, 2006

Figura 11. Firmas espectrales en las diferentes bandas y en el NDVI,

Figura 12. Diagramas de dispersión, 12a banda 1, 12b banda 2, 12c banda 3, 12d banda 4 y 12e Índice de Vegetación.

Figura 13. Separabilidad numérica de cada clase (especie). Sobresale la separabilidad entre *Pinus* y *Quercus*.

Figura 14. Matriz de error previa a la clasificación,

Figura 15. En el diagrama de dispersión se observa en el eje de las abscisas la banda infrarroja y en el eje de las ordenadas la banda del rojo.

Figura 16. Imagen clasificada, en la que se observan áreas con la presencia de las especies *Quercus*, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus*.

Figura 17. Distribución potencial de *Abies religiosa*

Figura 18. Distribución potencial de *Cupressus lusitanica*.

Figura 19. Distribución potencial de la asociación de las especies *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae*.

Figura 20. Distribución potencial de *Quercus*.

Figura 21. Distribución potencial de *Arbutus*.

Figura 22. Distribución potencial de la asociación de *Quercus* y *Arbutus*.

Figura 23. Distribución potencial de *Pinus teocote*.

Figura 24. Distribución potencial de *Pinus montezumae*.

Figura 25. Distribución potencial de *Pinus leiophylla*.

Figura 26. Distribución potencial de *Pinus ayacahuite*.

Figura 27. Distribución potencial de *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y la asociación de *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae*.

Figura 28. Distribución potencial de *Quercus*, *Arbutus* (Madroño) y la asociación de las dos especies. Especies de hojas amplias (hojosas)

Figura 29. Distribución potencial de los pinos presentes en la zona, *Pinus teocote*, *P. montezumae*, *P. leiophylla* y *P. ayacahuite*.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Resoluciones del sensor Landsat. Tomado de la página landsat.gsfc.nasa.gov, 2009

Cuadro 2. Características de la imagen Landsat ETM.

Cuadro 3. Valores obtenidos de la conversión de unidades ITRF 92 a NAD 27 por medio del convertidor de la página de INEGI.

Cuadro 4. Variables de los perfiles bioclimáticos.

Cuadro 5. En esta tabla se muestran los rangos de orientación cardinal.

Cuadro 6. Medias de los campos de entrenamiento. Antes de correr la clasificación, es decir sólo consideran los campos propuestos por el clasificador.

Cuadro 7. Matriz de confusión de la imagen clasificada.

Estudio geoespacial para determinar áreas de distribución potencial de especies forestales en la Sierra Nevada.

Biol. Laura Lizett Soto Ortega

1. INTRODUCCIÓN

La diversidad de los recursos forestales de México es resultado de la variedad ambiental y biológica (Medrano, 2004). En el mundo las regiones boscosas son las más modificadas por actividades humanas y por una larga historia de sobreexplotación, lo que ha tenido un impacto dramático sobre la diversidad biológica a todos los niveles, ecosistemas, comunidades, poblaciones y especies (Norton, 1996).

México es considerado entre los 12 países megadiversos del mundo (Mittermeier y Goettsch, 1997). Los bosques y selvas cubren más de 65 millones de hectáreas, de las cuales alrededor de 34 millones corresponde a vegetación primas (Inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2004-2009), si bien, México es considerado un centro de diversidad tanto de pinos como de encinos, con más del 50% de todas las especies de pino y más de 150 especies de encinos del planeta (WWF, 2007), la acelerada pérdida de la vegetación primaria ha llevado consigo la disminución de los diversos componentes de la biodiversidad (Palacios, J *et al.* 2000). Por lo que, es fundamental realizar investigaciones que lleven a un conocimiento actual del estado de los bosques, en cuanto a su composición y extensión.

Algunos de los trabajos relacionados con el estudio de los bosques son los siguientes: Miranda y Hernández, X (1963), el del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (1971 y años posteriores), Rzedowski (1978), el inventario forestal con base en imágenes AVHRR (1991), el Inventario Nacional Forestal Periódico (1994), el Inventario Forestal Nacional de 2000 y finalmente el Inventario Forestal y de Suelo de 2004 a 2009.

Es notorio que el balance completo de la diversidad biológica de México es una tarea muy difícil y poca atención se ha puesto a la distribución geográfica de las plantas mexicanas (Villaseñor y Téllez, 2004). Con el objetivo de conocer con más precisión la distribución geográfica de los organismos, se han propuesto diversos modelos predictivos que ayudan a estimar su distribución potencial (Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2003). De esta manera, se han formulado métodos para predecir áreas donde pudiera existir un taxón de interés. Los modelos ayudan a determinar dónde se encuentran las condiciones ambientales más adecuadas para que la especie prospere, en función de parámetros obtenidos de recolectas previas (Villaseñor y Téllez, 2004). La mayoría de los modelos que predicen la presencia probable de una especie en un sitio no explorado, generalmente correlacionan los sitios ya conocidos, donde la especie prospera con un conjunto de factores ambientales, especialmente climáticos (Chapman y Busby, 1994). En este estudio se pretende generar mapas detallados de la distribución potencial de especies forestales como *Abies religiosa*, *Quercus sp*, *Pinus ayacahuite*, *P. montezumae*,

P. teocote, etc., aprovechando tanto las propiedades ópticas del dosel, las particularidades de los sensores remotos y las bondades de los softwares especializados para el análisis de la información, que nos permiten el análisis de datos geoespaciales, por medio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica.

2. OBJETIVOS

General

- Establecer áreas de distribución potencial de especies forestales en la Sierra Nevada, por medio de la aplicación de dos metodologías que conllevaban el uso de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica.

Particulares:

- Generar una imagen clasificada que represente la distribución de especies forestales de la Sierra Nevada, por medio de Percepción Remota.
- Elaborar un perfil ambiental de las especies forestales reportadas para el área de estudio.
- Obtener mapas de la distribución potencial de especies forestales de la Sierra Nevada, a partir del perfil ambiental de cada especie.

3. HIPÓTESIS

- El procedimiento digital de las imágenes de satélite permitirá discriminar las firmas espectrales por cada género o grupo de especie estudiada.
- Los mapas de distribución potencial de las especies forestales tienen relación con los factores ambientales evaluados.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en un bosque templado de la región fisiográfica Sierra Volcánica Transversal, al oriente del Estado de México. La ladera abarca los municipios de Chalco, Tlalmanalco y Amecameca. Los siguientes mapas muestran la ubicación del área de estudio.



Figura 1a. Muestra la ubicación del Estado de México dentro del territorio mexicano.

Figura 1b Se observa el área de estudio dentro del Estado de México.

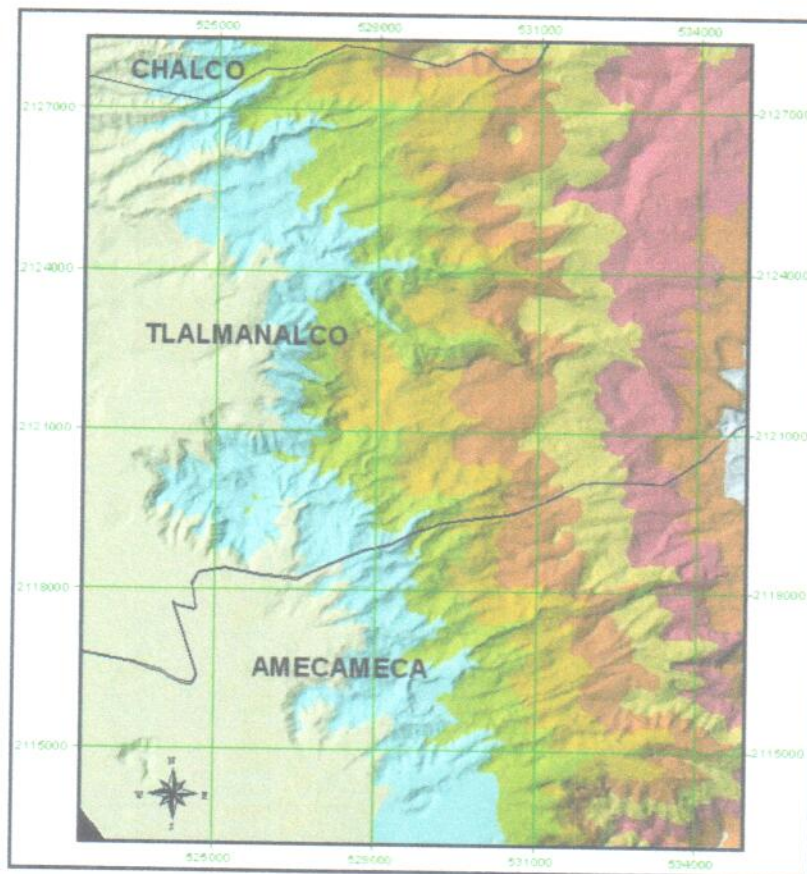


Figura 2. Muestra la ubicación geográfica de la ladera dentro del Estado de México (área de estudio).

La Sierra Nevada se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Sierra Volcánica Transversal o Eje Neovolcánico (Medrano, 2004), partiendo de este hecho es importante la caracterización de área de estudio, para tener una mejor comprensión de sus condicionantes para la investigación.

4.1. Caracterización de la Sierra Nevada

La posición latitudinal del territorio mexicano y los procesos geológicos que se han tenido a través del tiempo, han derivado en una diversidad de ambientes a diferentes niveles, por lo que no es raro encontrar diferentes formaciones

vegetales a nivel regional, de esta misma manera los gradientes latitudinales, la precipitación, el suelo, la humedad y la exposición juegan un papel fundamental para la ubicación de la vegetación a menor escala (Medrano, F. 2004), para comprender esta diversificación en el área de estudio es importante tomar en consideración los aspectos de la región fisiográfica a la que corresponde.

4.2. La Sierra Volcánica Transversal o Eje Neovolcánico.

Se distribuye en la porción central del país más o menos en el paralelo 19° N. En parte de los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Veracruz, y el Distrito Federal. Esta provincia se extiende de oeste a este desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México y se considera como una enorme masa de rocas ígneas volcánicas, derrames de lava y otras manifestaciones ígneas de la era Cenozoica. En la provincia se encuentran volcanes de gran altura como el Pico de Orizaba (5,610 msnm), Popocatepetl (5,465 msnm), Iztaccíhuatl (5,230 msnm), Nevado de Toluca (4,680 msnm) y el Nevado de Colima o de Fuego (3838 msnm).

Resultan características de la provincia las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como los de Pátzcuaro y Zirahuén, o los depósitos de lagos antiguos, como los de la cuenca endorreica del llamado Valle de México, o bien la presencia de cuencas hundidas como la de Chápala convertida en la actualidad en un lago.

Se han hecho grandes esfuerzos para esquematizar el cambio de uso de suelo en esta provincia, un trabajo importante es el Ordenamiento Territorial de la

Sierra Nevada, en el cual, se resaltan las zonas de manejo importantes para el área y la situación actual de la masa forestal y los problemas que se han tenido con cada una de las especies, cuestiones que dificultan nuestras clasificaciones a través de las imágenes de satélite.

4.3. Zonas relevantes en el Ordenamiento de la Sierra Nevada, según.

Con forme al ordenamiento de la Sierra Nevada, las principales zonas de distribución ecológica son:

4.3.1. Zona de pino en riesgo

Superficie: La zona comprende un área de 18,632 ha; incluye los municipios de Ixtapaluca, Chalco y Tlamanalco.

Caracterización: Los terrenos son empinados con alturas de entre 2900 y 3600 msnm, poseen una cobertura semi-abierta de pinos, principalmente de *Pinus hartwegii* en las zonas más altas, *Pinus montezumae* en las zonas medias y *Abies religiosa* en los picos y en las caras norte de los cerros.

Tenencia: Ejidos de San Martín Cuautlalpan, El Santa María Huexoculco, Ej. Río Frío y El Coatepec.

Esquema de manejo: La mayor parte de esta zona forma parte del Parque Nacional Zoquiapan, otra parte esta manejada según los programas de manejo Forestal del Ej. San Martín Cuautlalpan y Ej. Río

Frío. El 18% de esta zona se encuentra en el Área Natural Protegida (ANP), Santuario del Agua Cascada Diamantes, decretada en 2005.

Problemática: En esta zona solo se han resaltado los conflictos de interés para nuestra investigación.

- * Debido a la falta de humedad en la zona, hay poca regeneración natural y ha sido sumamente difícil establecer reforestaciones.
- * Las reforestaciones han sido poco exitosas.
- * Se observa de una tala clandestina intensiva.

4.3.2. Zona de oyamel - pino bajo manejo

Superficie: La zona comprende un área de 16,027 ha; incluye los municipios de Atlautla, Tlalmanalco, Amecameca y Ecatzingo.

Caracterización: Se ubica entre los 2900-3600 msnm. Son bosques densos y altos de (20 a 40m), dominados por *Abies religiosa*, con *Pinus montezumae* y *Pinus ayacahuite*, en suelos húmedos y profundos, ricos en materia orgánica.

Tenencia: Ej. Tlalmanalco, Ej. San Juan Atzacualoya, Ej. Santo Tomas, BC San Juan Tehuixtitlan, Ej. Ozumba, BC Atlautla y BC Ecatzingo.

Esquema de protección: Son principalmente terrenos ejidales, estos bosques fueron manejados desde 1897 a 1991 por la fabrica papelera San Rafael. En 1996 después de una veda de 5 años, los ejidos y comunidades comenzaron aprovechar su propia madera en 1996,

guiados por sus programas de manejo forestal, muchos de los cuales vencieron en el 2006.

En 2005, se registro la Unidad de Manejo Forestal para la región, en cumplimiento con la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable lo cual, favorece el manejo sustentable a escala regional, incluyendo un Sistema de Información Geográfica en común y concordancias entre los respectivos Programas de Manejo Forestal.

El 62% de esta zona se encuentra en dos ANP estatales siendo los Santuarios del Agua y Forestales "Cascada de los Diamantes", "El Salto Atlautla y Ecatzingo". Estas ANP no cuentan con programas de manejo.

Problemáticas:

- * Dificultad para controlar los accesos debido a la gran cantidad de caminos.
- * Turismo masivo y dañino.
- * Proyectos ecoturísticos que aún no consolidan proyectos adecuados y compatibles para el cuidado del bosque.
- * La capacidad instalada de aserraderos en zonas es mucho mayor que el volumen de madera autorizada.
- * Falta de coordinación para el combate de incendios.
- * Utilización desmesurada de *P. ayacahuite* como combustible.

4.3.3. Zona de encino – pino

Superficie: La zona comprende un área de 8,614 ha; incluye los municipios de Ecatzingo, Atlautla, Amecameca, Ixtapaluca, Tlalmanalco y Chalco.

Caracterización: Se ubica entre los 2400 – 3400 msnm. Estos bosques contienen una gran diversidad de especies forestales y de arbustos (madroños, tepozán, tejocote), dominada por encino – pino, de 8 a 12 metros.

Tenencia: Ej. Ixtapaluca, Ej. Tlapala, Ej. Tlalmanalco, Ej. Santo Tomas, Ej. San Antonio, BC Chalma, Ej. Santiago, BC Atlautla, BC Tecomaxusco y BC Ecatzingo.

Esquema de protección y manejo: Regidos principalmente por programas de manejo forestal, en los cuales, están clasificados como tierras de producción. Desde 2005, gran parte de esta zona está protegida como Santuario del Agua y Forestal. Son bosques ejidales y comunales que no han sido de interés ni para la papelera ni para los aserraderos.

Problemática:

- * Los programas de manejo tienen pocas recomendaciones para esta zona, por ser productoras de maderas duras, con poco valor en los mercados locales.
- * Plagas como (descortezador y muérdago).

- * Sobre explotación de recursos no maderables: tierra de encino, musgo, heno, hongos, hierbas, ocote y fauna silvestre.
- * Destrucción del árbol nuevo por ganado e incendios provocados por ganaderos.
- * Destrucción de encinos por parte de carboneros.
- * Tala clandestina hormiga para leña por la comunidad local.
- * Desección de los ríos y por tanto, pérdida de humedad.

5. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES REPORTADAS PARA EL ÁREA.

5.1 *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.

Sinonimias: *Pinus religiosa* Kunt, *Abies religiosa* var. *emarginata* Look et Martínez.

Nombres comunes: Abeto – Veracruz; acshoyatl – México; bansú (lengua otomí) – Hidalgo; ocopetla - Teotepec, Gro.; oyamel - México, Hidalgo; pinabete – Michoacán y Jalisco; thúcum (lengua tarasca) – Michoacán; ueyomel – Ixcaltepec Gro y xolócotl – México.

Forma biológica: Árbol monoico de 35 a 40 m de altura, en ocasiones hasta 60 m, y diámetro normal hasta de 1.80 m

Fenología

Hojas: Perennifolio.

Flores: Las estructuras reproductivas masculinas y femeninas se presentan desde diciembre.

Asociación vegetal: Bosque de coníferas, las masas puras formadas por esta especie son también conocidas como bosque de Abies, bosque de abetos o bosque de oyamel

Hábitat: crecen en lugares montañosos y fríos, en altitudes de 2800 – 3500 msnm.

Entidades: Están presentes en Baja California, Coahuila, Chiapas, Chihuahua, Distrito Federal, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, México, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Sonora, Tlaxcala y Veracruz.

Requerimientos Ambientales

	Media	Mínima	Máxima
Altitud (msnm)	Óptima 3,200	2,800	3,500
Temperatura (°C)	De 7 a 15	-12	

Suelo

Clasificación (Soil Taxonomy): Histosol, Inceptisol, Espodosol.

Características físicas.

Profundidad: Generalmente profundos, aunque también en suelos someros

Textura: Limo-arenosa, arcillo-arenosa, arenosa

Pedregosidad: De ligera a moderada

Estructura: Granular o en bloques

Drenaje: Bien drenados

Humedad aparente: Húmedos la mayor parte del año

Color: Café oscuro o rojizo. Los tonos de color corresponden 10 YR, de acuerdo a las Tablas Munsell.

Características químicas: pH de 5 a 7

Materia orgánica: Muy ricos, hasta 70%, especialmente en horizontes superficiales

Precipitación (mm): La precipitación media anual es superior a los 1,000 mm

Tomado de la Ficha Técnica de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham, elaborada por el Sistema de Información para la Reforestación.

5.2 *Quercus laurina* Humb et Bonpl.

Restauración y protección

Esta especie juega un papel importante en la formación y estabilidad del suelo, dado a que la mineralización de su hojarasca, es excelente formando agregados del suelo estables y de buen tamaño. Tales características le confieren un papel importante en la recuperación y conservación de los suelos donde se establece.

Comercial: Por la calidad de su madera es de gran potencial productivo.

Nombres comunes: Chilillo, encino colorado, atualpitzáhuatl, encino blanco, encino laurelillo, encino roble, encino xicatahua, tesmolera, encino uricua, encino chilillo; ahucepitzahuac - Edo. de México; encino ahualpitzáhual-Veracruz; encino jarilla- Guanajuato y encino nechilahue- Puebla.

Forma biológica: Árbol de 10 a 20 m (1) y hasta 40 m de altura, con diámetro normal de 30 a 40 cm, y hasta 150 cm.

Fenología

Hojas: perennifolio; tardíamente deciduas

Flores: florece desde finales de febrero hasta abril

Frutos: fructifica entre Junio y Diciembre; la fructificación es bianual

Asociación vegetal: Bosque de *Quercus*, bosque mesófilo de montaña, bosque de coníferas.

Entidades: Se distribuye en varios estados del país, con mayor abundancia y frecuencia en el eje neovolcánico. Se encuentra en Chiapas, Colima, Distrito Federal, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Edo. de México, Michoacán,

Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas

Requerimientos Ambientales

Altitud (msnm) 1,500 a 3,300, entre los 2,000 y 2,400 msnm.

Suelo

Clasificación (FAO): Rendzinas, Regosol, Cambisol, Latosol, Andosol y Vertisol.

Características físicas.

Profundidad: Relativamente profundo de 0.46 a 1.10 m.

Textura: limosa, arcillosa; franca-arcillosa-arenosa, franca-arenosa.

Pedregosidad: de nula a incipiente

Estructura: granular

Características químicas: pH: 4.8 a 7.5

Materia orgánica: de 2.76 a 35.5 %

En Puebla crece en laderas exposición suroeste. En Guerrero se encuentra en lugares planos o de pendiente ligera. Por lo general, esta especie crece en laderas de cerros, barrancas húmedas y sitios montañosos; también se le encuentra sobre suelos calizos.

Esta especie puede habitar en climas semicálidos subhúmedos, semicálidos húmedos y templados subhúmedos, aunque prefiere los climas templado húmedo y templado seco. Los encinos de esta especie son dominantes en los bosques maduros y medianamente maduros de los altos de Chiapas, y pueden establecerse en etapas tempranas de la sucesión.

Usos: La madera se utiliza principalmente para la fabricación de chapa y para obtener papel tipo kraft; también se usa para pisos, lambrín, muebles rústicos, utensilios domésticos, tarimas para carga, instrumentos musicales, bancos, cabos de herramientas, vigas de construcción, postes, leña y carbón.

Tomado de la Ficha Técnica de *Quercus laurina* Humb et Bonp, elaborada por el Sistema de Información para la Reforestación.

5.3 *Quercus rugosa* Née

Restauración y protección: Se sugiere como una especie clave en la rehabilitación y restauración de bosques, ya que pueden establecerse en etapas tempranas de la sucesión secundaria e incluso en suelos desnudos y erosionados sin embargo, en ciertas ocasiones su reintroducción en etapas tempranas de la restauración puede verse limitada. Esta especie aporta beneficios importantes ya que contribuye a la formación y estabilización del suelo, ayuda a mantener el equilibrio ecológico de cuencas pues contribuye a la infiltración y la conservación de los mantos acuíferos subterráneos.

Urbano: Como ornamental en calles y avenidas, un árbol idóneo para las reforestaciones urbanas, ya que su lento crecimiento evita las interferencias con el cableado aéreo de las calles.

Sinonimia: *Quercus ariifolia* Trel; *Quercus bonplandiana* Sweet.; *Quercus conglomerata* Trel.; *Quercus decipiens* Mart. et Gal.; *Quercus diversicolor* Trel.;

Quercus durangensis Trel.; *Quercus innuncupata* Trel.; *Quercus purpusi* Trel.;
Quercus reticulata Humb. et Bonpl.; *Quercus rhodophlebia* Trel.; *Quercus*
spicata Humb. et Bonpl.; *Quercus spicata* Liebm.; *Quercus suchiensis* Warb.;
Quercus uhdeana Trel y *Quercus velliifera* Trel.

Nombres comunes: Encino de asta- Colima; encino blanco- Baja California;
encino cuero- Chihuahua; tulán, roble -Chiapas; encino blanco liso- Durango;
encino quiebra hacha- Hidalgo; encino roble - Guerrero; palo colorado – San
Luis Potosí; Cu-hó (chinanteco), T-nuyá (zapoteco)- Oaxaca; Encino avellano,
Tocuz- Michoacán; encino de miel, encino roble, encino prieto y encino negro.

Forma biológica: Árbol de 8 a 15 m, aunque llega a medir hasta 30 m de
altura, y un diámetro de 10 a 80 cm o más. Presenta una copa amplia
redondeada y es de lento crecimiento.

Fenología

Hojas: Perennifolio, los árboles carecen de follaje regularmente menos de un
mes a finales de invierno y a principios de primavera, en los bosques de
Michoacán.

Flores: Florece de Marzo a Junio, y presenta polinización anemócora.

Frutos: Fructifica de Octubre a Febrero.

Asociación vegetal: Bosque de *Quercus*, bosque de pino- encino, bosque de
pino, bosque mesófilo de montaña y matorral xerófito.

Entidades: Se encuentra en las regiones montañosas de Sonora, Chihuahua,
Coahuila, Veracruz, Chiapas, es particularmente abundante en el centro del
país, en el Edo. de México y en el Distrito Federal, Hidalgo, Michoacán,

Querétaro, Puebla, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato. También se encuentra en Baja California, Guerrero, Michoacán, Zacatecas y Jalisco.

Requerimientos Ambientales

	Media	Mínima	Máxima
Altitud (msnm)	Es más frecuente entre los 1,800 y 2,800 msnm	1,100	3,050
Temperatura (°C)	12 a 13	9.3	22.6

Suelo

Clasificación (FAO): Andosol, Luvisol.

Características físicas.

Profundidad: de someros o profundos.

Textura: migajón-arenosa, areno-migajosa, arenosa.

Pedregosidad: de incipiente a moderadamente pedregosos.

Humedad aparente: húmedos

Color: oscuro, rojizo, grisáceo, amarillento.

Características químicas: pH: ácido de 5.4 a 6.40

Materia orgánica: varía de 1.17 a 4.7% en la capa superficial.

Otros: Especie tolerante a suelos ácidos y someros.

Precipitación (mm): 1,230 a 1,619 mm anuales.

Otros: Esta especie prospera en laderas de cerros, barrancas y cañadas húmedas, también se encuentra en terrenos planos y en lugares secos. Los individuos adultos de esta especie son resistentes a las sequías. Toleran

heladas cuando adulto, la sombra parcial, la contaminación ambiental y los fluoruros.

Usos: La madera en forma de leña y carbón se usa como combustible, también se utiliza en la elaboración de pulpa para papel y para fabricar pilotes, durmientes y postes para cercas. Las hojas y la corteza contienen una gran cantidad de taninos, los cuales se utilizan para curtir pieles; las hojas y los frutos son consumidos por el ganado bovino, porcino y caprino. El fruto se usa en la elaboración de café, se menciona que esta infusión ayuda a atenuar la embriaguez. La corteza tiene propiedades astringentes y es auxiliar para detener pequeñas hemorragias y reducir inflamaciones de la piel, producidas por ortigas y picaduras de insectos; la corteza también se utiliza para apretar los dientes y tratar úlceras.

Tomado de la Ficha Técnica de *Quercus rugosa* Née elaborada por el Sistema de Información para la Reforestación.

5.4 *Cupressus lusitánica* Mill. var. *lusitanica*

Restauración y protección: En algunos lugares se utiliza en programas de reforestación.

Urbano: Es apreciado para parques y jardines

Sinonimia: *Abies guatemalensis* Rehder, *Cupressus macnabiana* Fo y *Cupressus nevadensis* Abrams.

Nombres comunes: Ciprés lusitano- México y América Central; ciprés mexicano- América Central y E.U.A.

Estatus: Sujeta a protección especial.

Origen: Especie nativa de México.

Forma biológica: Árbol que puede alcanzar hasta 40 m de altura y más de 100 cm de diámetro normal.

Fenología

Hojas: Perennifolio

Flores: La floración se presenta de Septiembre a Octubre, los árboles de 10 a 12 años producen semillas de buena calidad.

Frutos: Los conos se encuentran maduros de Octubre a Enero; la producción de conos es anual, la mejor edad para su reproducción inicia entre los 15 y 20 años.

Asociación vegetal: Bosque de coníferas, bosque de *Quercus*, bosque mesófilo de montaña.

Entidades: Se le encuentra principalmente en la Sierra Volcánica Transversal. Los estados donde se distribuye son Chihuahua, Durango, Sinaloa, Nayarit, Aguascalientes, Jalisco, Michoacán, Guerrero, México, Querétaro, Distrito Federal, Oaxaca, Puebla, Veracruz e Hidalgo.

Requerimientos Ambientales

	Media	Mínima	Máxima
Altitud (msnm)	2,500 generalmente > 2,500	1,400	3,300
Temperatura (°C)	21.6	20.6	22.2
Precipitación	2,213	2,131 a 1500	2,541 a 3000

Suelo

Características físicas

Profundidad: profundos

Textura: de arcillosa a limosa

Drenaje: bien drenado

Características químicas: ph. de ácido a neutro

Otros: Se desarrolla en laderas, barrancas, o cimas rocosas.

Tomado de la Ficha Técnica de *Cupressus lusitánica* Mill, elaborada por el Sistema de Información para la Reforestación.

5.5 *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* (Roezl) G.R. Shaw

Nombres locales: Acalocote, Ayacahuite, Ocote gretado, Pinabete, Pino gretado, Pino tabla.

Hábitat: En bosques mixtos de coníferas, en sitios mesófilos de montaña. Este pino es con frecuencia un árbol que domina a otros y vive en pequeños

arbolados, su mejor desarrollo lo alcanza en suelos margosos y bien desarrollados.

Distribución: Desde el sur de México, Guatemala y el Salvador, en México en los estados de: Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tlaxcala, México, Morelos, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

	Media	Mínima	Máxima
Altitud (msnm)	1500	1900-3200	-3600
Temperatura (°C)	De 11 a 17°C en promedio	-5 y 8°C	19° y 28°C

Se localiza en partes altas escarpadas de cañadas y laderas de cerros muy húmedos, con pendientes que varían de 15% pero por lo general en sitios con pendientes mayores a 30%. Las posiciones dominantes son noreste, norte y este, aunque se presentan en otras como sur, sureste y noroeste.

En el Altiplano mexicano habitan en lugares de clima templado subhúmedo con lluvias en verano y bajo porcentaje de lluvias invernales.

Precipitación anual: en promedio varía entre 1000 a 1800mm, con más de 129 días de lluvia.

Los suelos en donde se desarrollan son suelos húmedos y profundos de 60 a 140cm; con abundantes rocas superficiales, con valores de materia orgánica de medio a muy rico (.5 a 10%); tiene drenaje de rápido a moderado (Zamora y Castellanos, 1999).

5.6 *Pinus montezumae* Lamb var. *montezumae*.

Restauración y protección: Se ha utilizado con éxito en varios programas de reforestación, para la protección de cuencas hidrográficas y restauración de suelos degradados.

Comercial: Especie maderable de gran importancia económica. Clasifica como excelente para la fabricación de papel con un grado de calidad III, se recomienda incorporar esta especie en proyectos de plantaciones cuyo objetivo futuro sea la producción de pulpa de papel

Sinonimia: *Pinus ocampii* Roetzl, *Pinus rinzii* Roetzl, *Pinus lindleyana* Loud. ex Lind et Gordon, *Pinus montezumae* forma *macrocarpa* Martínez, *Pinus montezumae* var. *mezambranus* Carvajal.

Nombres comunes: Pino, ocote, pino montezuma, chalmaite blanco – Veracruz; pino real, yutnu-santu - Oaxaca; pino blanco, ocote macho.

Forma biológica: Árbol de 25 a 30 m y diámetro de 50 a 90 cm; con un crecimiento de rápido a moderado.

Fenología

Hojas: Perennifolio.

Flores: Floración de Febrero a Abril.

Frutos: La maduración de los conos generalmente ocurre a los 26 meses después de la polinización, de Abril a Junio, la apertura de los conos se ve favorecida por la ocurrencia de las altas temperaturas en esa temporada. Es común que la producción de conos se concentre en “años semilleros”, los

cuales se pueden presentar cada 3 o 5 años, dependiendo de las condiciones climáticas.

Asociación vegetal: Bosque de *Quercus* y bosque de coníferas.

Entidades: En México presenta una amplia distribución, extendiéndose sobre la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas. Se ha reportado en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Hidalgo, Tlaxcala, Hidalgo, Puebla, Veracruz, México, Michoacán, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas; Colima, Morelos, Querétaro, Tamaulipas, Zacatecas y Distrito Federal

Requerimientos Ambientales

	Media	Mínima	Máxima
Altitud (msnm)	2,500	1,150 - 2,000	3,150 - 3,200
Temperatura (°C)	8 a 14; 10 a 24.		

Suelo

Clasificación (FAO): Andosol

Características físicas

Profundidad: profundos; de moderadamente profundos a profundos.

Textura: migajón-arenosa, arenosa, areno-limosa.

Pedregosidad: no pedregosos.

Estructura:

Drenaje: bien drenados.

Características químicas: pH: 5 - 7.

Materia orgánica: ricos.

Fertilidad: de media a alta.

Otros: Los suelos donde se desarrolla son de origen volcánico, ubicados en las mesetas altas y pendientes bajas de las montañas, sitios donde se encuentran los mejores ejemplares. Los suelos son ricos en Nitrógeno, Calcio y Potasio. En condiciones naturales esta especie se encuentra creciendo en suelos erosionados.

Precipitación (mm): El intervalo de precipitación va desde los 800 hasta los 1,000mm anuales o más; varía de 500 a 1,500 mm, prospera mejor a los 800 mm anuales. Esta especie también se pueden desarrollar en sitios secos o áridos, bajo estas condiciones el crecimiento es lento y los árboles son de baja estatura y muy ramificados. Presenta una estrategia de crecimiento llamada "grass stage", cespitosa. Mediante esta estrategia durante los primeros cinco años los árboles jóvenes crecen muy lentamente, generalmente de 15 a 30 cm. Sin embargo, el grueso y denso crecimiento de las hojas formado a nivel del suelo aparentemente protege al joven tallo del daño de los incendios. Bajo suelo, una enorme raíz se desarrolla durante este periodo, después del cual, un rápido crecimiento del tallo y la corteza iniciará.

Cuando se encuentra en estado cespitoso es tolerante a la sombra, es una especie muy resistente a heladas y condiciones de alta montaña.

Usos: Su madera se utiliza para la fabricación de muebles, estructuras, celulosa, cajas de empaque, puntales para minas, durmientes, postes, duelas, cercas, construcciones pesadas y livianas, chapas, triplay y extracción de resina. La resina (trementina) se emplea en la fabricación de aguarrás y brea.

Tomado de la Ficha Técnica de *Pinus ayacahuite* Ehren, elaborada por el Sistema de Información para la Reforestación.

5.7 *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. var. *leiophylla*

Nombres comunes: Ocote, Pino prieto, Pino chino y en el Estado de México se conoce como ocote chino.

Forma biológica: Árbol con tronco y copa generalmente estrecha, hasta 20-30 m de altura y de 50 a 85 cm de diámetro.

Habitad: Pinares y bosques de pino – encino de montaña a alta montaña, generalmente en suelos profundos y bien drenados, esta especie es un constituyente común de ambos tipos de bosques.

Distribución: México: noroeste de Sonora, oeste de Chihuahua, Durango, Nayarit, Zacatecas, Jalisco, Michoacán, México, D.F., Hidalgo, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Guerrero y Oaxaca. En el estado de México se ha reportado en los municipios de Xalatlaco, Almoloya, Sultepec, Tlalmanalco, Villa Guerrero, San Pedro Ixtepec, Temascaltepec, Faldas del Popocatepetl, Iztaccíhuatly Nevado de Toluca, Río Frio, Encarnación, Amecameca, San Rafael, Huixquilucan, Tenango, Tenancingo y la Venta.

Altitud: Varía de los 1,130 a los 2800 msnm (Eguiluz, 1978; Santillán, 1991).

Clima: Eguiluz (1978) menciona que *Pinus leiophylla* se encuentra dentro de rangos climáticos muy amplios, pudiendo variar desde el tipo subtropical al templado. Las lluvias se distribuyen en primavera y verano, con inviernos casi secos.

Precipitación: de 600 a 1200 mm anuales.

Temperatura: Alcanza su máximo en Marzo, Abril y Mayo, las máximas se acercan a 38°C y las mínimas a -15° C

Suelos: Santillán (1991) estos pinos se desarrollan sobre suelos de textura migajonosos, color ocre o amarillo rojizo, delgados pero en terrazas y valles a más de 30 cm de profundidad, con buen drenaje; con pH de entre 5.5 y 6.5, con bajo contenidos de materia orgánica, bajos también en N, Ca y P, pero ricos en K se les encuentra bordeando las principales masas de coníferas en suelos poco profundos, en donde se desarrollan muy ramificados. En el Eje Neovolcánico, en la zona templada – fría y entre los 1,800 a 4,000 msnm. Perry (1991) menciona que esta especie se desarrolla mejor en lugares con climas cálidos, suelos profundos y bien drenados, con lluvias anuales de 600 a 1000 mm y se encuentran con mayor frecuencia en rangos altitudinales de 2,200 a 2,800 msnm, sin embargo, se le ha encontrado en Morelos a 1,600 y 3,000 msnm en las laderas de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. (Musálem y Martínez, 2003).

5.8 *Pinus teocote* Schiede & Schltdl.

Sinonimia: *Pinus besseriana* Roetzl; *Pinus patula* var. *stricta* Benth. ex Endl.; *Pinus mulleriana* Roetzl; *Pinus microcarpa* Roetzl; y *Pinus hugelii* Roetzl ex Carrière.

Nombres comunes: Pino colorado – Veracruz; pino rosillo – Durango; tso-arza (lengua purépecha) – Michoacán; tzat-adi – Michoacán, purépecha, pino real.

Forma biológica: Árbol mediano, de 8.25 m de altura. En árboles maduros la copa es redondeada, en los jóvenes la copa es densa con una forma piramidal.

Fenología

Hojas: Perennifolio

Flores: Las flores se presenta de Febrero a Abril.

Frutos: Los conos maduran durante los meses de invierno son dehiscentes.

Asociación vegetal: Bosque de coníferas.

	Media	Mínima	Máxima
Altitud (msnm)	2,400	1,500	3,100
Temperatura (°C)	14	- 14	38
Precipitación mm	1,000	600	1,500

Usos: La madera se emplea en la construcción en general. Localmente se usa para postes y para leña. La resina se extrae con fines comerciales.

Tomado de la Ficha Técnica de *Pinus teocote* Schl. & Cham, elaborada por el Sistema de Información para la Reforestación.

6. TELEDETECCIÓN

A continuación se expondrán temas y conceptos que favorezcan la comprensión de esta investigación.

Por Teledetección se entiende, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido y en el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales. Se abordan, dentro del término Teledetección espacial, todos los problemas y procedimientos meteorológicos, la parte técnica que quedan enclavada en el concepto de Percepción Remota (Pérez y Muños, 2006).

A pesar de que en un principio queda contextualizada en este ámbito del conocimiento la Fotogrametría, el carácter cíclico de las tomas desde el satélite, la orientación preferentemente temática, y el carácter multispectral de la información, hacen de la Teledetección espacial una materia diferenciada e independiente dentro de las Ciencias de la Tierra (Lira y Zamora, 1997).

Podemos situar el comienzo de la Teledetección moderna a 1960 con el desarrollo de las primeras misiones espaciales. Al comienzo se trató de programas orientados esencialmente para fines militares sin embargo, no pasó mucho tiempo en que se pusieran en órbita satélites de uso civil (Pérez y

Muños, 2006). En la actualidad hay constantes avances en los sensores remotos, lo que ha permitido alcanzar mejores resoluciones y por tanto la posibilidad de abordar nuevos objetivos científicos.

6.1 Componentes de un Sistema de Teledetección

El fenómeno de la Teledetección es posible gracias a la iteración de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un comportamiento de reflexión variable, condicionado tanto por factores externos (ambientales) como por sus propias características físico - químicas en el momento de la toma de la imagen (Pérez y Muños, 2006). La Figura 3 muestra la interacción de los componentes de la teledetección.

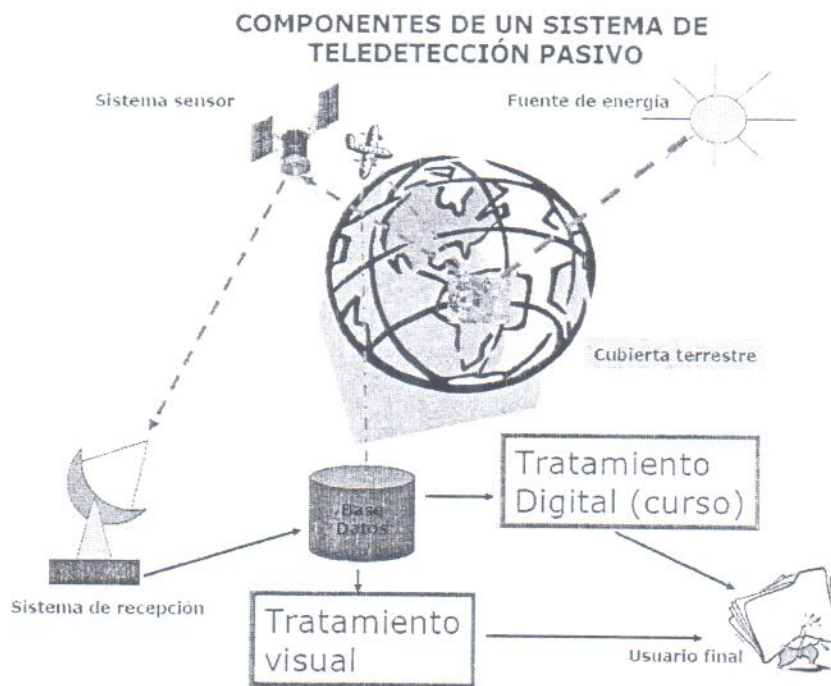


Figura 3. Muestran los principales componentes de un sistema de Teledetección pasivo (Tomado de Marcelo Miranda Salas, Departamento de Ciencias Forestales. Abril, 2007)

El sol es el primer componente importante para generar la radiación electromagnética. La energía originada por el sol se refleja en las distintas cubiertas terrestres, y tras atravesar la atmósfera, es recogida por sensores óptico – electrónico situados a bordo de vehículos espaciales.

Dicha información es transmitida a la Tierra, como una señal digital, en forma de una matriz numérica. En los sistemas de recepción se lleva a cabo un primer tratamiento de la imagen, gracias al cual son depurados algunos errores de índole geométrico o radiométrico antes de ser distribuidas a los usuarios, para realizar tratamientos visuales y obtener nuevos datos que pueden cobrar forma en mapas temáticos o de tablas estadísticas que representan el comportamiento de una determinada variable espacial (Pérez y Muños, 2006).

6.2. Superficies reflectantes

La superficie de nuestro planeta, de modo global, se considera dividida en tres tipos de cubierta: con agua, con vegetación y suelos. Cada una de estas cubiertas encierra múltiples situaciones individuales distintas. Si pensamos en la diferenciación entre tipos de suelos, de especies vegetales o las características que pueden presentar las masas de agua, así como en las circunstancias ambientales en las que puede verse asociadas las cubiertas terrestres, esto nos permite demostrar la enorme variabilidad de las mismas.

Para cada cubierta, el comportamiento espectral, es decir, la forma de reflejar la energía en las distintas longitudes de onda, no es único y homogéneo sino que varía sustancialmente en función de los siguientes factores (Lira, 1995).

- Físicos: en relación con la temperatura, humedad y textura.
- Químicos: variaciones de composición, contenido de materia orgánica, etc.
- Ambientales: pendiente, orientación, estación del año, hora de la toma, etc.

Esta complejidad de comportamiento induce, en primera instancia, dificultades en el momento de interpretar las imágenes, pero por otra parte, hay un enriquecimiento de la información capturada introduciendo múltiples matices en ella. De ello harán uso las diferentes disciplinas para desarrollar estudios e investigaciones en los que la Teledetección aparece como una herramienta de gran importancia.

6.3. Principios físicos

Los fundamentos de la Teledetección se abordan desde el campo de la física y más concretamente desde los ámbitos de la óptica y la electrónica.

La observación remota es posible gracias a la interacción de un flujo energético con las cubiertas terrestres. Dicho flujo recibe el nombre de radiación electromagnética y ha sido explicada por dos teorías físicas.

La primera teoría es la ondulatoria. Para ella la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio que se propaga con dos campos perpendiculares: el magnético y el eléctrico. Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la longitud de onda y la frecuencia.

Se puede comprender mejor en la Figura 4.

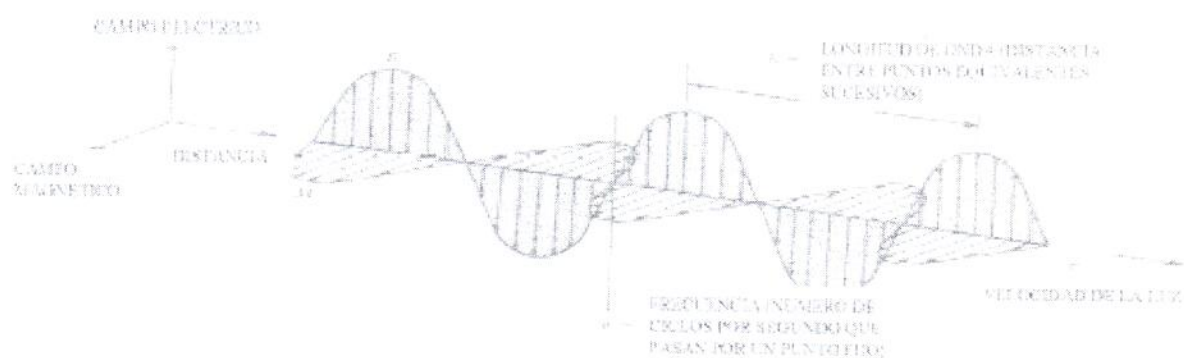


Figura 4. Propagación de la energía electromagnética.

La información procedente de la Tierra desde la plataforma orbital, se ve limitada por la acción de determinados compuestos químicos como anhídrido carbónico, el ozono o el vapor de agua que producen un efecto absorbente, cerrando el paso para las ondas en regiones concretas del espectro.

6. 4. Firmas espectrales

Se puede representar gráficamente la longitud de onda en el eje X y la reflectividad en el eje Y, de modo que cada cubierta está representada por una curva característica. Estas firmas espectrales a modo de rúbricas, personalizan su comportamiento espectral frente a otras cubiertas. Su diferente trazado

permite distinguir entre varias cubiertas o entre estados diferentes de una misma cubierta, como se muestra en la Figura 5, que presenta diferentes tipos de cubiertas y por tanto comportamientos espectrales diferentes.

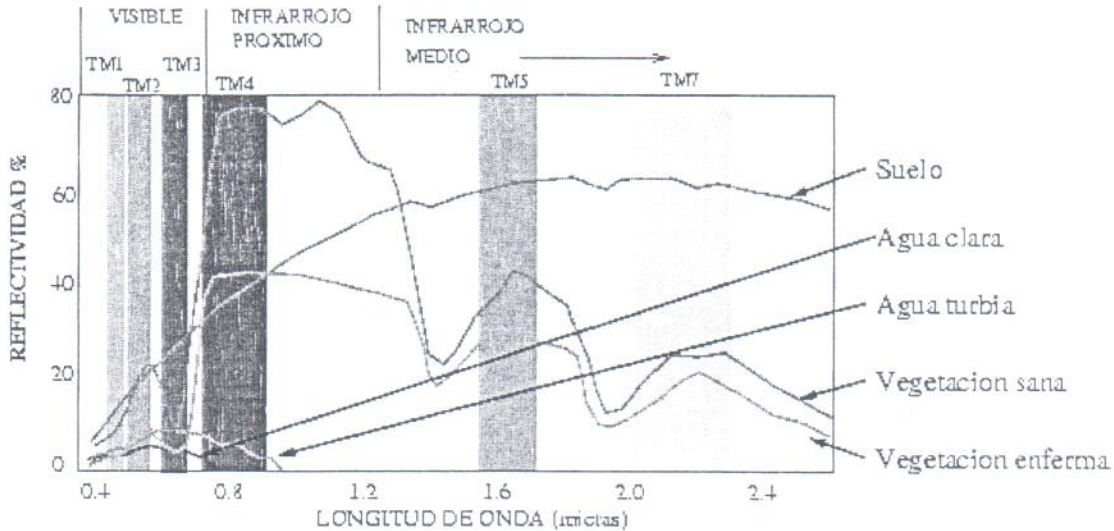


Figura 5. Se observan las firmas espectrales que distinguen a diferentes coberturas de la tierra. (Tomado de León Fanpaulieb, 2007).

6. 5. Imagen multiespectral

La imagen es captada a bordo del satélite por medio de detectores fotoeléctricos, que transforman los niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos que se denominan valores digitales (ND). Este procedimiento de formación de la imagen se repite para cada una de las bandas generándose como resultado final una matriz tridimensional en la que, el valor del nivel digital de cada pixel está ubicado en una fila y una columna. De este modo se acuña el concepto de imagen multiespectral. El número de bandas varía considerablemente de un sensor a otro y se ajusta al propósito para el cual fueron concebidos (Fallas, J. 2004).

6.6. Resoluciones de un sensor

Mientras que en otros tipos de sistemas cartográficos estamos acostumbrados a relacionar de forma exclusiva resolución y precisión geométrica, en los sistemas sensores de Teledetección se habla de cinco resoluciones distintas (espacial, radiométrica, espectral y angular). Gracias a ellas pueden evaluarse rasgos de precisión referentes a distintos conceptos de suma importancia para el análisis de las imágenes espaciales.

6.6.1. Resolución espacial

Este concepto describe la capacidad del sistema para distinguir objetos en función de su tamaño. Dicho de otro modo, la resolución espacial suele interpretarse como el tamaño del objeto más pequeño que pueda ser distinguido en una imagen: tamaño del píxel sobre el terreno. En los sensores ópticos electrónicos el tamaño del píxel depende de varios factores como son, la altura de la órbita, la velocidad de exploración del satélite o el número de detectores montados en el sensor.

La resolución espacial juega un papel fundamental condicionando la escala de trabajo y la fiabilidad de la interpretación. De modo que, en cuanto menor sea el tamaño del píxel menor será la posibilidad de que éste sea un compuesto de dos cubiertas fronterizas. Sin embargo, en algunas ocasiones puede ser bueno contar con un tamaño de píxel mayor ya que con ello se reduce la variabilidad de categorías (Álvarez, N. 2004).

6. 6. 2. Resolución radiométrica

Indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. La energía electromagnética recibida por el sensor, cuando se convierten a nivel digital, necesita un formato binario (número de bits) para codificarse.

A mayor número de bits reservados para almacenar el valor de la reflectividad de un píxel, mayor resolución radiométrica. El sensor TM de LANDSAT tiene una resolución radiométrica de 8 bits, puede registrar valores decimales equivalentes en un rango de 0 a 255, es decir 2^8 .

6.6.3. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puedan discriminar el sensor. En este sentido, un sensor tendrá una resolución espectral más grande cuando mayor sea el número de bandas que tenga. Conviene que estas bandas sean lo suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Bandas muy anchas suponen registrar un valor promedio que pueden encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

6.6.4. Resolución temporal

Mide el tiempo del paso del satélite sobre la vertiente de un punto, con ello se determina la periodicidad de adquisición de la imagen de una zona. De este modo podemos cuantificar la capacidad que tiene un sensor para registrar los

cambios temporales producidos sobre una determinada cubierta, lo cual es de vital importancia a la hora de abordar estudios temporales. La resolución temporal está condicionada por el tipo de órbita, el ángulo de barrido y la velocidad del satélite.

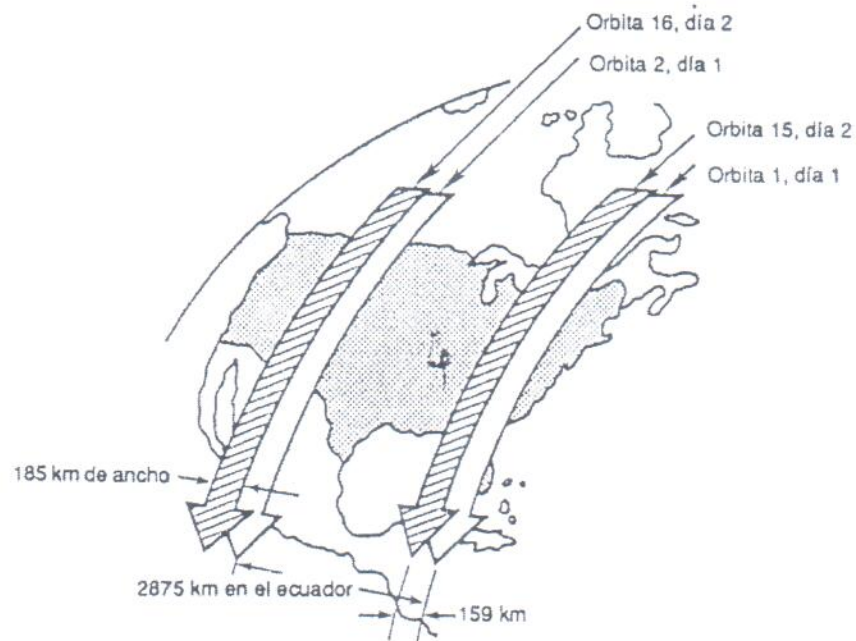


Figura 6. Resolución temporal. Modelo de exploración de Landsat y órbitas sucesivas (Taranik, 1978)

Cuadro 1 Resoluciones del sensor Landsat. Tomado de la página landsat.gsfc.nasa.gov, 2009.

Landsat

Porción del espectro	Nro. de banda	Rango espectral (µm)				Resolución espacial	Resolución radiométrica	Resolución temporal
		TM		ETM+		30 m	8 bits	16 días
Azul	1	0.45	0.52	0.45	0.52			
Verde	2	0.52	0.6	0.53	0.61			
Rojo	3	0.63	0.69	0.63	0.69			
IRC	4	0.76	0.9	0.78	0.9			
IRM	5	1.55	1.75	1.55	1.75	60 m	8 bits	
IR-Térmico	6	10.4	12.5	10.4	12.5			
IRM	7	2.08	2.35	2.09	2.35	30 m	8 bits	
Pancromático	8			0.52	0.9	15 m	8 bits	

6.7. Radiación

Para entender los principios de la radiación y como interactúa con la materia es importante recordar algunos conceptos de la física y fisicoquímica. (Salisbury, F y Ross, C.1994).

6.7.1. Energía radiante (radiación)

La energía radiante se define como la luz que podemos ver, es decir la forma de energía que se emite o se difunde en el espacio o por algún medio material. Se dice que es electromagnética y se propaga en forma de pulsaciones u ondas. Ciertos conceptos y ecuaciones describen de manera adecuada la naturaleza ondular de la energía radiante, pero esta energía también se comporta como un flujo de partículas.

Estos corpúsculos, que carecen de masa, también pueden describirse mediante ciertas ecuaciones. En ocasiones, el término se generaliza y en él se incluyen los haces de partículas atómicas o subatómicas que poseen masa, tales como electrones, positrones o los núcleos atómicos que constituyen a los rayos cósmicos primarios.

6.7.2. Frecuencia (c)

Es la distancia recorrida por un pico de energía radiante en un intervalo de tiempo específico. La velocidad de todas las formas de energía radiante es la misma en el vacío.

6.7.3. Longitud de onda (λ , la letra griega lambda)

Es la distancia entre cresta de energía en la radiación electromagnética. La longitud de onda es igual a la velocidad dividida entre la frecuencia: $\lambda = c/\nu$. Asimismo, la frecuencia es igual a la velocidad dividida entre la longitud de onda: $\nu = c/\lambda$. Las longitudes de onda de la energía radiante varían, pueden ser más cortas que el diámetro de un átomo, hasta varios kilómetros de longitud.

6.8. Refracción

Es el cambio de dirección (desvío) que tiene lugar cuando un haz de energía radiante pasa de un medio a otro en el que la velocidad es diferente. La luz se refracta en el interior de las hojas de una planta al pasar del aire a una pared celular o al citoplasma; puede refractarse varias veces dentro de la hoja. Debido

a que diferentes longitudes de onda se refractan en diversos grados, las longitudes de onda se separan en un espectro al pasar a través de un prisma.

6.9. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas. Los rayos gamma tienen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas conocidas. Son ondas de alta energía capaces de viajar a larga distancia a través del aire y son las más penetrantes. Los rayos X tienen longitudes de onda más largas que los rayos gamma, pero menores que la radiación ultravioleta y por lo tanto su energía es mayor que la de estos últimos. Se utilizan en diversas aplicaciones científicas e industriales, pero principalmente utilizan en la medicina como la radiografía. Consisten en una forma de radiación ionizante y como tal pueden ser peligrosos. Los rayos X son emitidos por electrones del exterior del núcleo, mientras que los rayos gamma son emitidos por el núcleo. La radiación ultravioleta (UV) se define como la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible. La luz visible, llamada también espectro visible es la parte de espectro electromagnético que los ojos humanos son capaces de detectar. Cubre todos los colores del azul a 400 nm al rojo a 700 nm., la luz azul contiene más energía que la roja. La radiación infrarroja (IR), denominada también radiación térmica es la parte del espectro electromagnético que se encuentra entre la luz visible y las microondas. La fuente natural más importante de radiación infrarroja es el Sol. Las ondas radioeléctricas tienen longitudes de

onda largas que varían unos pocos centímetros a miles de kilómetros de longitud. Sus principales usos son en la televisión, los teléfonos móviles y las comunicaciones por radio. (Salisbury y Ross, 1994). La figura 8. Representa las longitudes de onda y las frecuencias de cada una de ellas, así como la porción del espectro que es perceptible para el ojo humano.

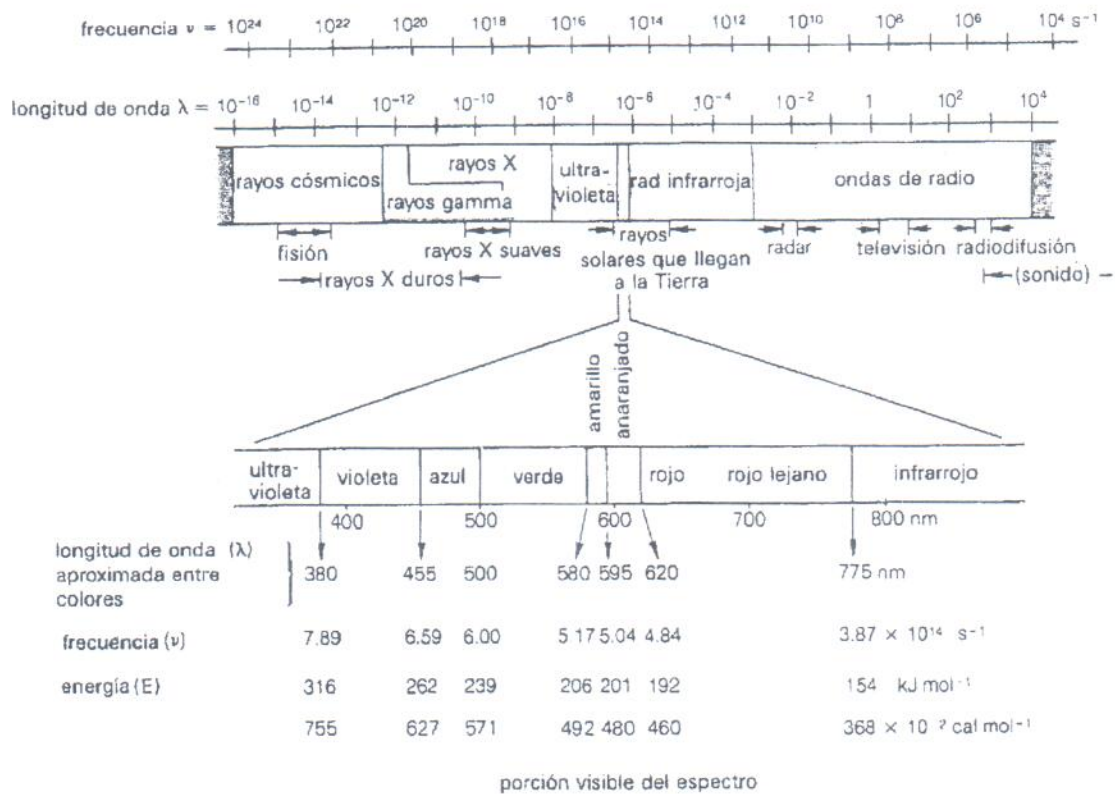


Figura 7: El espectro electromagnético. Tomado de Salisbury, 1994.

6.9.1. Luz

Para la mayoría de las personas, la luz es algo tan natural y cotidiano que perdemos conciencia de su existencia. Estamos muy acostumbrados a despertar, abrir los ojos y mirar todo el entorno hasta volver a cerrar los ojos. Casi nunca pensamos que, en realidad, lo que vemos es luz reflejada (o bien luz producida) por los objetos, luz que llega a nuestros ojos. De lo contrario simplemente no podríamos ver. (Armendáriz, 2009)

6.9.2. Color

Es la apariencia de los objetos, tal como se determina por la respuesta del ojo a las longitudes de onda de la luz que llega a dichos objetos. Las longitudes de onda corta producen la sensación que denominamos violeta o azul; las longitudes de onda más largas causan la sensación del rojo. Los colores de las cosas se deben a los al tipo de longitud de onda que absorben los pigmentos, por ejemplo, un pigmento que azul absorbe todas las longitudes de onda excepto el azul. Un pigmento negro absorbe todas las longitudes de onda visible

6.9.3. Pigmentos

Es cualquier sustancia que absorbe luz. Si absorbe todo el espectro visible, la sustancia aparece como blanca para el ojo humano; si absorbe todas las longitudes de onda del espectro, excepto las que corresponden al verde (es decir las longitudes de onda del verde se transmiten o se reflejan), la sustancia u objetos de color verde.

6.9.4. Coeficiente de absorbencia

Es una fracción decimal que expresa la porción de la radiación incidente que es absorbida. Una hoja, por ejemplo, tiene un coeficiente de absorbencia de .98 en la porción del infrarrojo lejano del espectro.

6.9.5. Transmisión

Es el paso de la energía radiante, a través de una sustancia (rebotar) después de encontrarse con otra sustancia, sin ser absorbida. Si la radiación parte en todas direcciones, se dice que hay una dispersión.

6.9.6. Absorbancia (A)

Es la cantidad de luz que absorbe una muestra. Muchas veces, la absorción es proporcional a la concentración de un pigmento en una solución transparente (sin reflexión o dispersión). Según las siguientes leyes:

6.9.7. Ley de Beer

Cada molécula de un pigmento disuelto absorbe la misma fracción de luz que incide en ella. Así que en un medio no absorbente, la luz absorbida debe ser proporcional a la concentración del pigmento disuelto. Es frecuente que la ley se cumpla para soluciones diluidas, pero no cuando cambian, a concentraciones mayores las propiedades para la absorción de la luz en el pigmento.

6.9.8. Ley de Lambert

Cada capa de igual espesor absorbe una fracción igual de luz que la atraviesa.

Esta idea se combina con la Ley de Beer – Lambert: la fracción de la radiación incidente que se absorbe es proporcional al número de moléculas absorbentes a su paso.

7. CORRECCIONES DE LA IMAGEN

Las correcciones de la imagen son un conjunto de procesos que se realizan rutinariamente en Teledetección, que ofrecen resultados de calidad muy variables en función del diseño del trabajo (Cuartero y Felicísimo, 2003). Por lo que es importante revisar algunos conceptos.

Estas correcciones indican aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, o en la radiometría de los píxeles que la componen. Esta operación tiende a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea, por ejemplo, situándolos sobre su posición geográfica correcta (georeferenciación), o reconstruyendo la radiancia detectada por el sensor a partir de los ND de la imagen. La georeferenciación cartográfica de la imagen implica una nueva deformación, ya que no es posible representar coordenadas geográficas (latitud y longitud) sobre un plano con total exactitud. Debemos resaltar que para el adecuado manejo de imágenes satelitales es necesario que se realicen estas operaciones, lo que hará una validación cartográfica y permitirá hacer una conexión con datos almacenados en Sistemas de Información Geográfica (Chuvieco, 2006)

La siguiente información ha sido tomada de (Chuvieco, 2006)

7.1. Fuentes de error de una imagen espacial

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, ya sea aéreo o espacial, presenta una serie de alteraciones radiométricas debidas a muy variados factores. Esto explica que la imagen finalmente detectada no coincida exactamente con la radianza, posición, forma, tamaño de los objetos que incluye. En el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en:

- a. Distorsiones originales por la plataforma: pese a la gran estabilidad de un satélite de observación, pueden producirse pequeñas variaciones en la altitud de su órbita, en la velocidad, o en la orientación de cualquiera de sus ejes: alabeo (roll), cabeceo (pitch), giro lateral (yaw). En el primer caso se producen cambios en la escala de la imagen, mientras, en el segundo, distorsiones de distinto tipo en su geometría de adquisición. Ambos factores pueden considerarse como no sistemáticos, puesto que aparecen de forma esporádica y son, por ello, difícilmente predecibles y complejos de ordenar (Welch y Usery, 1984).
- b. Distorsiones provocadas por la rotación terrestre. Teniendo en cuenta la altitud orbital y el área abarcada por el sensor, el efecto de rotación de la tierra puede aparecer claramente en la imagen. En el caso del satélite Landsat cada imagen de 185 x 185 km se adquiere, en unos 28 segundos. En este lapso de tiempo, desde la primera hasta la última línea de barrido, la tierra se desplaza sensiblemente unos 8 km, lo que causa, junto a la

próxima inclinación de la órbita, una orientación de la imagen noreste-suroeste. También provocada por la superficie terrestre es la variación de tamaños del píxel por efecto de la curvatura de la tierra.

- c. Distorsiones provocadas por el sensor. Varios factores de distorsión geométrica y radiométrica puede deberse al propio funcionamiento del sensor. Como ya vimos los sensores de barrido electrónico realizan una exploración perpendicular a la trayectoria del satélite, gracias a un espejo oscilante que envía la radiancia registrada a una cadena de detectores sólidos. Este movimiento puede alterarse por anomalías en el sensor, provocando un efecto de barrido no lineal o cambios en el intervalo de recogida la información, lo que implica transformar la resolución efectiva de la imagen. Un segundo efecto debido al sensor se relaciona con el ángulo de barrido o campo de visión global. Cuando se trata de sensores con menor campo de visión (ETM o HRVIR), estos efectos son de menor calibre.

Otro problema frecuente que plantea el sensor es la falta de calibración entre detectores. En los sensores de barrido la exploración se realiza en varias líneas simultáneamente, por lo que requiere varios detectores por banda. Resulta muy importante que todos ellos traduzcan uniformemente la señal detectada, con objeto de que la misma radianza recibida no se modifique en los ND distintos. En ocasiones ese ajuste entre detectores se deteriora, provocándose un efecto de bandeo en la imagen final,

especialmente perceptible en las zonas de baja radiancia (sombras, superficies marinas).

Más evidente todavía resultan los fallos momentáneos de algunos de los detectores, ya sea en la emisión (sensores activos), ya en la recepción de la señal. Esto provoca la pérdida de una serie de líneas o píxeles en la imagen final.

- d. Distorsiones provocadas por las condiciones ambientales, principalmente el efecto de la atmosfera y el relieve. Como ya se comentó, los distintos elementos que componen la atmósfera causa una modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre. El efecto más importante es el de dispersión del flujo reflejado desde la superficie, a consecuencia de la presencia de aerosoles, gases y vapor de agua. Este efecto implica un aumento de la señal recibida por el sensor y es más sensible en las longitudes de onda corta, que tienden a presentar un menor contraste entre coberturas de similar comportamiento radiométrico. En cuanto al relieve, supone una modificación, a veces severa, de la posición de los píxeles en la imagen, respecto a la esperable a partir de la posición del sensor.

Algunos de estos problemas se volverán rutinariamente en los centros encargados de la recepción o venta de las imágenes. Otros, sin embargo, persisten, haciendo precisas una serie de técnicas para subsanarlos. Por los

que las correcciones atmosféricas son vitales para modelar parámetros físicos a partir de la imagen.

7. 2. Correcciones radiométricas

Este es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarnos a los que habría presentes en la imagen en caso de una recepción ideal. Dentro de este concepto se incluyen el tratamiento de los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor, junto a la obtención de magnitudes físicas y corrección atmosférica de los datos. Para este trabajo sólo describiremos las correcciones que nos interesan.

7. 3. Reflectividad aparente: modelo simplificado

La Reflectividad se define como la relación entre la energía reflejada y la incidente, varía por tanto entre 0 (superficie perfectamente absorbente) y 1 (superficie perfectamente reflectora). Como también sabemos, la Reflectividad de una cubierta depende de sus características físicas y químicas, así como de las condiciones de observación. Además no es constante, sino se modifica en las distintas bandas del espectro, por lo que debemos añadirle el calificativo de espectral, acotando su medida a un determinado rango de longitud de onda.

Para conocer la reflectividad de una superficie es preciso relacionar dos magnitudes: la energía reflejada y la energía incidente Figura 8. A partir de los datos medidos por el sensor podemos obtener la primera, ya que la radiancia

espectral media por éste es consecuencia de la reflexión de la radiación solar procedente del suelo. Esta medición codifica un valor numérico (el ND), de acuerdo a los coeficientes de calibración específicos para cada sensor. Ya que estos coeficientes son conocidos, puede realizarse el proceso inverso, obteniendo los valores de radiancia espectral detectada por el sensor a partir de los ND:

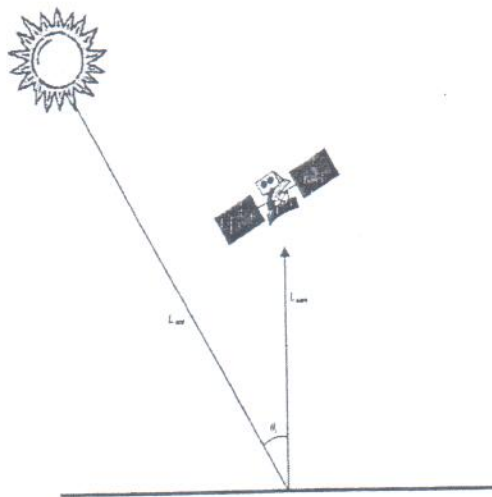


Figura 8. Calculo simplificado de la reflectividad. Tomado de Chuvieco, 2006

La traducción de ND a valores de reflectividad se realiza en dos fases:

- a. Conversión de ND a valores de radiancia, a partir de los coeficientes de calibración del sensor.

Perihelio: (del greco *peri* = intorno, *helios* = sole) punto de minima distancia de un planeta al sol.

Afelio: del griego *apo* = lejos de, y *helios* = el Sol. Afelio.- Teniendo en cuenta que las órbitas de los cuerpos celestes tienen normalmente

forma de elipse, el afelio es el punto más alejado de la órbita de un planeta alrededor del Sol.

- b. Estimación de valores de reflectividad aparente, conociendo la irradiancia solar y la fecha de adquisición (de la que se estima el ángulo cenital θ_i).

Este procedimiento cambia la escala de medición a un parámetro físico, pero no permite corregir efectos atmosféricos o aquellos debidos a la influencia de cubiertas vecinas, a los ángulos de observación o las condiciones de iluminación. En definitiva, la reflectividad aparente asume que la observación se realiza en una atmósfera transparente, verticalmente, sobre un suelo plano y superficies perfectamente lambertianas.

Los componentes atmosféricos producen un efecto de absorción y dispersión que modifican notablemente la señal procedente de la cubierta. De la atmósfera también depende el denominado efecto de adyacencia, que implica que se reciba energía procedente de las cubiertas vecinas. Este efecto reduce el contraste de la escena y puede dificultar la discriminación entre objetos vecinos (Itter y Meyer, 1993).

Es importante resaltar que para asumir que existe un terreno plano éste debe presentar pendientes menores de ($<5^\circ$) y no deben de haber variaciones de iluminación por efecto de la vertiente.

7. 4. Correcciones atmosféricas

La influencia atmosférica no afecta por igual a los dos componentes del cálculo de la reflectividad: flujo descendente (denominador) y ascendente (numerador), ya que el espesor de la atmósfera que atraviesa es distinto. Además, hay que considerar que la irradiación solar directa y añadir la luz difusa, procedente de los objetos vecinos Figura 9. En definitiva la radianza que recibe el satélite no es la misma que sale del suelo (ésta última es la que interesa, pues se pretende medir la reflectividad de la cubierta, no la influida por la atmósfera), (Gilabert *et al.*, 1994)

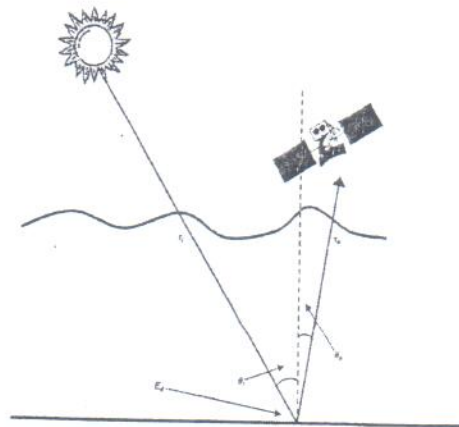


Figura 9. Efectos atmosféricos sobre el cálculo de la reflectividad. Tomado de Chuvieco, 2006

7.5. Correcciones de sombreado topográfico

Otro elemento importante que conviene considerar en el cálculo de reflectividad es el efecto del relieve. La reflectividad es dependiente de los ángulos de incidencia u observación. Hemos asumido hasta aquí que el ángulo de la radiación incidente sólo depende de la elevación solar, lo que implicaría considerar un terreno llano. Esto será sólo válido si la superficie tiene realmente

una pendiente escasa, lo que significa que cuando esto no sea así se causaran problemas. Los efectos derivados del gradiente y dirección de las pendientes son bastante notorios, especialmente en las zonas de sombra. El modelo digital de elevación (MDE), nos permite abordar con ciertas garantías esta corrección, homogeneizando la señal de la misma cubierta independientemente de la vertiente en que se encuentre.

En la Figura 10 podemos observar como la energía incidente está en función del ángulo cenital solar (θ_i), la máxima energía para una determinada banda se obtiene cuando el ángulo cenital es de 0 grados ($\cos \theta_i = 1$), esto es cuando el sol incide verticalmente. El ángulo cenital, como ya indicamos, se calcula como el complementario del ángulo de elevación solar, que suele recoger en la cabecera de la imagen. Ahora bien, en un terreno montañoso la pendiente modificada la geometría del flujo incidente.

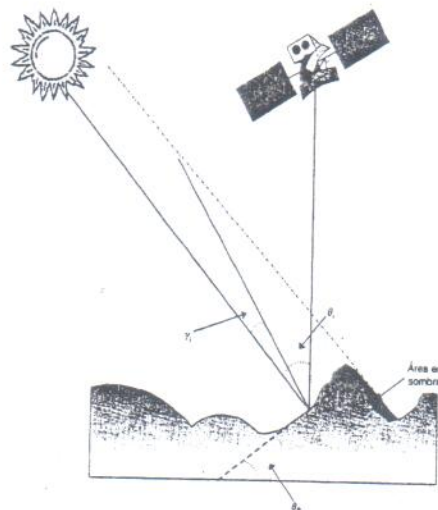


Figura 10. Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor. Tomado de Chuvienco, 2006

Por otro lado, en las laderas orientadas al sol el ángulo cenital no coincide con el ángulo de incidencia, mientras en las opuestas puede ocurrir que no se reciba en absoluto energía solar directa (cuando la vertiente está en umbría). Si no se tiene en cuenta este efecto de relieve, la reflectividad medida para la misma cubierta en distintas vertientes puede ser variada, implicando severos problemas en el reconocimiento y clasificación de coberturas temáticas.

Una manera muy sencilla de eliminar el efecto topográfico sería realizar un cociente entre dos bandas de la misma imagen, puesto que los ángulos de incidencia son contrastantes entre las bandas, cuando estas son adquiridas simultáneamente. Por lo que se supone que el efecto topográfico es constante para cada banda (Colby, 1991; Short, 1982), o lo que es lo mismo, que los efectos atmosféricos son independientes de la longitud de onda (λ). Esto no es correcto, ya que hemos visto que la dispersión y la transmisión están en función de λ (Leprieur *et. al.*, 1988). Además al realizar el cociente se reduce la información espectral, lo que es un inconveniente para realizar la clasificación. Finalmente, tampoco se consideran el aporte de la luz difusa, es distinto en cada banda.

Teniendo el MDE suficientemente precisos y bien ajustado a la imagen se puede estimar la variación introducida en los ND por el efecto topográfico a partir de modelar las condiciones de iluminación en el momento de la adquisición de la imagen. Para lo que se tendrá que calcular en ángulo de

incidencia (γ_i) de una vertiente, que depende de los ángulos solares y de la pendiente (Civco, 1989); Colby, 1991; Conese *et al.*, 1993):

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_i \cos \theta_p + \sin \theta_i \sin \theta_p \cos (\phi_a - \phi_o)$$

Donde γ_i corresponde al ángulo cenital del flujo incidente, θ_i indica el ángulo cenital solar, θ_p el gradiente de la pendiente. Estos ángulos se obtienen del MDE y de la fecha y de la hora de adquisición de la imagen. El $\cos \gamma_i$, nos sirve para valorar el efecto de iluminación de la vertiente y es equivalente al sombreado que recogen numerosos programas de SIG. Como es lógico, varía entre -1 y 1, indicando para cada pixel del MDE las condiciones de mínima y máxima iluminación, respectivamente.

7.6. Correcciones geométricas

Entendemos por correcciones geométricas al proceso de cambio de espacio de referencias de la imagen original tomada por el sensor, que está definida en un sistema local donde la localización de cada pixel queda definido por una situación de filas y columnas, siendo éste el espacio de la imagen. La corrección geométrica ajusta la imagen a un nuevo espacio de referencia donde cada píxel tiene asignado el valor de las coordenadas X, Y, que les corresponde en un sistema de proyección geográfica determinado en un espacio de la proyección (Cuartero, A y Felicísimo, A. 2003). Posterior a las correcciones geométricas sigue la categorización de las imágenes por lo que esclareceremos este concepto.

7. 7. Categorización o clasificación de la imagen

A partir de las clasificaciones digitales se obtiene cartografía de objetos de estudio, así las imágenes multibanda se convierten en otra imagen, la cual comparte las características de las bandas originales, con la diferencia de que los ND que definen cada píxel no tiene relación con la radianza detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel.

De acuerdo con Cihlar *et al* (1998) un método de clasificación debería contar con las siguientes características:

- a. Exactitud.
- b. Reproducible por otros tomando las mismas variables.
- c. Robustos (no sensible a pequeños cambios en condiciones de entrada, aunque permita explotar enteramente la información de esas variables).
- d. Exhaustivo que cubra todo el territorio de estudio.
- e. Objetivo que no esté marcado por las decisiones del intérprete, sin embargo, se debe de tener en cuenta al intérprete ya que para la discriminación de cubiertas es fundamental este proceder, lo que se puede ver en este estudio.

La clasificación de las imágenes se beneficia notablemente de algunos procesos y correcciones, lo que permite, una mejor categorización para la clasificación digital de la imagen multibanda. La apariencia de la imagen original y la clasificada suele ser muy similar ya que como lo hemos mencionado

anteriormente la imagen clasificada conserva su tamaño y se puede visualizar en niveles de grises.

Cada ND de un píxel clasificado es el identificador de la clase de donde está incluido, de manera que las clases están definiendo un tipo de cubierta vegetal (especies forestales).

Los primeros ensayos de clasificación digital de imágenes de satélite se basaron solamente en los ND de la imagen, ya fueran originales o valores convertidos a magnitudes físicas. Como se sabe los ND son una traducción digital de un flujo de energía recibido por un sensor para una determinada banda del espectro. Por lo que una clasificación basada únicamente en ND se denomina clasificación espectral y aunque es muy valiosa esta información, no siempre es capaz de separar cubiertas vegetales, pues puede haber distintas categorías temáticas con un comportamiento espectral similar.

Sin embargo, la clasificación de imágenes digitales son análogas a las de la foto interpretación, así en esta técnica se deben interpretar el patrón visual asociado a cada cubierta, de acuerdo a una serie de criterios: tono, textura, forma, contexto, disposición, etc. En otras palabras se asigna a cada categoría determinadas superficies, en función de sus semejanzas. (Chuvieco, 2006).

Durante el procesamiento de las imágenes se ha hecho uso de software como ERDAS, y de su macro-lenguaje, de manera que es importante comprender que es ERDAS y su macro-lenguaje.

7. 8. Macro-lenguaje de ERDAS (EML)

Cuando el diseño de ERDAS comenzó, estaban claros en que un GUI (Graphical User Interface) tradicional, estático no cubriría las necesidades de la variedad de usuarios y de los usos de los productos de ERDAS, se pretendía que los usuarios pudieran modificar el interfaz para requisitos particulares y crear escrituras que pudieran utilizar para ejecutar con frecuencia funciones particulares, por los que, el EML se diseña para servir como lengua scripting así como una lengua del interfaz utilizado. Los EML pueden definir las acciones que deben ser tomadas cuando un usuario interactúa recíprocamente con un diálogo. Proporciona una sintaxis completa para definir una caja de diálogo típica, así como, la construcción para definir las escrituras que contienen lógica de la ramificación y de control. Además, del macro-lenguaje, el EML proporciona el juego de herramientas que permite que el programador incorpore el lenguaje EML a un uso, y ampliar la interacción de variables, funciones, y comandos específicos (ERDAS, 2000).

7.8. Clasificación digital

La clasificación de una imagen digital consiste en categorizar una imagen multibanda. Se pasa de tener valores digitales (ND) continuos medidos por los sensores a una escala nominal o categórica de manera que cada píxel pertenece a una categoría definida previamente. El ND de un píxel clasificado es, en definitiva, el identificador de la clase o categoría en la que se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de cubiertas (variable

nominal o categórica) o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). Un ejemplo del primer tipo sería una clasificación de distintos tipos de cubierta vegetal, en cambio uno del segundo tipo sería un intento de clasificar distintos niveles de daño producidos por un incendio. Los primeros intentos de clasificación digital se basaban exclusivamente en los ND de la imagen que son una traducción digital de un flujo energético recibido por un sensor para una determinada banda del espectro. Este tipo de clasificación tiene como inconveniente que no siempre permite separar cubiertas, ya que pueden existir distintas categorías temáticas que tengan un comportamiento espectral similar (Yébenes y Giner, 2009).

Existen dos métodos para clasificar una imagen, el método no supervisado, el cual hace la clasificación tratando de definir clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento previo del área de estudio por lo que la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados. (Yébenes y Giner, 2009).

El método supervisado el cual requiere un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar. Estas áreas se conocen como *training fields* (áreas de entrenamiento) ya que sirven para entrenar al ordenador para que pueda reconocer las distintas categorías. A partir de estas áreas el ordenador calcula diversos parámetros estadísticos de los ND que definen cada clase, para luego clasificar el resto de píxeles en una

categoría determinada atendiendo a sus ND. Resulta adecuado seleccionar varias áreas de entrenamiento por clase para reflejar correctamente su variabilidad en la zona de estudio. Para los fines de esta investigación se utilizará el método supervisado es decir se utilizaran clases informacionales. La selección entre uno y otro método depende de los datos y medios disponibles y de las preferencias personales (Townshend y Justice, 1981).

Por último es necesaria una verificación de los resultados. En las técnicas digitales de clasificación de imágenes se dan estos mismos pasos. De esta forma se distingue entre las siguientes fases:

1. Definición digital de las categorías (fase de entrenamiento).
2. Agrupación de los píxeles de la imagen en una de las categorías previamente definidas (fase de asignación).
3. Comprobación y verificación de los resultados.

8. MATERIAL Y METODOLOGÍA

8.1. Clasificación digital

De la página de Landsat se descargo una imagen de satélite, con fecha 21 de Marzo de 2000. La escena se hallaba en formato GEOTIFF con Datum ITRF92, path row 26045. En la Tabla 2 se muestran datos de la imagen. En Erdas 9.1 se hizo la composición o imagen multibanda y se ocuparon las siguientes bandas: banda 1 -longitud de onda azul, banda 3-longitud de onda del rojo y la banda 4 -longitud de onda del infrarrojo. La combinación de estas tres bandas permite hacer una buena discriminación de las cubiertas vegetales, ya que estas longitudes de onda pertenecen a la parte visible del espectro electromagnético, es decir, expresa las propiedades de la vegetación.

Cuadro 2. Características de la imagen Landsat ETM.

Imagen	Resolución espacial	Resolución radiométrica	azimut	elevación	Hora de la toma
Landsat ETM	Píxel de 28.5*28.5	0-255	120.6245978°	57.2146776°	9:48

Para el análisis de los datos geoespaciales, los software que se ocuparon son Arcview 3.1, Erdas 9.1 y Arcinfo, (el lenguaje y formatos que ocupan esto tres software es compatible entre sí) y Excel 2007 para el análisis estadísticos de la extracción de valores digitales.

8.1.1. Corrección Geométrica

La imagen de satélite Landsat ETM se encontraban en la proyección ITRF092, para fines del trabajo y dado que los datos (vectoriales) se encuentran en NAD 27, se convirtió la imagen a esta proyección, con los siguientes pasos: Se tomaron las coordenadas mínimas y máximas del metadatos de la imagen, y se introdujeron en el convertidor de la pagina de INEGI para obtener la equivalencia y diferencias para la proyección NAD 27. Con estas coordenadas se creó un archivo ASCII como muestra la Tabla 3. En el software Arcinfo se realizo un ajuste con el comando (adjust).

Cuadro 3. Valores obtenidos de la conversión de unidades ITRF 92 a NAD 27 por medio del convertidor de la página de INEGI.

ITRF92			NAD 27		
	X	Y		X	Y
Mínima	500,000	2,100,701	Mínima	500,029.114	2,100,498.053
Máxima	535,085	2,128,396	Máxima	535,113.200	2,128,193.982
DIFERENCIAS					
	X	Y			
Mínima	-29.114	202.947			
Máxima	-28.2	202.018			

Los valores digitales (ND) de la imagen Landsat ETM se convirtieron a valores de radianza por medio de un macro-lenguaje de ERDAS 9.1 (EML) programado por el Biólogo Hernández, G. Para hacer la conversión a reflectancia se utilizo

nuevamente un EML programado por el Biólogo Hernandez, G. en ERDAS 9.1. Este macro-lenguaje de ERDAS (EML) es el resultado de un diseño que permite cubrir las necesidades específicas de cada usuario, de manera, que se puede modificar el interfaz para solucionar problemas articulares.

El siguiente paso fue la elaboración del Modelo Digital de Elevación (MDE), como base se utilizaron los datos vectoriales de las curvas de nivel del área (carta E14B51). En Arcview se creó un TIN (Triangulated Irregular Network), el cual se refiere a un modelo que representa una superficie como sistema de triángulos contiguos, sin traslapo. Dentro de cada triángulo la superficie es representada por un plano. Los triángulos se hacen por medio de un sistema de puntos llamados los puntos totales. El TIN se convirtió a Grid, el cual, es el modelo digital de elevación; se le agrego un sombreado denominado Hillshade.

El MDE contiene información derivada de las relaciones espaciales de los elementos que los conforman como, altitud, pendiente y la orientación (Felicísimo, 1994).

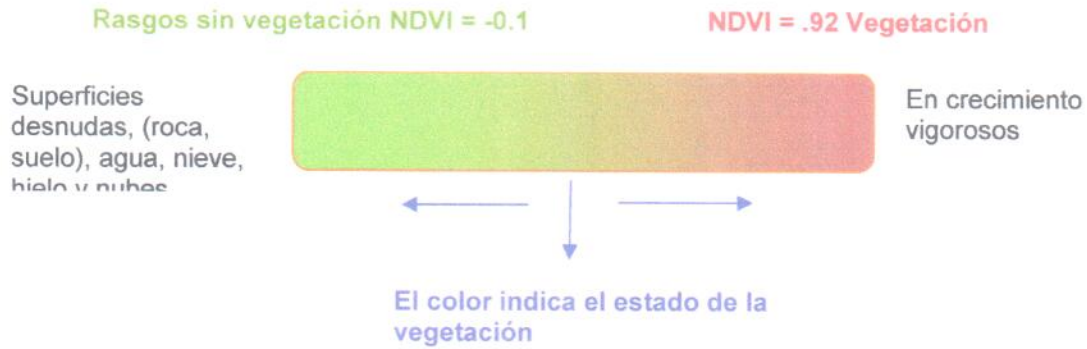
El siguiente paso fue la corrección de sombras de la imagen, sin embargo al momento de cotejar los datos vectoriales con la imagen y el Grid, se encontró un desplazamiento de la imagen. Esta aseveración se hace ya que se hicieron diferentes conversiones y comparaciones con los dato vectoriales, para verificar su proyección y posición.

Se realizó una corrección a la imagen de satélite tomando como base el vector de la hidrología, se tomaron puntos de control para moldear la imagen de satélite y ajustarla a los datos vectoriales, el ajuste se hizo con ERDAS y Arcinfo. Al terminar este procesamiento se definió la proyección y unidades de cada imagen raster y cada vector. Posterior a esto se hizo la corrección de sombras con un EML en ERDAS.

Después se procedió a hacer el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

8.1.2. Índice de vegetación

De forma genérica se puede definir un índice de vegetación (IV) como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretenden extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert, *et al.* 1997). Rouse *et al.* (1974) (citado en Gilabert, *et al.* 1997), propone el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), que es la diferencia normalizada de las dos bandas, y cuyo rango de variación, al estar normalizado queda comprendido entre -1 (nula vegetación) y 1 (vegetación verde vigorosa).



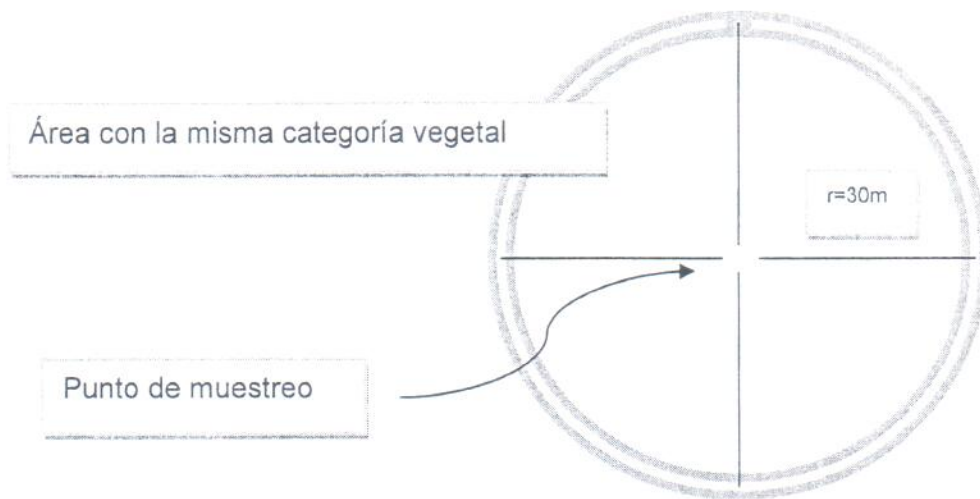
El cálculo del NDVI se expresa como una operación de bandas (Maruri, 2002).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{rojo}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{rojo}}$$

Finalmente con la composición multibanda a la que se le realizaron las correcciones se le agrego el NDVI para favorecer la discriminación de clases en la clasificación.

8.1.3. Tipo de muestreo

En el área de estudio se trazaron rutas y se ascendió altitudinalmente. Durante el recorrido se localizaron sitios representativos para cada especie, donde su distribución resultara homogénea en un radio aproximado de 30 m (según la resolución de la imagen de satélite). Se grabó un punto en cada sitio en un receptor GPS de 12 canales GARMIN.



8.1.4. Fases de la clasificación digital

- a. **Definición digital de las categorías (fase de entrenamiento).** Esto implica que las distintas categorías no se definen por el valor de un solo DN, sino por un conjunto de ND, más o menos próximos entre sí. En términos de la clasificación digital, esto supone que existe una cierta dispersión en torno al ND medio de cada categoría, más o menos significativa según las clases que se consideren y la propia complejidad del paisaje donde estas se asienten. Varios autores han propuesto que los resultados de la clasificación están mucho más influidos por la definición previa de las categorías, que por el criterio con el que son posteriormente discriminadas (Gong y Howarth, 1990; Hixson *et al.*, 1980; Story y Campbell, 1986). En definitiva, la fase de entrenamiento constituye la columna vertebral de la clasificación numérica, ya que, este conocimiento previo permite al intérprete delimitar con mayor facilidad los campos o áreas de entrenamiento, este nombre está referido a

que estos campos sirven para entrenar propiamente al programa que va a realizar el proceso de clasificación.

Los campos de entrenamiento que se hicieron son representativos de las clases temáticas, ya que se basaron en los puntos tomados durante el muestreo. Otro aspecto a considerar es la selección de áreas de entrenamiento se refiere a los estadísticos que garantizan el grado de representatividad de las distintas categorías. En cuanto al tamaño, se refiere a seleccionar un mínimo de $m + 1$ píxeles por categoría, siendo m el número de bandas que integran el análisis (Schowengerdt, 1997). En este estudio se elaboraron tantos campos como puntos de muestreo se tuvieron de cada especie.

Las clases temáticas o categoría fueron las siguientes.

- *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham
- *Quercus laurina* Humb et Bonpl
- *Quercus rugosa* Née
- *Cupressus lusitánica* Mill
- *Pinus ayacahuite* Ehren
- *Pinus montezumae* Lamb. var. *montezumae*
- *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *pseudostrobus*
- *Pinus leiophylla* Schl & Cham. var. *leiophylla*
- *Pinus teocote* Schl. & Cham
- *Arbutus*

b. **Agrupación de los píxeles de la imagen en una de las categorías (fase de asignación)** En esta fase se trata de asignar cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases previamente seleccionadas. Esa asignación se realiza en función de los ND de cada píxel, para cada una de las bandas que intervienen en el proceso. Resultado de esa fase se obtendrá una nueva imagen, cuyos ND expresan la categoría temática a la que se ha adscrito cada uno de los píxeles de la imagen original. Los criterios más comunes para establecer las fronteras estadísticas entre las clases son:

1. Mínima distancia: por el cual el píxel se asigna a la clase más cercana.
2. Paralelepípedo: permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociado a cada clase.
3. Máxima probabilidad: en esta fase cada píxel se asigna a aquellas clases con las que posee mayor probabilidad de pertenencia.

Para fines de esta investigación utilizaremos el método de clasificación de máxima probabilidad.

c. **Comprobación y verificación de resultados.**

8.1.5. Clasificador de máxima probabilidad

Este método considera que los ND de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza – covarianza, ósea que esta función asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que nos sirve para calcular la probabilidad de que un píxel (con un

determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para cada una de las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad.

El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo. Sin embargo, es el más empleado en teledetección, por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

8. 2. Mapas de la distribución potencial de especies forestales por medio de Sistemas de Información Geográfica.

Sabemos que cada especie tiene requerimientos ecológicos específicos que permiten su subsistencia. Las diferentes metodologías para determinar áreas de distribución potencial dependerán en buena medida de las características y objetivos perseguidos así como de la información disponible.

Hay que diferenciar en primer lugar, si el origen o fuente de los datos utilizados en el proceso de implementación es empírico o teórico. Los modelos empíricos pueden ser simplemente descriptivos, aquellos derivados de casos de estudios concretos en determinadas localizaciones, o también pueden ser estadísticos ya que los datos recogidos según un determinado modelo de muestreo son utilizados para explicar o predecir probabilidades de presencia de especies en aquellas zonas no muestreadas (Sainz M, 2000). El estudio de la tesis será se

tipo estadístico ya que solo nos basaremos en los puntos muestreados para sacar los rangos de valores con los que se podrá extrapolar a toda el área.

Los datos irregulares de distribución y o abundancia de especies hacen que, en casos determinados la utilización de una metodología deductiva sea la única posibilidad de delimitación de los hábitats (Sainz M, 2000). Por lo que la aplicación del álgebra booleana presenta una alternativa para establecer lugares en los cuales, las especies pudieran ubicarse. El álgebra booleana es un sistema matemático deductivo centrado en los valores cero y uno es decir falso y verdadero. Un operador binario " $\circ$ " como un par de valores de entradas que produce un solo valor booleano (Martínez *et al.*, 2000).

Para obtener los valores de cada una de las variables que determinan el hábitat potencial de cada especie, se extraerá de cada tema los valores máximo, mínimo y promedio. Estos valores corresponderán a los puntos obtenidos durante el muestreo de campo, lo cuales cuentan ya con una etiqueta que define las especies presentes en ese punto. La extracción de valores de los puntos que corresponden a los temas vectores se realizara en ArcView 3.1, utilizando la extensión geoprocessing (assign data by location), y la extracción de los Grid se realizó por medio de la extensión Grid Analyst Extension.

Es importante mencionar que la estructura vectorial se define como objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) que mediante la codificación explícita

de sus coordenadas. Los puntos se codifican en formato vectorial por un par de coordenadas en el espacio, las líneas como una sucesión de puntos conectados y los polígonos como líneas cerradas (formato orientado a objetos) o como un conjunto de líneas que constituyen las diferentes fronteras del polígono (Quiñonero *et al.* 2000).

Para la digitalización se escanearon los temas de Geología y Edafología de las cartas de INEGI a 300 dpis y se guardaron en formato jpg; posteriormente se abrió el programa ArcView y se activaron las extensiones Digitizer y Image Analysis, esta última para poder abrir la imagen como pirámide. Se tomaron coordenadas de las cartas para poder establecer puntos de control, buscando que estos coincidieran con los vértices. Este procedimiento permitió que se alineara la imagen, la cual, se guardó con un formato TIF y se procedió a la digitalización de los polígonos que determina la Geología y la Edafología, así como, sus características (Número de identificación (ID), clave, tipo de suelo, unidad de roca, unidad de suelo, clase textural, fase física y área de cada polígono). Este formato vectorial resulta especialmente adecuado para la representación de objetos geométricos reales (ríos, curvas de nivel, geología, edafología, etc).

El Cuadro 4 muestra la construcción de la base de datos con las variables que permitirán crear el perfil bioclimático, su origen, el formato en que se encuentra y la escala, que fundamental su homogeneidad en el análisis. La selección de

las variables estuvo en función de la influencia que tengan éstas en la permanencia y establecimiento de las especies.

Cuadro 4. Variables de los perfiles bioclimáticos.

Tema	fuelle	Vector	Raster	GRID	Escala
Geología	INEGI	✓			1:50,000
Edafología	INEGI	✓			1:50,000
Temperatura media anual	Estaciones meteorológicas			✓	1:50,000
MDE			✓	✓	1:50,000
	Derivados del MDE				
Pendiente	✓		✓	✓	1:50,000
Orientación	✓		✓	✓	1:50,000
Altitud	✓		✓	✓	1:50,000

Después de la extracción de los valores se realizó la estadística. Se consideraron los valores máximos y mínimos y se crearon Grids de cada tema, de manera que para cada especie se obtuvieron tantos Grids como número de

variables tuviéramos, a estos nuevos Grid se les aplicó una operación booleana, para obtener los mapas de distribución potencial de cada especie.

8.2.1. Descripción de las variables.

8. 2.1.1. Geología

Del griego *geo*, tierra, y *logos*, estudio. Es la ciencia que estudia la forma interior de la Tierra, la materia que la compone, su mecanismo de formación, los cambios o alteraciones que está experimentando desde su origen, y la textura y estructura que tiene su superficie.

La tierra se encuentra en una continua transformación, iniciado hace varios millones de años, y que no tienen un final previsible, es el resultado de acciones antagónicas que actúan sobre la tierra (Furter, 1978).

8.2.1.2. Edafología

Del griego, *edafos*, "suelo", *logía*, "estudio", "tratado") es una rama de la ciencia del suelo que estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea. Dentro de la edafología aparecen varias ramas teóricas y aplicadas que se relacionan en especial con la física y la química.

El suelo se origina a partir de la materia madre producida por los procesos químicos y mecánicos de transformación de las rocas de la superficie terrestre. A esta materia madre se agregan el agua, los gases, sobre todo el dióxido de carbono, el tiempo transcurrido, los animales y las plantas que descomponen y transforman el humus, dando por resultado una compleja mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos.

Los factores de la evolución del suelo son: la geología, el clima, las aguas, la vegetación y el mundo animal. El clima actúa sobre todo por la temperatura y el agua (lluvia), las edades geológicas, en las que se han producido cambios profundos, como las glaciaciones de tal manera, que se han provocado alternancias climáticas y por consiguientes cambios en las cubiertas vegetales de un mismo sitio (Huguet, 1983).

8.2.1.3. Pendiente

En matemáticas y ciencias aplicadas, se refiere a la inclinación de la tangente en un punto.

8.2.1.4. Orientación

La orientación en un punto que se define como el ángulo existente entre el vector que indica el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto (Felicísimo, A. 1994).

Cuadro 5. Rangos de orientación cardinal.

Orientación	rangos
Norte	0-22.5, 337.5 – 360
Noreste	22.5 – 67.5
Este	67.5 – 112.5
Sureste	112.5 – 157.5
Sur	157.5 – 202.5
Suroeste	202.5 – 247.5
Oeste	247.5 – 292.5
Noroeste	292.5 – 337.5
Plano	-1

Es la acción de ubicar en el horizonte un rumbo geográfico, principalmente el oriente (de ahí su nombre) el norte o también en el caso de usar un reloj para orientarse en el hemisferio norte, el sur, y con esto relacionar la rosa de los vientos en un lugar en particular Tabla 5.

9. RESULTADOS

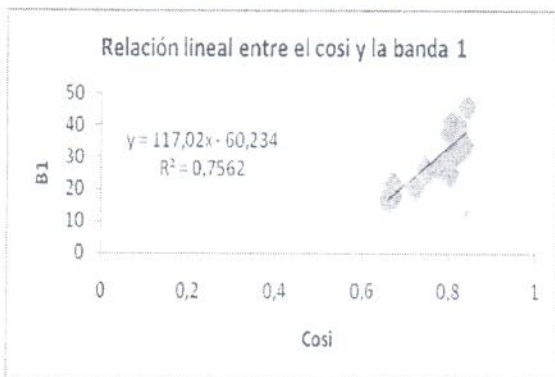
9.1 Clasificación digital

La imagen que se obtuvo para hacer la clasificación presentaba valores aberrantes en algunas áreas, después de hacer la corrección de sombras, se hizo una extracción de puntos de muestreo del cos i para ajustar la siguiente ecuación.

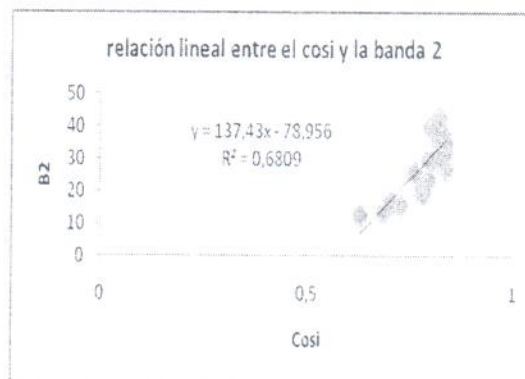
$$\cos \gamma_i = \cos \theta_i \cos \theta_p + \sin \theta_i \sin \theta_p \cos (\phi_a - \phi_o)$$

Se realizó una regresión lineal entre el cos i y los valores extraídos de cada banda, para encontrar un valor adecuado de R^2 , y hacer un ajuste en la ecuación para eliminar los valores aberrantes en la imagen con correcciones de sombra.

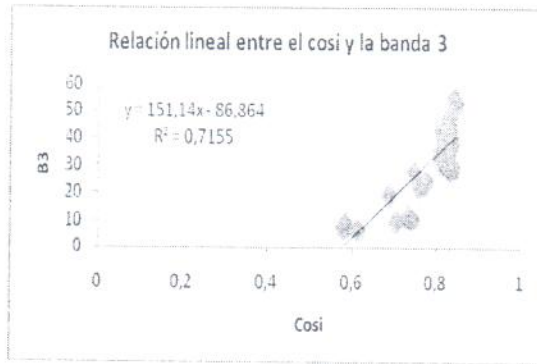
Para la banda 1 $C = .51473252$



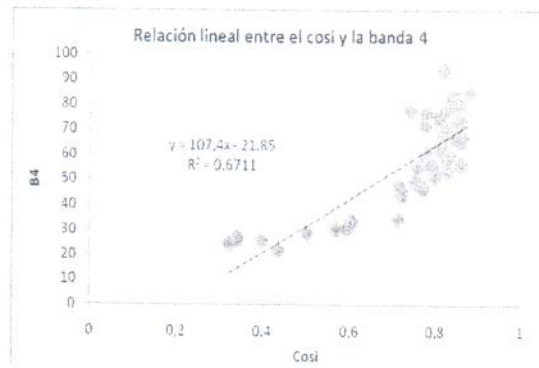
Para la banda 2 $C = .574517936$



Para la banda 3 C= .5747254201



Para la banda 4 C= .2073055028



En la metodología se plantearon como clases temáticas a cada una de las especies presentes en el bosque, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Quercus laurina*, *Quercus rugosa*, *Pinus ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *Arbutus*, sin embargo, durante el muestreo se evidenció que no existen superficies homogéneas y lo suficientemente grandes de cada clase (especie), así las categorías para los campos de entrenamiento, tuvieron que modificarse y agrupar las especies en función de su tipo de hoja de manera que: la primera clase es *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica* (árboles con hojas escuamiformes), la segunda clase son todas las especies del género *Pinus* (árboles con hojas lineares) presentes en el área y la tercera clase los géneros *Quercus* y *Arbutus* (hojosas). En la clasificación también se hicieron campos de entrenamiento con áreas de cultivos y zonas urbanas, con el objeto de contrastar las áreas boscosas con otras de respuesta espectral diferente.

Se hizo la fase de entrenamiento en ERDAS, pero antes de correr el proceso de clasificación, se obtuvo la estadística de los campos de entrenamiento, lo que permitió hacer predicciones acerca de la separabilidad de las cubiertas, los pronósticos se hacen por medio de valoraciones gráficas y numéricas.

La primera forma de evaluación corresponde a la Tabla 6, en ésta se hace una comparación entre las medias de los valores digitales (ND) por banda, incluyendo el NDVI. En la Tabla 6 se observan pocas diferencias entre los valores de las categorías, con excepción de las clases que corresponden a los cultivos y a la zona urbana. De estos datos es necesario resaltar que la clase de *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica* exhibe valores menores en la banda del rojo, infrarrojo y NDVI. El género *Pinus* presenta el valor más alto en la banda de rojo, es decir, es la clase que más absorbe este tipo de onda y por tanto tiene mayor actividad fotosintética. En el caso del género *Quercus*, son la categoría que más refleja la luz, ya que tiene los valores más altos en la banda infrarroja.

En el caso de los cultivos poseen valores muy altos en las bandas roja e infrarroja, lo que significa, que absorben pero también reflejan una gran cantidad de energía.

Cuadro 6. Medias de los campos de entrenamiento. Antes de correr la clasificación, es decir sólo consideran los campos propuestos por el clasificador.

	MEDIAS				
	<i>Abies religiosa y Cupressus lusitanica</i>	<i>Quercus</i>	<i>Pinus</i>	Cultivos	Zona urbana
Azul	22,71	24,32	23,63	35,152	41,126
Verde	17,236	19,157	19,477	37,408	40,978
Roja	12,919	14,697	16,137	45,385	44,344
Infrarroja	48,069	62,15	55,231	64,733	60,735
NDVI	175,56	184,17	172,525	83,079	79,587

Los datos de la Tabla 6 se pueden ver gráficamente en la Figura 11, la cual, corresponde a las firmas espectrales de las categorías. En el eje de las abscisas tenemos las bandas y el NDVI que intervinieron en el análisis, mientras que en las ordenadas encontramos a los ND medios de cada categoría. La Figura 11 es de gran utilidad ya que, en esta se ve una primera valoración de las tendencias espectrales de cada clase. Los cultivos y la zona urbana se separan en todas las bandas excepto en la roja, se puede considerar que absorben cantidades de energía similares. El apilamiento entre las clases de *Abies religiosa y Cupressus lusitanica*, *Pinus* y *Quercus* es muy evidente en las primeras tres bandas, sin embargo, al ver los valores de la Tabla 6, muestra que si hay diferencias entre ellos, pero no son suficientes para hacer una buena discriminación.

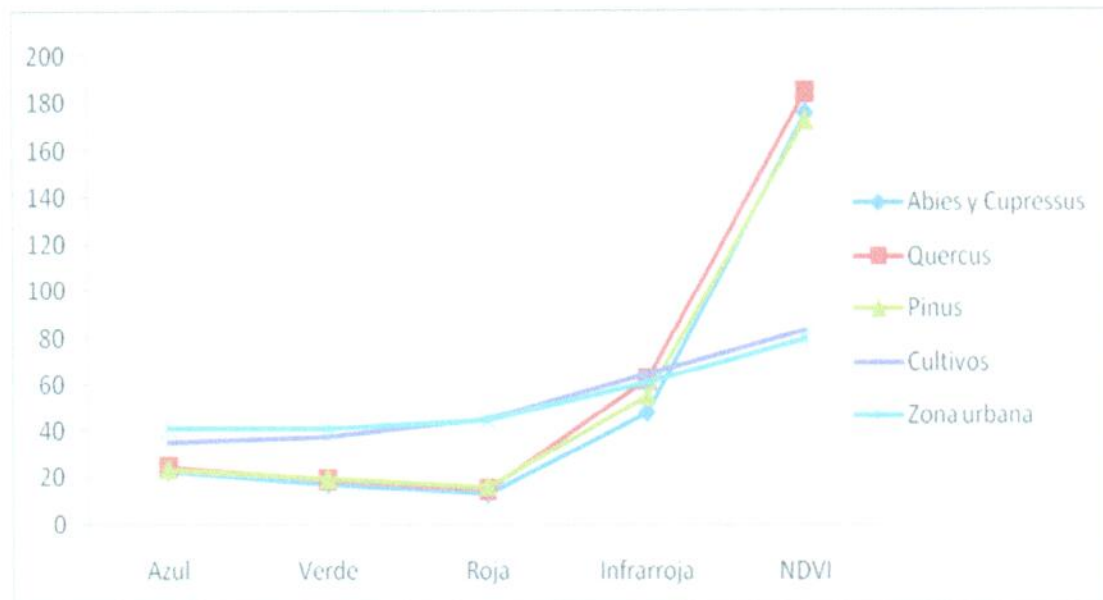


Figura 11. Firmas espectrales en las diferentes bandas y en el NDVI,

Las siguientes Figuras (12a, 12b, 12c, 12d y 12e) representan la dispersión de los valores digitales, muestra la separabilidad o apilamiento que existe en las banda 1 = azul, banda 2 =verde, banda 3 = rojo, banda 4 = infrarrojo y banda 5 = NDVI. Los colores corresponden al azul = *Quercus*, rojo = *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica*, negro = *Pinus*, café = Zona urbana y amarillo = Cultivos. Las figuras exhiben que no hay una separación lo suficientemente fuerte o amplia entre las clases.

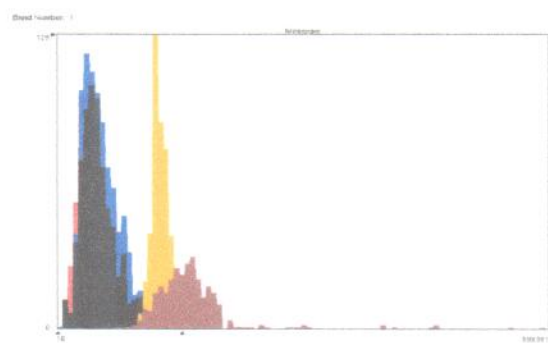


Diagrama 12a

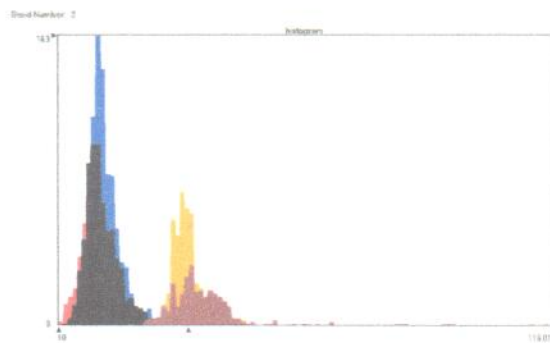


Diagrama 12b

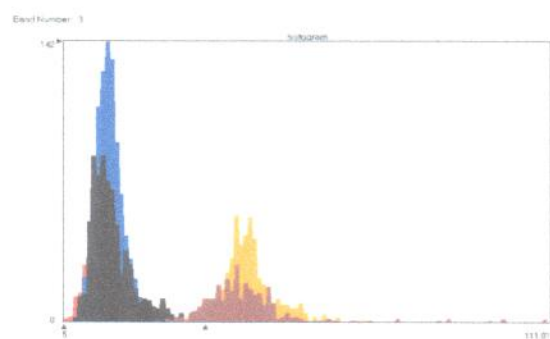


Diagrama 12c

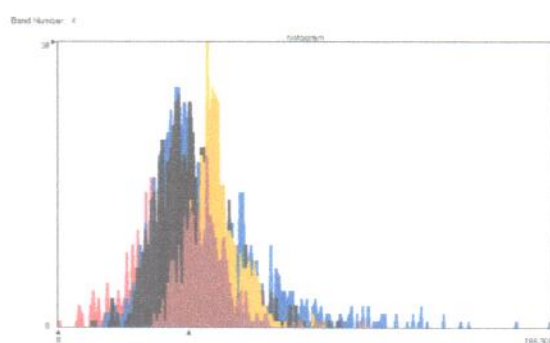


Diagrama 12d

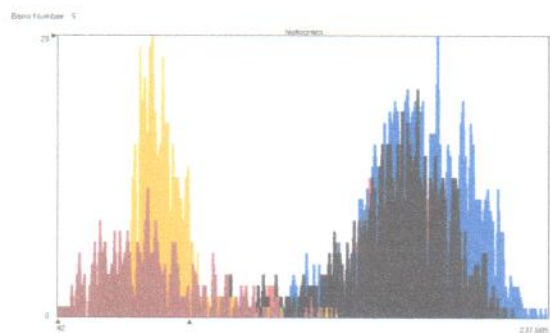


Figura 12. Diagramas de dispersión, 12a banda 1, 12b banda 2, 12c banda 3, 12d banda 4 y 12e Índice de Vegetación.

La siguiente salida de ERDAS Figura 13 ofrece una prueba numérica de que tanta separabilidad presentan las clases, es decir establece las mínimas distancias de separabilidad. Los valores que corresponden a las clases vegetales (áreas forestales) son menores y muy diferentes con respecto a las clases de las zonas urbanas y cultivos, por los que se espera, que estas clases presenten una buena separación dentro de la imagen clasificada, en esta prueba numérica las especies de *Pinus* y *Quercus* son las que demuestran mejor separabilidad.

Signature Separability Listing

File: z:/datos_landsat/ameca_firmas_masndvi.sig

Distance measure: Jefferies-Matusita

Using bands: 1 2 3 4 5

Taken 5 at a time

	Class
1	Abies y Cupressus
2	Quercus
3	Pinus
4	Cultivos
5	Zona urbana

Best Minimum Separability

Bands					AVE	MIN	Class Pairs:						
1	2	3	4	5			1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	2: 3	2: 4	2: 5
1	2	3	4	5	1192	708	708	714	1414	1412	760	1414	1412
							1406	1392	1288				

Best Average Separability

Bands					AVE	MIN	Class Pairs:						
1	2	3	4	5			1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	2: 3	2: 4	2: 5
1	2	3	4	5	1192	708	708	714	1414	1412	760	1414	1412
							1406	1392	1288				

Figura 13. Separabilidad numérica de cada clase (especie).

La siguiente matriz de error Figura 14 permite hacer un diagnóstico de la separación de los valores digitales que se encuentran dentro de los campos de entrenamiento, evalúa el comportamiento de separación entre categorías.

Los *Quercus* tiene una buena separación con respecto a los *Pinus* y *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica*.

ERROR MATRIX				

Reference Data				

Classified Data	Abies y Cu	Quercus	Pinus	Cultivos
-----	-----	-----	-----	-----
Abies y Cu	286	283	240	0
Quercus	57	327	101	0
Pinus	127	317	336	4
Cultivos	3	1	9	443
Zona urban	3	1	20	21
Column Total	476	929	706	468
Reference Data				

Classified Data	Zona urban	Row Total		
-----	-----	-----		
Abies y Cu	0	809		
Quercus	0	485		
Pinus	8	792		
Cultivos	18	474		
Zona urban	291	336		
Column Total	317	2896		
----- End of Error Matrix -----				

Figura 14. Matriz de error previa a la clasificación,

Los histogramas de frecuencias son otra herramienta con la que podemos ver sobreposicionamientos. Estos histogramas toman solamente los valores de ND de los campos de entrenamiento y no del total del área. Esta distribución se hace partiendo de suponer que los datos presentan una distribución normal. Los diagramas de dispersión permiten ver con claridad el comportamiento de las diferentes coberturas en las bandas que están especificadas, los elipses tienen una desviación estándar de 1, y permite percibir la complejidad para separa cubiertas del mismo tipo de vegetación, sin embargo, y pese al

sobreposicionamiento entre las clases, si existe una cierta diferenciación en su respuesta espectral, esto se debe al tipo de hoja de cada grupo.

Las bandas que se utilizan para la clasificación deben de ser las más adecuadas y este diagrama de dispersión nos permitió comprobar que en efecto las bandas del rojo y el infrarrojo son las que nos permiten separar adecuadamente las diferentes cubiertas.

En la Figura 15 se puede observar que las elipses de la derecha corresponden a cultivos y a las zonas urbanas, las cuales, presentan valores altos tanto en la banda del rojo como en la del infrarrojo, es decir, sus valores de reflectividad como de absorbencia son similares. Con esto se puede advertir que las cubiertas que corresponden a la vegetación tienen una respuesta espectral diferente a las zonas urbanas y a los cultivos.

A pesar del sobreposicionamientos de las áreas que representan a la vegetación, si se perciben diferencias en la distribución de sus elipses. La respuesta espectral de la categoría de *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica* posee los valores más bajos en absorción y reflectividad. Los *Quercus* toman los valores más altos en el eje de la ordenadas (banda infrarroja), es decir son los que más reflejan la luz, podemos decir que esto se debe, a que poseen hojas amplias, por otro lado sus valores en el eje de las abscisas (banda roja) son pobres, por lo que, se puede presumir que su actividad fotosintética es baja. A diferencia de *Pinus* que según el comportamiento de sus elipses tiene

hojas escuamiformes (*Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica*) y con las hojosas (*Quercus*). Las clases de *Abies religiosa* - *Cupressus lusitanica* y *Quercus*, son las que tienen mejor separabilidad. La matriz obtenida tiene una exactitud del 54.70%. La matriz está basada en una comparación entre el producto es decir la imagen clasificada obtenida y la exactitud del usuario al momento de hacer los campos de entrenamiento.

Cuadro 7. Matriz de confusión de la imagen clasificada.

Datos clasificados	<i>Abies religiosa</i> y <i>Cupressus lusitanica</i>	<i>Quercus</i>	<i>Pinus</i>	Área urbana	Cultivos	Total de renglones
<i>Abies religiosa</i> y <i>Cupressus lusitanica</i>	19	5	5	0	0	29
<i>Quercus</i>	2	13	2	0	0	17
<i>Pinus</i>	17	18	18	2	0	55
Área urbana	0	0	2	6	0	8
Cultivos	0	0	0	0	8	8
Total de columnas	38	36	27	8	8	117
Clase	Referencia	Clasificados	Números	Productor	Usuario	
Nombre	Totales	Totales	Correctos	Precisión	Precisión	
<i>Abies religiosa</i> y <i>Cupressus lusitanica</i>	38	29	19	50,00%	65,52%	
<i>Quercus</i>	36	17	13	36,11%	76,47%	
<i>Pinus</i>	27	55	18	66,67%	32,73%	
Área urbana	8	8	6	75,00%	75,00%	
Cultivos	8	8	8	100,00%	100,00%	
Totales	117	117	64			
Total de la precisión de la clasificación = 54.70%						

mayor actividad fotosintética que todas las demás categorías, sin embargo sus valores de reflectividad son más bajos que los de *Quercus*.

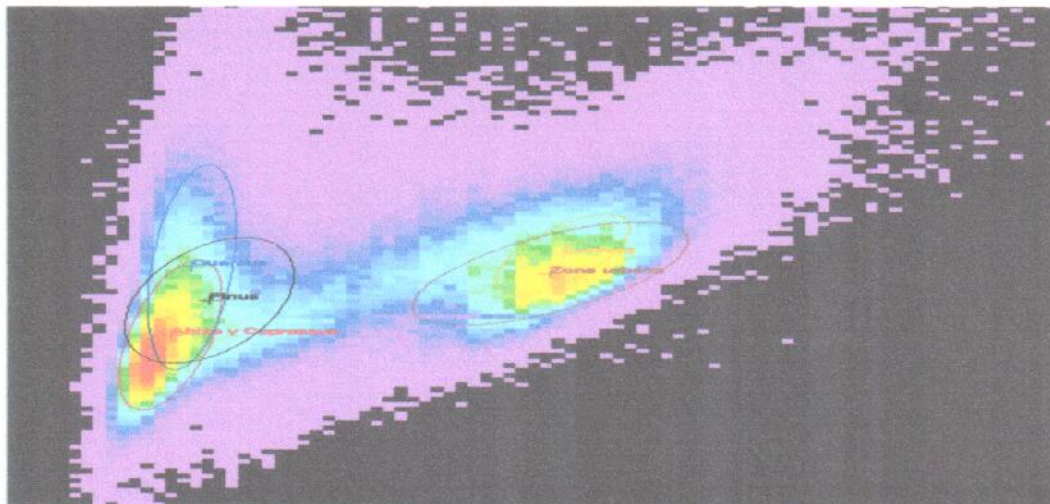


Figura 15. En el diagrama de dispersión se observa en el eje de las abscisas la banda infrarroja y en el eje de las ordenadas la banda del rojo.

Después del análisis preliminar basado sólo en los campos de entrenamiento, para evaluar que tan diferentes son las coberturas, se hizo la clasificación digital y verificación de resultados. En la Figura 16 se observa la distribución potencial de las especies forestales de la Sierra Nevada resultado del proceso de clasificación.

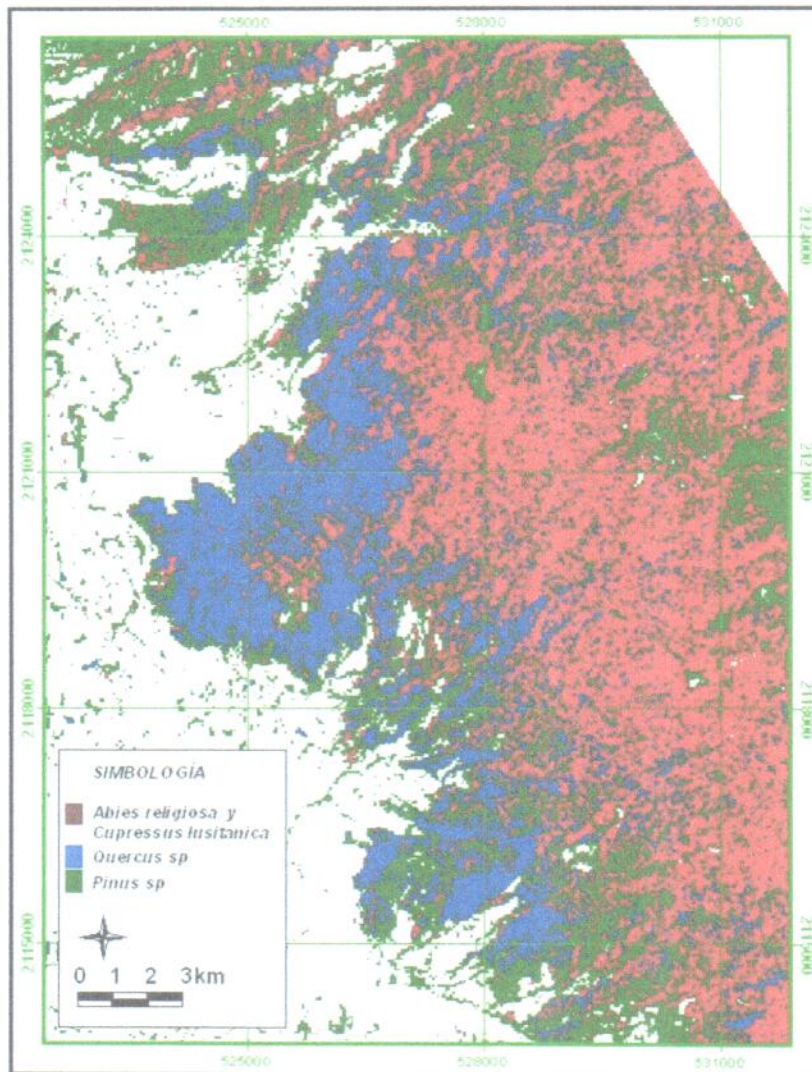


Figura 16. Imagen clasificada, en la que se observan áreas con la presencia de las especies *Quercus*, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus*.

A continuación se presenta la matriz de confusión en la que podemos ver con mayor claridad, que categorías se confunden y en qué porcentaje.

Como se pudo ver en los histogramas previos las clases cultivos y zona urbana se separan apropiadamente de las que tienen un tipo de cubierta forestal. La categoría de *Pinus*, se confunden en demasía con la clases de los árboles de

9.2. Áreas de distribución potencial de especies forestales en la Sierra Nevada

Los siguientes mapas exponen la distribución potencial de las especies forestales incluidas en este estudio, los mapas se elaboraron por medio de la aplicación de álgebra booleana y con Sistemas de Información Geográfica, las variables y rangos empleados en la elaboración de los mapas están basados en el perfil bioclimático de cada especie o asociación.

9.2.1. Distribución potencial de *Abies religiosa*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de la especie *Abies religiosa* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	356.44	13.11	33.42	3240
Mínimo	7.80	7.70	0	2700
Promedio	216.39	11.67	14.05	2813.8

La geología de los puntos de muestreo de *Abies religiosa* se ubicaron en el tipo de roca andesita, toba andesítica y brecha sedimentaria. En el caso de la edafología, los puntos de *Abies religiosa* tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico.

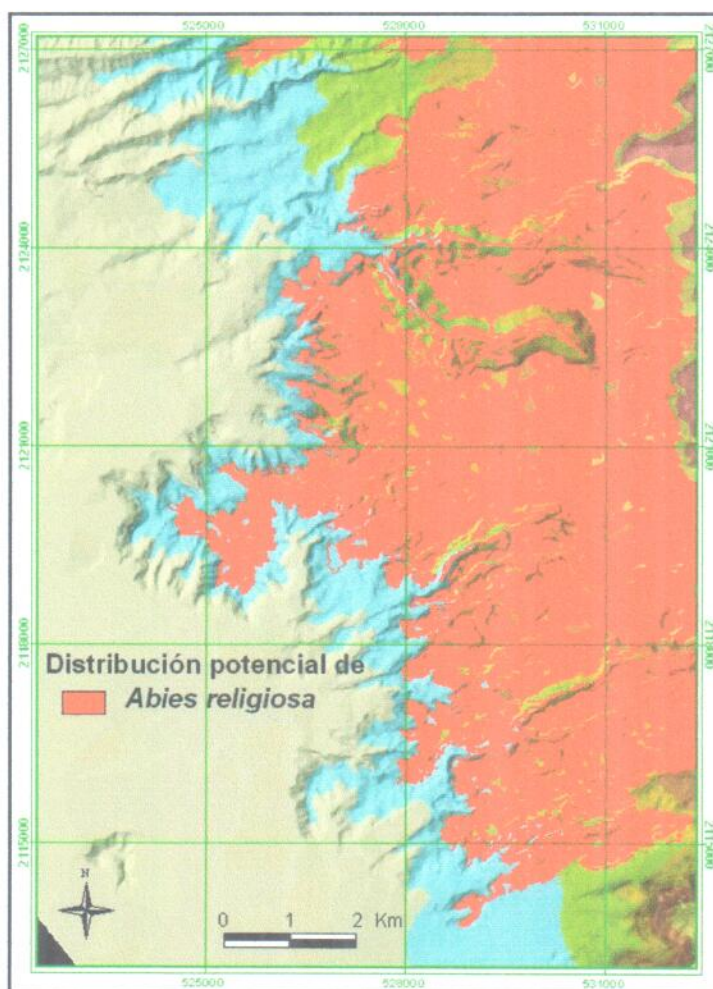


Figura 17. Distribución potencial de la especie *Abies religiosa*.

9.2.2. Distribución potencial de *Cupressus lusitanica*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de la especie *Cupressus lusitanica* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	301.042	13.36	33.80	3136.39
Mínimo	169.97	10.28	7.87	2662.26
Promedio	218.34	11.80	19.18	2901.41

La geología de los puntos de muestreo de *Cupressus lusitanica* se ubicaron en el tipo de roca andesita y brecha sedimentaria. Los puntos referentes a la edafología se encuentran en los tipos de suelo Litosol/Andosol y su unidad de suelo es litosol/húmico, otros puntos de ubican en Bercha Sedimentaria, con tipo de suelo Andosol/Regosol y con unidad de suelo húmico/litosol/regosol.

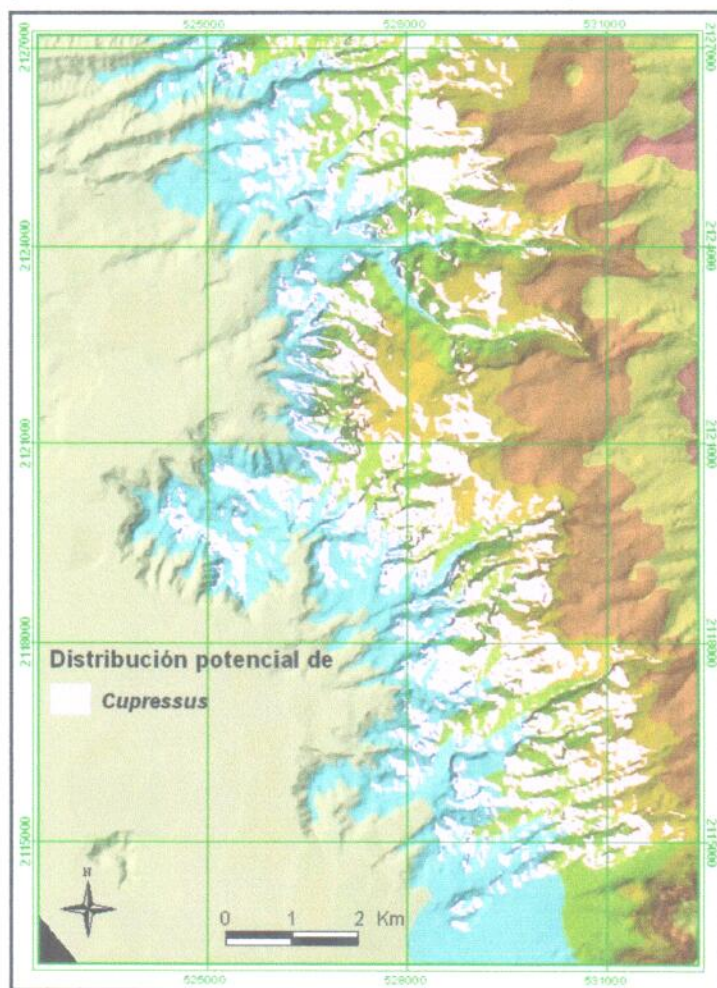


Figura 18. El mapa muestra la distribución potencial de *Cupressus lusitanica*.

9.2.3. Distribución potencial de la asociación de *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae*.

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de la asociación de las especies *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México. También se presentan los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	324.46	13.10	46.53	3195.67
Mínimo	132.53	9.90	0	2700
Promedio	201.90	12.04	20.20	2864.80

La geología de los puntos de muestreo de la asociación *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae* se encontraron en el tipo de roca andesita y becha sedimentaria. Respecto a la edafología de la asociación tiene como un tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/humico

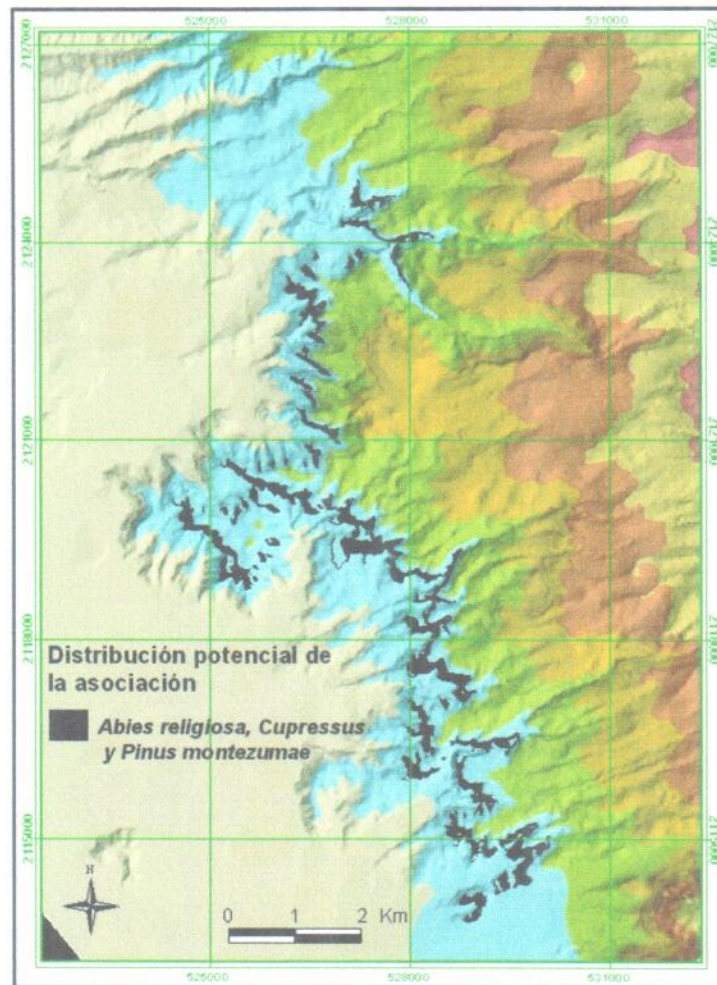


Figura 19. Distribución potencial de la asociación de las especies *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae*.

9.2.4. Distribución potencial de *Quercus*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de *Quercus* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	348.72	14.01	48.42	3273.95
Mínimo	141.91	9.39	0	2560
Promedio	264.08	12.76	23.59	754.4

La geología de los puntos de muestreo de *Quercus* se encontraron en el tipo de roca andesita y becha sedimentaria. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico.

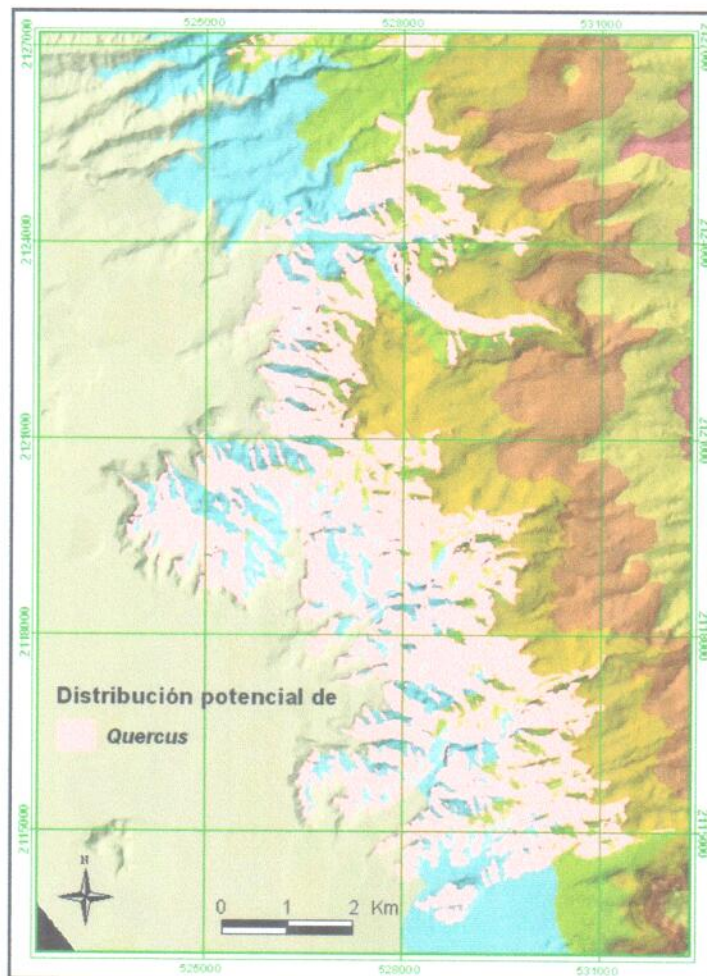


Figura 20. Distribución potencial de *Quercus*.

9.2.5. Distribución potencial de *Arbutus* (Madroño)

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de *Arbutus* (madroño) en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	337.62	11.93	36.03	3019.16
Mínimo	204.32	11.19	9.76	2880
Promedio	250.13	11.50	18.77	2948.11

La geología de los puntos de muestreo de *Arbutus* se encontraron solamente en el tipo de roca andesita. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico

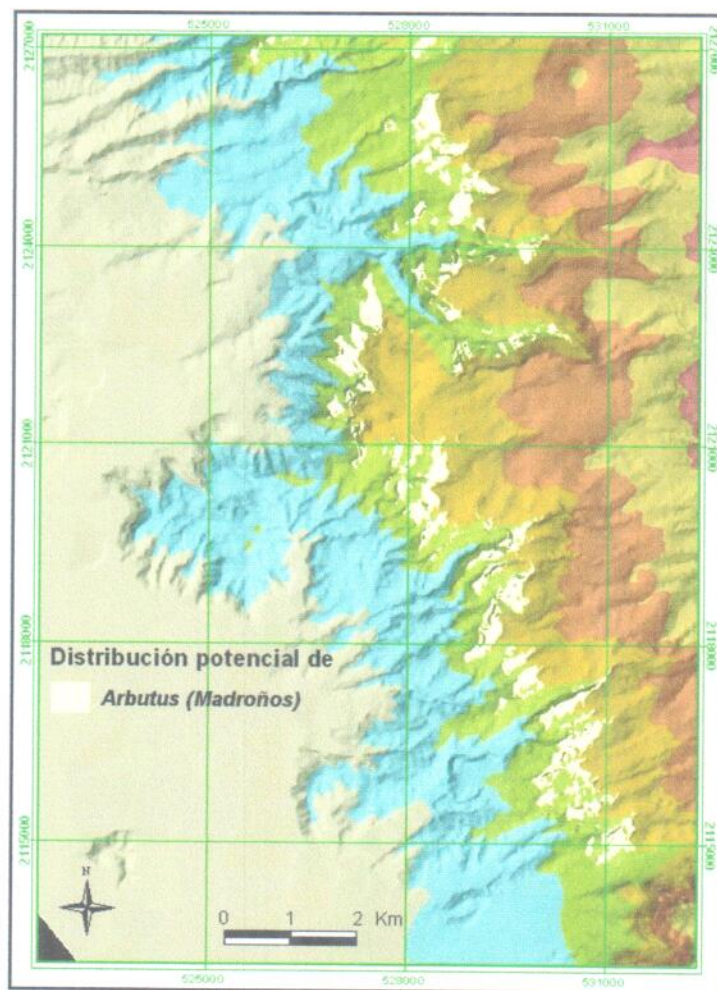


Figura 21. Distribución potencial de *Arbutus*.

9.2.6. Distribución potencial de la asociación *Quercus* y *Arbutus* (Madroño)

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de la asociación *Quercus* y *Arbutus* (madroño) en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	337.62	11.39	36.03	3100.99
Mínimo	185.02	10.51	0	2963.85
Promedio	240.97	10.91	18.38	3037.46

La geología de los puntos de muestreo de la asociación de *Quercus* y *Arbutus* se encontró solamente en el tipo de roca andesita. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico

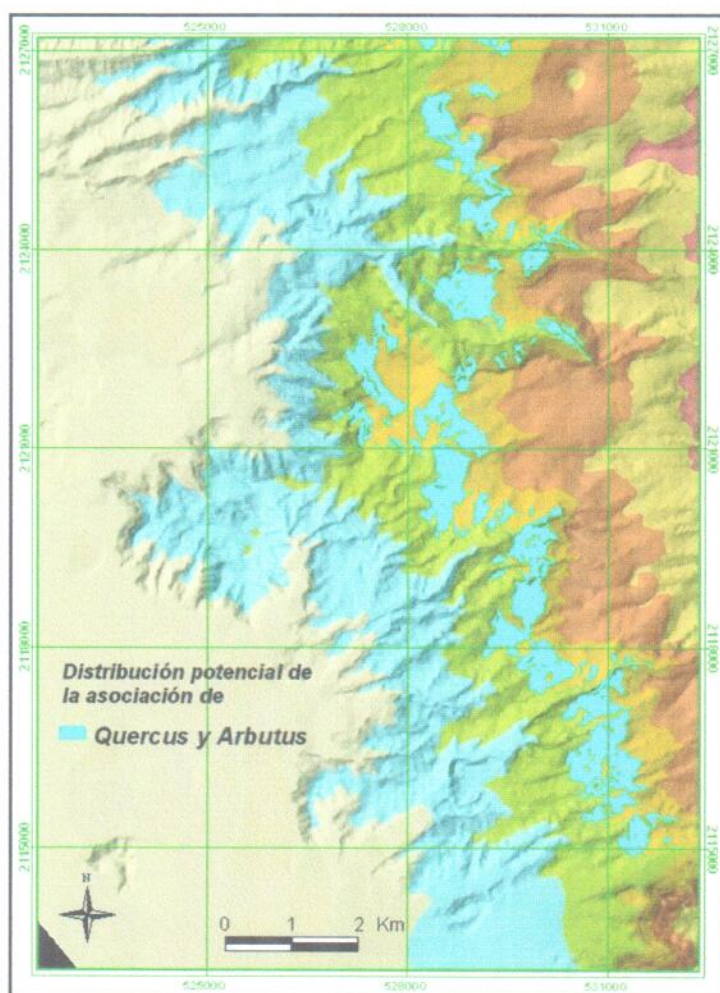


Figura 22. Distribución potencial de la asociación de *Quercus* y *Arbutus*.

9.2.7. Distribución potencial de *Pinus teocote*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de *Pinus teocote* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	355.36	12.58	30.98	2856.23
Mínimo	35.77	12.10	0	2780
Promedio	224.61	12.26	15.07	2829.67

La geología de los puntos de muestreo de *Pinus teocote* se encontraron solamente en el tipo de roca andesita. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico

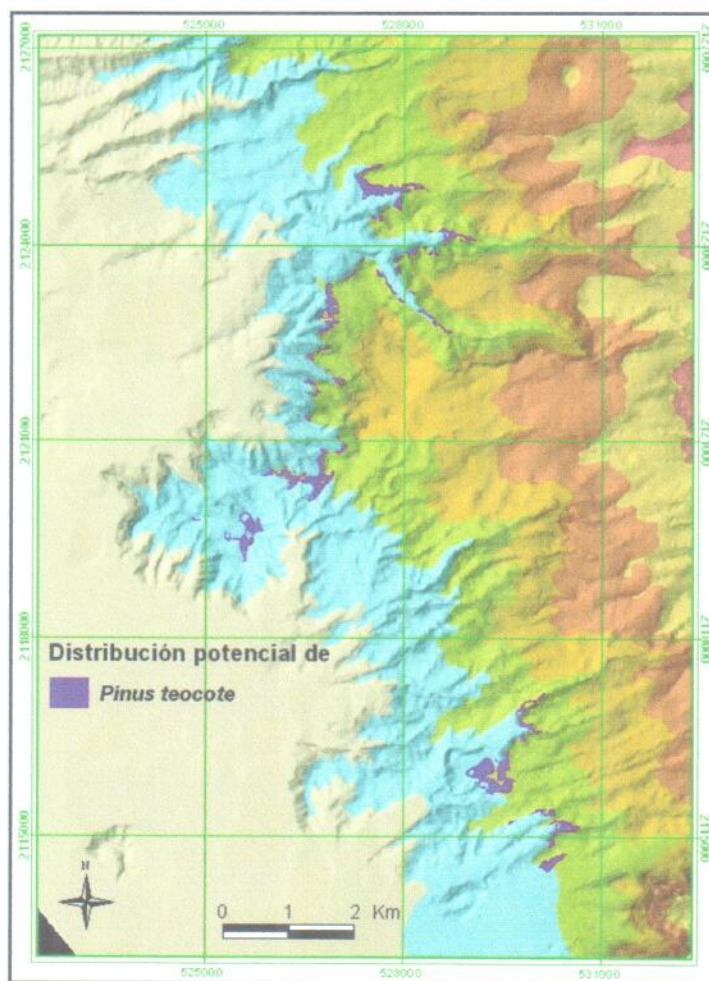


Figura 23. Distribución potencial de *Pinus teocote*.

9.2.8. Distribución potencial de *Pinus montezumae*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de *Pinus montezumae* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	282.95	14.01	35.81	3048.20
Mínimo	208.66	10.83	0.86	2558.53
Promedio	234.70	24.85	20.35	2880.86

La geología de los puntos de muestreo de *Pinus montezumae* se encontraron solamente en el tipo de roca andesita. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico.

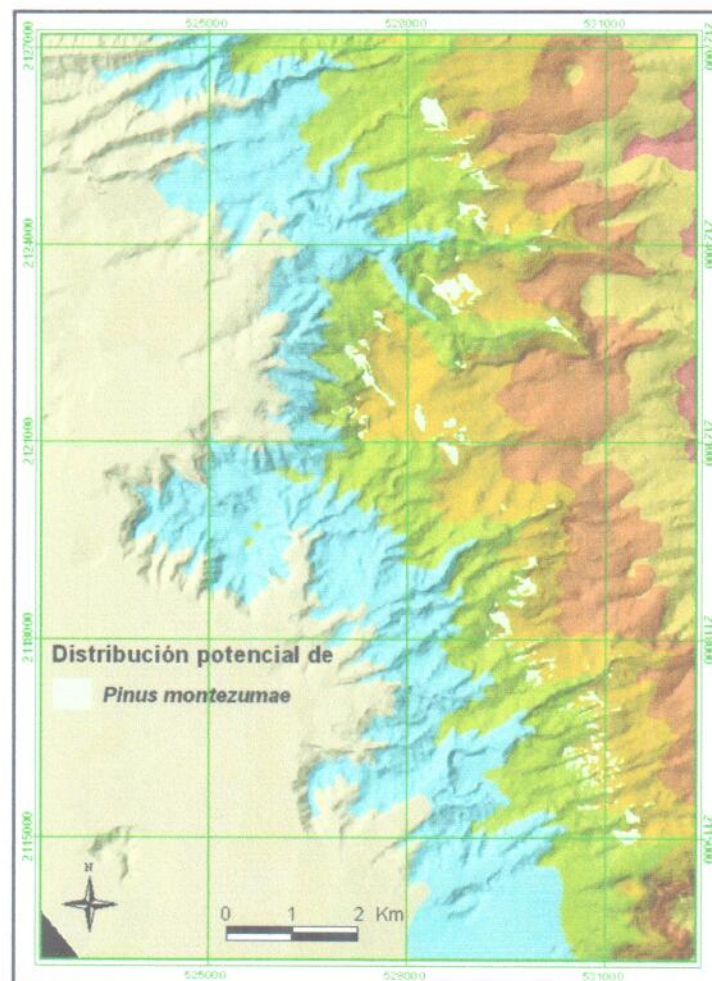


Figura 24. Distribución potencial de *Pinus montezumae*.

9.2.9. Distribución potencial de *Pinus leiophylla*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de *Pinus leiophylla* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	248.38	13.04	22.01	2823.34
Mínimo	157.51	12.30	13.48	2682.62
Promedio	212.02	12.67	16.19	2765.85

La geología de los puntos de muestreo de *Pinus leiophylla* se encontraron en el tipo de roca andesita y en brecha sedimentaria. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tiene como tipo de suelo Litosol/Andosol y como unidad de suelo litosol/húmico

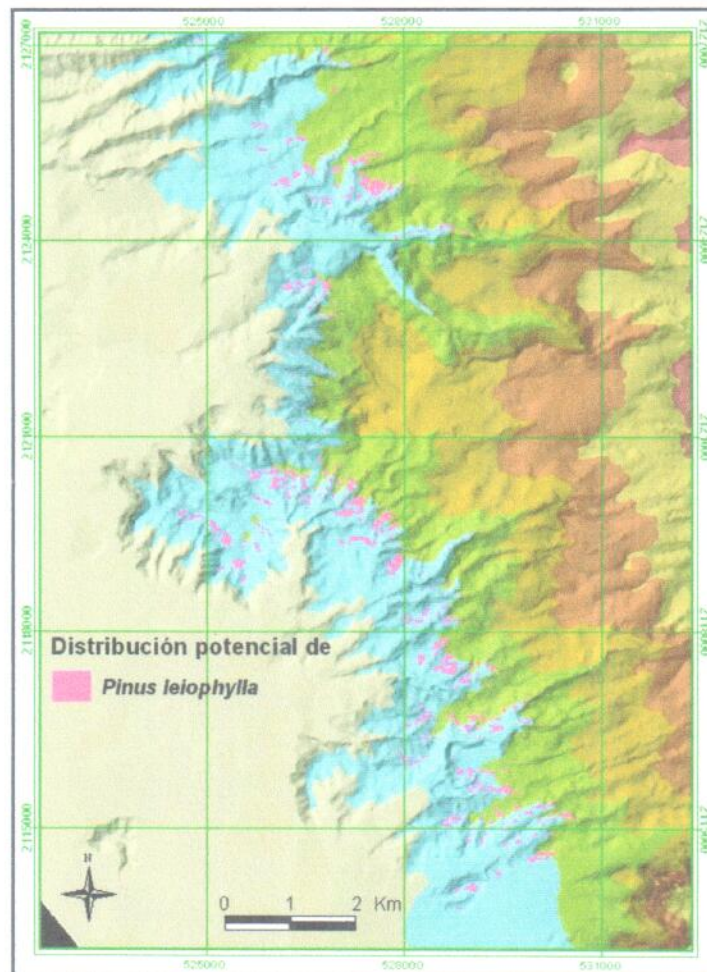


Figura 25. Distribución potencial de *Pinus leiophylla*.

9.2.10. Distribución potencial de *Pinus ayacahuite*

En el siguiente mapa se observa la distribución potencial de *Pinus ayacahuite* en la Sierra Nevada, en el Edo. de México y los parámetros obtenidos de las variables que conforman su perfil bioclimático.

	Orientación	Temperatura promedio anual	Pendiente	Altitud
Máximo	353.59	13.58	36.37	2730.24
Mínimo	46.53	12.05	8.68	2627.81
Promedio	250.59	13.08	16.80	2664.76

La geología de los puntos de muestreo de *Pinus ayacahuite* se encontraron en el tipo de roca andesita y en brecha sedimentaria. Respecto a la edafología en que se encuentran los puntos de muestreo tienen un tipo de suelo andosol/Regosol y como unidad de suelo húmico/litosol/regosol

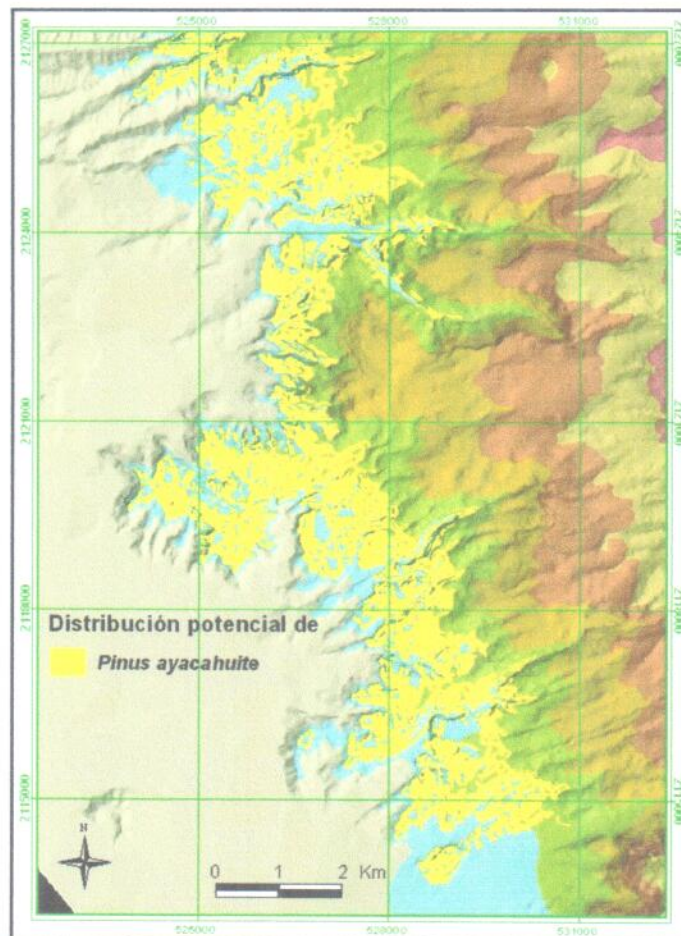


Figura 26. Distribución potencial de *Pinus ayacahuite*.

9.2.11. Mapa de la distribución potencial de especies con hojas escuamiformes en la Sierra Nevada, en el Edo. de México.

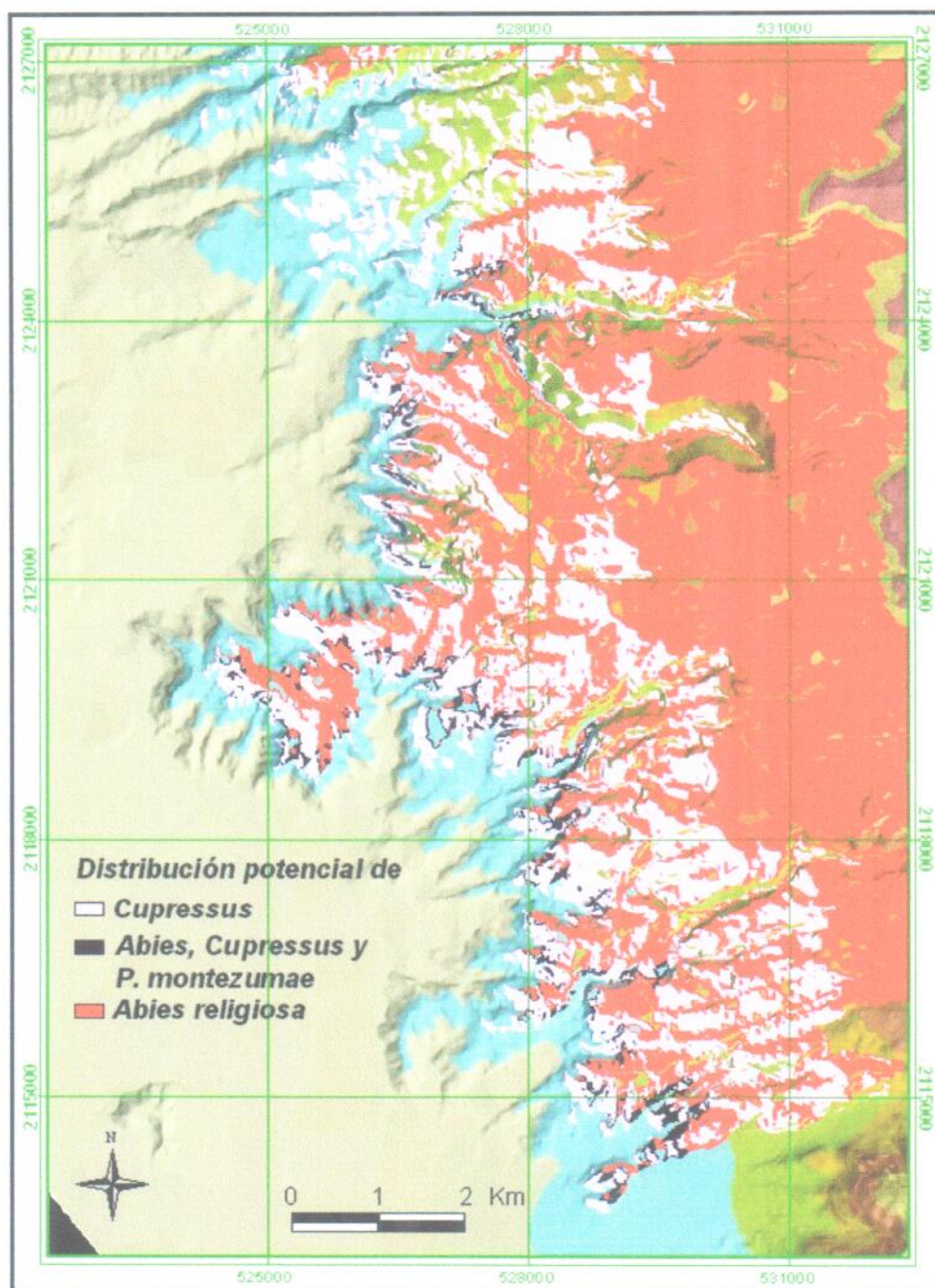


Figura 27. Distribución potencial de *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y la asociación de *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica* y *Pinus montezumae*.

9.2.12. Mapa de la distribución potencial de especies con hojas amplias (hojosas) en la Sierra Nevada, en el Edo. de México.

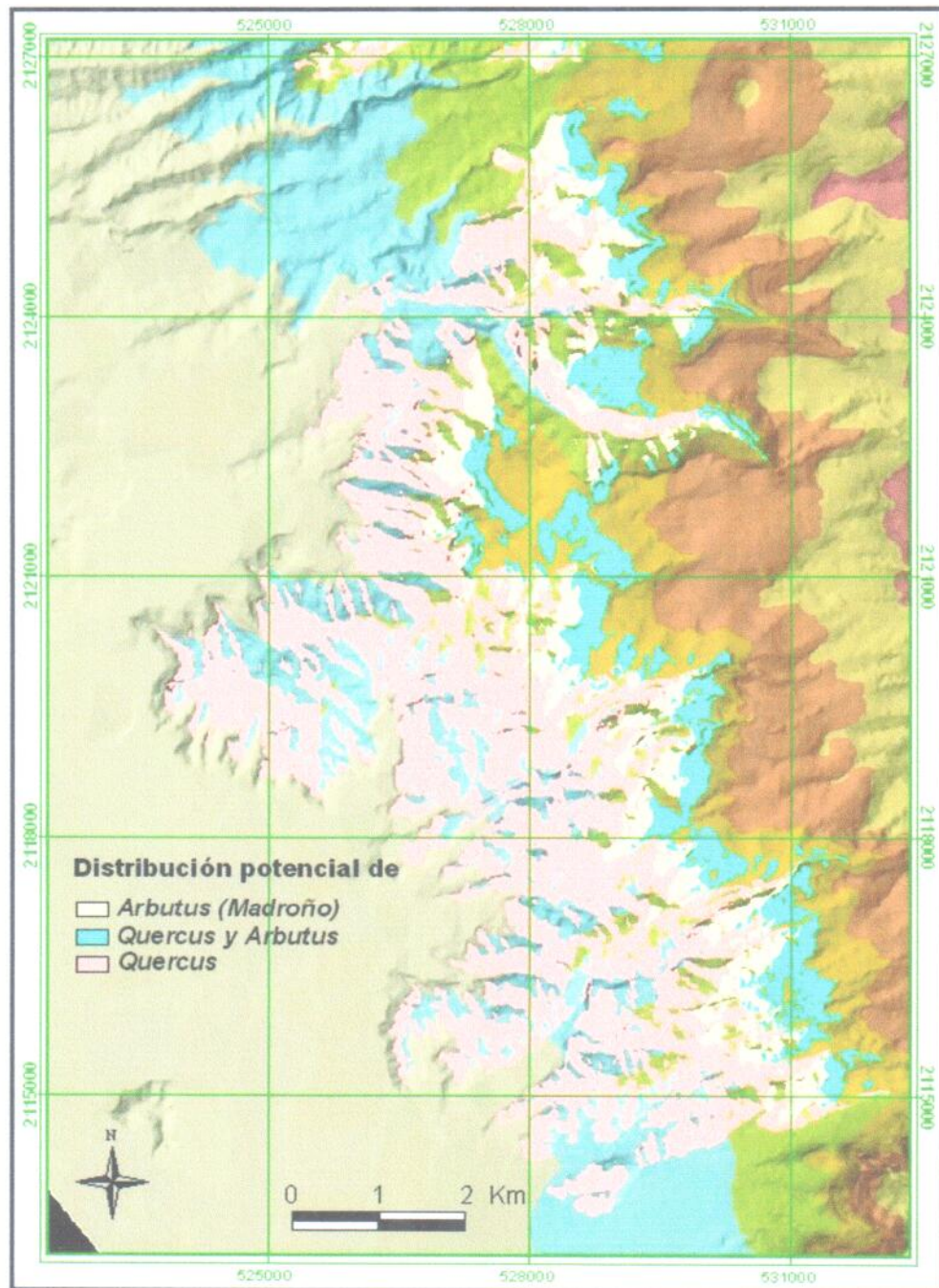


Figura 28. Distribución potencial de *Quercus*, *Arbutus* (Madrño) y la asociación de las dos especies. Especies de hojas amplias (hojosas)

9.2.13. Mapa de la distribución potencial de especies con
hojas lineares en la Sierra Nevada, en el Edo. de México

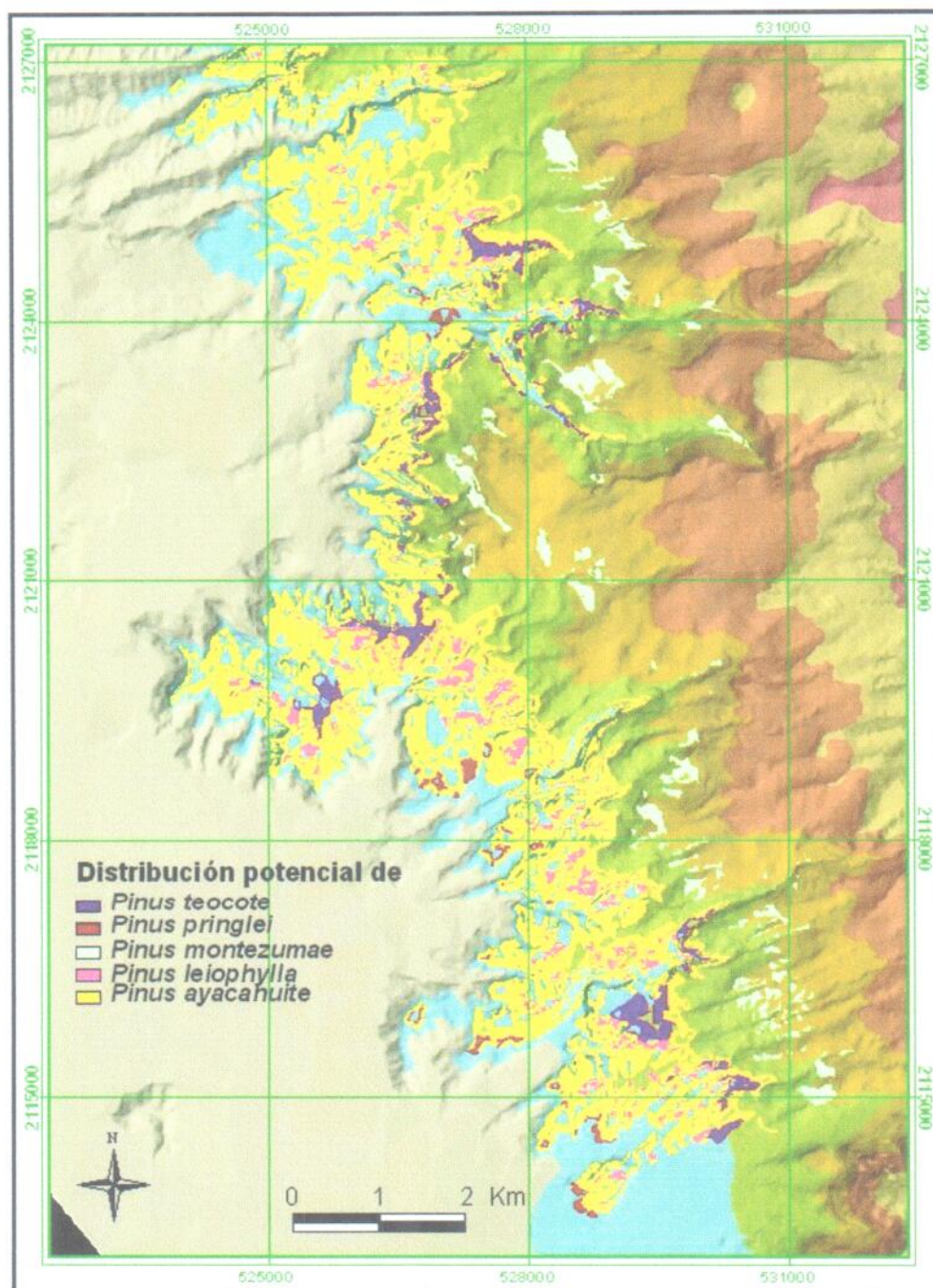


Figura 29. Distribución potencial de los pinos presentes en la zona, *Pinus teocote*, *P. montezumae*, *P. leiophylla* y *P. ayacahuite*.

10. DISCUSIÓN:

10.1 Clasificación digital

Para hacer las correcciones geométricas se tomaron puntos de control a partir del vector de ríos. Según Chuvieco (2006) se debe de tomar en cuenta el cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen que se está trabajando y las de referencia, lo que hace una transferencia de los ND originales a una nueva posición, definida por la transformación. Los puntos de control arrojaron un error mínimo en cada punto de control y en algunos casos éste fue de cero; así la imagen espacialmente fue coincidente con todos los temas cartográficos de la investigación.

Las evaluaciones gráficas y numéricas revelan una serie de dificultades para discriminar cubiertas vegetales similares y cercanas en su distribución. Algunos trabajos dan muestra de esto, como el de Euler (2003), él hizo un estudio de la Interpretación de datos del dosel forestal a partir de sensores remotos, menciona que algunos factores temporales como las condiciones climáticas, las variaciones estacionales de la vegetación y la presencia de nubes pueden afectar el proceso de interpretación. Zarco (2008) sugiere que la caracterización y modelación del efecto de la escala espectral es la mezcla de suelo y vegetación, lo cual representa un problema en el campo de los sensores remotos. Así se puede decir, que un pixel se compone de una mezcla de suelo y vegetación, es decir que la respuesta espectral de un pixel puede ser diferente aunque la cobertura sea la misma. Chuvieco, (2006) menciona que pese a tener una información rica procedente del sensor, al hacer la traducción

digital del flujo de energía, no siempre se podrán separar cubiertas, pues puede haber distintas categorías temáticas con un comportamiento espectral similar.

10. 2. Áreas potenciales de distribución

El álgebra booleana nos permiten crear nuevos objetos a partir de objetos básicos, es decir, se crea una objeto a partir de otros dos o más anteriores. Las variables del perfil bioclimático (altura, precipitación, temperatura, pendiente, orientación, edafología y geología), representan el grupo de objetos, a los que se les realizó la operación booleana llamada intersección: la cual, se refiere a la creación de un objeto cuyo volumen es el común de los objetos (variables). Este objeto resultante representa el área que ocupa la especie o asociación, que pudimos observar en el campo. En trabajos que han utilizado el álgebra booleana se han obtenido buenos resultados, como el trabajo de Edeso J, (1995); él aplicó este tipo de metodología para crear mapas sintéticos de riesgos potenciales y mapas de erosión. Martínez R, (2000); seleccionó áreas para verter residuos sólidos en el entorno de Valladolid, para lo cual, hizo uso de un análisis multicriterio basado en el álgebra booleana.

Los sistemas de información geográfica constituyen una valiosa herramienta para la toma de decisiones en un gran número de problemas, ambientales, que tanto interés despiertan en la actualidad (Martínez, 2000). Así el análisis de datos geoespaciales permite delimitar zonas tan particulares como queramos, de manera que la selección de variables dependerá del tipo de estudio, de los alcances y de la escala a la que se pretende trabajar.

11. CONCLUSIÓN:

- Las propiedades ópticas de las hojas, permitieron obtener una imagen clasificada con las siguientes clases, 1. *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica* (hojas escuamiformes), 2. *Pinus* (hojas lineares) y 3. *Quercus* (hojosas).
- La matriz resultante de la clasificación tuvo una exactitud del 54.70%.
- La imagen clasificada y los estadísticos que se obtuvieron mostraron que, la clase de *Quercus* y *Abies religiosa* - *Cupressus lusitanica* son las que mejor se separan dentro de la imagen clasificada.
- Las condiciones ecológicas propicias para el establecimiento de los *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica*, son muy particulares y similares. La distribución de los *Quercus* se pueden particularizar a partir de su Geología y Edafología. La distribución de las especies del género *Pinus* está determinado por los cambios altitudinales.
- Finalmente el área de estudio (Sierra Nevada) como la mayoría del territorio mexicano, presentan condiciones muy particulares tanto en su topografía, como en las condiciones atmosféricas, lo que provoca una heterogeneidad en su estrato arbóreo y en sus condiciones climáticas. Por consiguiente la respuesta espectral de árboles de una misma especie puede comportarse diferente.
- El análisis de datos geoespaciales permitió, crear un perfil bioclimático y proponer áreas de distribución potencial, por especie arbórea.

- Los parámetros obtenidos en el perfil bioclimático para las variables de cada especie, corresponden a los parámetros reportados en la bibliografía.
- La aplicación de álgebra booleana, permitió obtener áreas potenciales de distribución de cada especie arbórea, esto significa que cada área potencial, cumple con todos los requerimientos ecológicos de la especie estudiada.

12. BIBLIOGRAFIA

Anderson, R. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System For Use with Remote Sensor Data. Natural Resource Inventory.

Anderson, R. P., D. Lewya. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. Ecological Modelling 162: 211-232

Bustamante, N. 2004. Sensores de temperatura, pH y detergentes para control medioambiental con un prototipo que utiliza fibra óptica y luminiscencia con resolución de fase. Tesis Doctoral.

Chapman, A. D. y J. R. Busby. 1994. Linking plant species information to continental biodiversity inventory, climate modeling and environmental monitoring. In: R. I. Miller(ed.). Mapping the diversity of nature. Chapman & Hall, London, pp. 179-195.

Chuvieco, E. 2006. Teledetección ambiental. 2ª edición. Barcelona.

Cihlar, J., Xiao, Q., Beaubien, J., Fung, K., and Latifovic, R. 1998. Classification by Progressive Generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal for Remote Sensing* 19: 2685-2704.

Coss W. 2007. Los bosques de México. Teorema Ambiental. Agosto 01.

Leprieur C, Y. H. Kerr; J. M. Pichon. 1996. Critical assessment of vegetation indices from AVHRR in a semi-arid environment. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 17.

Eguiluz, T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de Ing. Esp. En Bosques. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 623 p

ERDAS Macro Language Reference Manual. ERDAS V 8.5. 2000. Atlanta, Georgia.

Euler, Ana. 2003. Interpretación de datos del dosel forestal y de sensores remotos para la interpretación de mapas de tipos de bosque en Acre, Brasil. *In Actualidad Forestal Tropical*. Vol. 11 (1). 22-23 pp.

Fallas, J. 2004. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales.

Franklin, S. E. 2001. Remote Sensing for Sustainable Forest Management. Lewis Publishers p 407.

Felícísimo, A. 1994. Modelos Digitales del Terreno. Pentafalfa ediciones. España. pag. 222.

Furter J. y Melendez B. 1978. Geología. pag. 912

Gandía, S y Meliá Millares J. 1993. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Valencia. pag 308.

Gilabert, M; González, J. y García, J.1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista de Teledetección. 8:1-10

Huguet del Villar, E. 1983. Geo- Edafología. Barcelona. pag. 300.

Jeffers, R. 1996. Measurement and characterisation of biodiversity in forest ecosystems. New methods and models. European Forest Institute, EFI Proceedings, 6: 59-67.

Lira, A. Morales y F. Zamora (1997). Study of Sediment Distribution in the Area of the Pánuco River Plume by Means of Remote Sensing, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, pp. 171-182.

Joubert, A. y P. A. Buroillet. 1934. Biología y papel forestal de los cipreses. Tomo XII. Francia, pag. 186-193.

Martínez, M 1948. Los pinos mexicanos. 2ª. edición. Botas; México, D.F. 361 p.

Martínez R., Tobaada J., Ordóñez Celestino y Lanaja José Ma. Marzo de 2000. Analisis multivariado para la selección de emplazamientos de vertederos de residuos sólidos en el entorno de Valladolid. Revista internacional de Ciencias de la Tierra. Mapping interactivo.

Maruri, J. 2002. Índice de vegetación. Centro de Información Agropecuaria Querétaro. 5:17.

Medrano, F. 2004. Las Comunidades Vegetales de México. Propuesta para la unificación de la vegetación de México. Instituto Nacional de Ecología. México. D.F. 82 p

Mittemeier, R y Goettsch, C. 1997. Megadiversidad. Los países biológicamente más ricos del mundo. CEMEX, México.

Sanchez--Cordero, V., A. T. Peterson y Escalante-Pliego. 2001. El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. In: H. M. Hernández, A. N. García A., F. Álvarez y M. Ulloa (comps.) Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., pp. 359-379.

Sainz de la Maza, M. 2000. SIG y modelización de fauna protegida: delimitación de hábitat potencial del Urogallo (*Tetrao urogallus*) mediante lógica borrosa (Fuzzy logic) en el Parque Natural del Cadi – Moixeró (Pirineo oriental). Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. 352-366.

Musálem M y S. M. Martínez. INIFAP, 2003, Monografía de *Pinus leiophylla* Schl.et Cham. Proyecto de Investigación Manejo Sustentable y Conservación de la Biodiversidad de los Bosques de Clima Templado y Frío de México. Proyecto Sierra Madre.

Norton, W. T. 1996. Conservation of biological diversity in temperate.

Palacio-Prieto, J. Bocco, Velázquez, A. Francois, J. Takaki, F. Victoria, A. Luna, L. González, Gómez, G. López, J. Palma, M. Trejo, I. Peralta, A. Prado, J. Rodríguez, A. I Mayorga-Saucedo, R. González, F. 2000. La

condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Nacional Forestal. Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. 2000. Num. 43 pag 183-2002.

Pérez C y L. Muños A. 2006. Teledetección: nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca. España. pag 359.

Pu, R., B. Xu, y P. Gong. 2003. Oakwood crown closure estimation by unmixing Landsat Tm data. Int. J. Remote Sensing 24(22):4433-4445.

Quiñonero, R. A Juárez y A, Sarria. 2000. Digitalización de información cartográfica en Grass: V. digit.

Salisbury, F y C. Ross. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo editorial Iberoamérica. Traductor Claudia C. Martínez Amigón. México. Pag 748
.SEMARNAT, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Federalización y Descentralización de Servicios Forestales y de Suelo, México, 2002.

Villaseñor, J y Téllez, O. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica. 75(2):205-220.

Welch, Roy Usery, E. Lynn Department of Geography, University of Georgia, Athens, Publication Date: May 1984 Volume: GE-22, Issue: 3 On page(s): 281-288.

WWF. 2007. Bosques mexicanos. México [web en línea]. Disponible desde <Internet en: http://www.wwf.org.mx/wwfmex/prog_bosques.php> [con acceso el 31 de mayo de 2009].

Zepeda, M y Acosta, M. 2000. Incremento y rendimiento maderable de *Pinus montezumae* Lamb., en San Juan Tetla, Puebla. 6(1):15-27.

Zamora, C. y J. F. Castellanos. 1999. Fundamentos Técnicos para la conservación de *Pinus ayacahuite* Ehren en el estado de Chiapas. Folleto técnico forestal No.3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Diciembre de 1999.

<http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/VRL/Tutorials/euromet/courses/spanish/nwp/n5720/n5720005.htm>