



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS.

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

ANÁLISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA FORESTAL 2001-2012
ASOCIADO A LOS CAMINOS EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA
CALAKMUL Y ZONAS SUJETAS A CONSERVACIÓN ECOLÓGICA

BALAM KÚ Y BALAM KIN.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

GERARDO RODRÍGUEZ MOSQUEDA.

ASESOR

MTRO. JOSÉ MANUEL ESPINOZA RODRÍGUEZ



MÉXICO D.F.

AGOSTO DE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo I BIODIVERSIDAD, CONSERVACIÓN Y GEOGRAFÍA DE LA CONSERVACIÓN	
1.1 Biodiversidad.....	6
1.1.1 Orígenes.....	6
1.1.2 Definición.....	8
1.1.3 La biodiversidad en México y en el mundo.....	15
1.2 Papel de la geografía en la conservación de la biodiversidad. ¿Por qué una geografía de la conservación?.....	27
1.2.1 Conservación de la biodiversidad y el papel de la geografía.....	28
1.2.2 Geografía Ambiental y Geografía de la Conservación.....	32
Capítulo II PERCEPCIÓN REMOTA	
2.1 Percepción remota o teledetección.....	37
2.1.1 Definiciones.....	37
2.1.2 Elementos del sistema de teledetección.....	38
2.1.3 El espectro electromagnético.....	40
2.1.4 La estructura de la imagen satelital.....	42
2.1.5 El programa Landsat.....	43
2.1.6 El programa SPOT.....	46
2.2 Uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas.....	47
2.3 Pre procesamiento de imágenes.....	50
2.3.1 Correcciones radiométricas.....	51
2.3.2 Correcciones geométricas.....	53
2.4 Procesamiento de imágenes.....	54
2.5 Clasificación digital de imágenes.....	55
2.5.1 Clasificación no supervisada.....	55
2.5.2 Clasificación supervisada.....	56
2.6 Índices de vegetación.....	59
2.7 Verificación de resultados.....	62
2.7.1 Diseño del muestreo.....	62
2.7.2 Evaluación de los sitios de verificación.....	64
Capítulo III. EFECTOS DE CAMINOS EN ÁREAS PROTEGIDAS	
3.1 Ecología del paisaje.....	66
3.2 Ecología de caminos.....	67
3.2.1 Efectos ecológicos de caminos.....	68
3.2.2 Alternativas de manejo.....	74
Capítulo IV. ÁREA DE ESTUDIO	
4.1 Localización geográfica.....	77
4.2 La historia que Calakmul, Balam Kú y Balam Kin cuentan.....	79
4.3 Caracterización física, biológica, económica y social.....	85
4.3.1 Geología y Geomorfología.....	85
4.3.2 Clima.....	87
4.3.3 Suelo.....	87
4.3.4 Vegetación.....	88
4.3.5 Fauna.....	91

4.3.6 Hidrografía.....	95
4.3.7 Aspectos sociodemográficos.....	96
4.3.8 Grupos étnicos.....	97
4.3.9 Actividades económicas.....	97
4.3.10 Diagnóstico.....	99

Capítulo V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales.....	102
5.2 Métodos.....	104
5.2.1 Obtención de la red de caminos del área de estudio.....	104
5.2.2 Pre-procesamiento de imágenes.....	104
5.2.3 Procesamiento de imágenes.....	105
5.2.4 Verificación de resultados.....	108
5.2.5 Generación de cartografía.....	109
5.2.6 Análisis del cambio de cobertura forestal.....	110
5.2.7 Análisis del cambio de cobertura forestal asociado a caminos.....	111
5.2.8 Consideración del atropello de fauna en los distintos caminos.....	112

Capítulo VI. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 Los caminos de la RB Calakmul y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin.....	114
6.1.1 Longitud de caminos en el área de estudio.....	115
6.1.2 Longitud de caminos en las Áreas Naturales Protegidas (ANP).....	115
6.1.3 Superficie ocupada por caminos en área de estudio.....	121
6.1.4 Superficie de caminos en las ANP.....	121
6.2 Clasificaciones supervisadas.....	124
6.2.1 Verificación de resultados.....	126
6.2.2 Resultados Redes Neuronales.....	139
6.2.3 Resultados Máxima Verosimilitud.....	144
6.3 Análisis del cambio de cobertura forestal 2001-2012.....	152
6.4 Cobertura forestal, fauna y caminos.....	160
6.4.1 Superficie en riesgo de deforestación e impactos.....	160
6.4.2 Deforestación asociada a caminos.....	170
Conclusiones y recomendaciones.....	176

Bibliografía

Índice de Cuadros

Capítulo 1	
Cuadro 1.1 Definiciones de Biodiversidad.....	10
Cuadro 1.2 Países megadiversos y número de especies.....	17
Cuadro 1.3 Países bioculturalmente más diversos.....	20
Capítulo 3	
Cuadro 3.1 Riesgo de deforestación según distancias desde el camino.....	70
Cuadro 3.2 Efectos ecológicos de caminos en las distintas etapas.....	72
Capítulo 4	
Cuadro 4.1 Grupos étnicos dentro de la RBC.....	97
Capítulo 5	
Cuadro 5.1 Distancias de caminos y riesgos de deforestación e impactos.....	112
Capítulo 6	
Cuadro 6.1 Total de caminos por tipo en el área de estudio.....	115
Cuadro 6.2 Total de caminos en cada tipo de ANP del área de estudio.....	116
Cuadro 6.3 Total de caminos por tipo en cada ANP.....	118
Cuadro 6.4 Total de caminos por tipo en cada zonificación de ANP.....	120
Cuadro 6.5 Ancho promedio de caminos.....	121
Cuadro 6.6 Superficie total de caminos por tipo en área de estudio.....	121
Cuadro 6.7 Superficie total de caminos y por tipo de caminos en cada ANP.....	122
Cuadro 6.8 Superficie total de caminos por tipo por zonificación de ANP.....	122
Cuadro 6.9 Resultados de las clasificaciones supervisadas.....	151
Cuadro 6.10 Superficies por cobertura de 2001 a 2012.....	153
Cuadro 6.11 Uso de suelo y vegetación 2012 en ANP.....	153
Cuadro 6.12 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012.....	154
Cuadro 6.13 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura.....	154
Cuadro 6.14 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en RBC.....	155
Cuadro 6.15 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en RBC.....	155
Cuadro 6.16 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en ZSCE Balam Kú.....	156
Cuadro 6.17 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en ZSCE Balam Kú.....	157
Cuadro 6.18 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en ZSCE Balam Kin.....	157
Cuadro 6.19 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en ZSCE Balam Kin.....	157
Cuadro 6.20 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de carreteras.....	163
Cuadro 6.21 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de terracerías.....	164
Cuadro 6.22 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de veredas.....	166
Cuadro 6.23 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de brechas.....	167
Cuadro 6.24 Deforestación 2001-2012 por caminos en área de estudio.....	171
Cuadro 6.25 Deforestación 2001-2012 por caminos en cada ANP.....	171

Índice de Figuras

Capítulo 1	
Figura 1.1 Medición diversidad de especies: diversidad alfa, beta y gamma.....	13
Figura 1.2 Construcción social del ambiente.....	33

Capítulo 2	
Figura 2.1 Elementos del sistema de teledetección.....	39
Figura 2.2 Formas de adquisición de información por el sensor.....	40
Figura 2.3 El espectro electromagnético.....	41
Figura 2.4 La respuesta espectral de la vegetación sana y enferma.....	60
Figura 2.5 Tipos de muestreo.....	64
Capítulo 3	
Figura 3.1 Manejo de bordes de carreteras.....	75
Figura 3.2 Alternativas de manejo de la carretera para mitigar impactos.....	76
Capítulo 4	
Figura 4.1 Usos de suelo de la Reserva de la Biósfera Calakmul.....	100
Capítulo 5	
Figura 5.1 Ortorectificación de SPOT en ENVI.....	105
Figura 5.2 Áreas de entrenamiento 2001.....	106
Figura 5.3 Leyenda áreas de entrenamiento 2001.....	106
Figura 5.4 Áreas de entrenamiento 2010.....	107
Figura 5.5 Leyenda áreas de entrenamiento 2010.....	107
Figura 5.6 RMS Training 2001.....	108
Figura 5.7 RMS Training 2010.....	108
Figura 5.8 Diferencia de resolución espacial entre Landsat y SPOT.....	109
Capítulo 6	
Figura 6.1 Brecha.....	119
Figura 6.2 Vereda.....	120
Figura 6.3 Terracerías.....	120
Figura 6.4 Carreteras.....	120
Figura 6.5 Máxima Verosimilitud 2001-2010.....	125
Figura 6.6 Redes Neuronales 2001-2010.....	125
Figura 6.7 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2001.....	127
Figura 6.8 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/48 2001.....	129
Figura 6.9 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2010.....	130
Figura 6.10 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/48 2010.....	132
Figura 6.11 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2001.....	133
Figura 6.12 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/48 2001.....	135
Figura 6.13 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2010.....	136
Figura 6.14 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/48 2010.....	138
Figura 6.15 Tipos de vegetación 2001 bajo el criterio Redes Neuronales.....	141
Figura 6.16 Tipos de vegetación 2010 bajo el criterio Redes Neuronales.....	144
Figura 6.17 Tipos de vegetación 2001 con Máxima Verosimilitud.....	148
Figura 6.18 Tipos de vegetación 2010 con Máxima Verosimilitud.....	150
Figura 6.19 Murciélagos saliendo de Balam Kú.....	168
Figura 6.20 Coatí desplazándose por una vereda.....	169
Figura 6.21 Vista desde una vereda de un mono araña desplazándose.....	169

Índice de Mapas

Capítulo 1

Mapa 1.1 Países megadiversos.....	18
Mapa 1.2 Países bioculturalmente más diversos.....	21
Mapa 1.3 Tipos de vegetación potencial de México.....	23
Mapa 1.4 Áreas Protegidas de México.....	31

Capítulo 4

Mapa 4.1 Área de estudio.....	80
Mapa 4.2 Zonificación Áreas Protegidas.....	81

Capítulo 6

Mapa 6.1 Red de caminos en área de estudio.....	123
Mapa 6.2 Cambios de cobertura forestal 2001-2012.....	158
Mapa 6.3 Cambios de cobertura forestal 2001-2012 por ANP.....	159
Mapa 6.4 Red de caminos y su zona de influencia.....	161
Mapa 6.5 Deforestación asociada a caminos.....	172
Mapa 6.6 Uso de suelo y vegetación 2012.....	175

Dedicatoria y agradecimientos

Es muy reconfortante acabar una tesis y llegar al momento de las dedicatorias y agradecimientos, por ello, dedico este trabajo y esfuerzo a las dos personas que más admiro: mis padres. No hay palabras que permitan comunicar mi admiración, agradecimiento y mi cariño hacia ellos; por la formación del ser humano que soy, por cada momento, cada detalle, cada palabra.

Agradezco también a mis hermanos René, Rafa y Lalo, por todos los momentos.

Un agradecimiento y dedicatoria a quien ha estado siempre para apoyarme y acompañarme, quien con su cariño ha encontrado reciprocidad y felicidad mutua, gracias por el apoyo, risas, y por el cariño que tenemos, Rita.

A todos mis amigos de la carrera y de la UNAM en general, con los que pasé risas y buenas prácticas. Alex, David, Mireille, Zurdo, Chava, Karito, Pavel, Marianita, Bertha, Ita, Sandrita, Eve, Yatz, Laudia, Gaby, por ser una gran amiga y por su apoyo en Calakmul; y a todos los demás que saben que los estimo.

A mi asesor, Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez, por darme la oportunidad de ser profesor adjunto, por los conocimientos transmitidos, pero sobre todo, por su amistad. Agradezco a los miembros del sínodo, Dr. Mario Arturo Ortiz, por todo su apoyo, su interés en los temas de la tesis y sobre todo, su amistad; al Dr. Eduardo Peters, por su interés, y por hacerme ver en sus clases la importancia de la conservación; a la Dra. Lety Gómez, por su ayuda y su interés en todo momento; y al Dr. Abraham Navarro, por la minuciosa revisión de la tesis y todos sus consejos.

Al Mtro. Arturo Sánchez Iturbe y al Lic. Francisco Hernández Hernández, aunque ya jubilados, los considero los mejores maestros que tuve durante mi formación.

Agradezco también al Dr. José López García por el aprendizaje que obtuve durante mi servicio social; a la Dra. Clemencia Santos por la oportunidad y confianza que me dio al trabajar con ella; al Mtro. Juan Manuel Nuñez Hernández por su confianza y apoyo siempre que lo necesité; así como a la Dra. Patricia Olivera por su interés en esta tesis.

Al Geog. Gerardo García Contreras y al Dr. Gerardo García Gil por sus comentarios y colaboración al proporcionarme la red de caminos de la zona para completarla.

Agradezco al Centro Geo por apoyarme como becario FORDECYT y por la adquisición de las imágenes SPOT.

A la Facultad de Ciencias y a la Facultad de Ingeniería, que me abrieron las puertas cada vez que lo necesité.

A todos los habitantes de Calakmul que me apoyaron cuando estaba realizando el trabajo de campo. Mis respetos y admiración que con su esfuerzo cotidiano salen adelante, muchos siendo conscientes del valioso patrimonio que tienen a su alrededor.

Finalmente, agradezco a todos aquellos documentalistas de naturaleza, como Fabricio Feduchy, que con sus documentales y trabajos apasionantes fomentan la pasión por estudiar la naturaleza y tener otra mirada de ella.

INTRODUCCIÓN

México es un país considerado megadiverso, es decir, alberga al menos 10 % de la biodiversidad total del planeta Tierra. Esta biodiversidad es originada por diversos factores, entre ellos, la heterogeneidad del relieve, la presencia del límite entre dos regiones biogeográficas, la ubicación de gran parte del territorio en la zona intertropical, la historia geológica que ha provocado procesos alopátricos (mecanismos de especiación a través de aislamientos provocados por presencia de barreras geográficas) y con ello altos porcentajes de endemismos, entre otros factores. Además, el país está conformado por una gran mezcla de grupos indígenas, dándole una gran riqueza cultural, y con ello cumplir con todos los niveles de riqueza de biodiversidad: riqueza en genes, riqueza en especies, riqueza en ecosistemas, riqueza en paisajes y riqueza biocultural.

Para promover la conservación de la biodiversidad se han instaurado Áreas Protegidas, las cuales deben cumplir con una serie de requisitos para llegar a su objetivo. México cuenta con un sistema de Áreas Naturales Protegidas (ANP), dentro de las cuales se encuentra la Reserva de la Biósfera Calakmul (RBC), así como las Zonas Sujetas a Conservación Ecológica (ZSCE) Balam Kú y Balam Kin. La RBC destaca por ser la reserva de bosque tropical protegido más amplia del país, albergando gran cantidad de especies y contribuyendo a brindar servicios ambientales en beneficio del ser humano. Sin embargo, han existido grandes cambios en las Áreas Protegidas, provocados en gran medida por las acciones del ser humano. Entre estas acciones se encuentra la deforestación, que trae consigo cambios en la cobertura forestal de la selva, además de que al abrir caminos para la comunicación, transporte y desarrollo se generan cambios en la integridad del ecosistema. En este proyecto de investigación se pretende estudiar la variable cambio de cobertura forestal de los años 2001-2012 en la RBC, ZSCE Balam Kú, Balam Kin, Laguna Ik y un área al sureste de la RBC no decretada como área protegida, poniendo especial énfasis en la relación existente entre la deforestación y los caminos, la manera de cómo la red de caminos del área de estudio ha provocado cambios en la cobertura forestal debido al mayor acceso que se tiene a ella.

El cambio de cobertura forestal es un fenómeno presente en cualquier lugar, sobre todo si tiene una marcada influencia de las acciones del ser humano. En este sentido, el área de estudio se encuentra influenciada por pequeñas y grandes poblaciones que requieren recursos. Las primeras se encuentran en las cercanías de las áreas protegidas, y requieren recursos como agua, alimentos, espacio, madera, y recreación. Las urbes medianas y grandes, aunque se encuentren a distancia considerable, también ejercen presión sobre las ANP, ya que igualmente requieren los recursos antes mencionados, además de generar impactos por el potencial crecimiento turístico planeado por el gobierno, con el proyecto “Mundo Maya”. Entonces, existen varios factores por los cuales hay cambios de cobertura forestal, estos pueden ser: desmontes con fines agropecuarios, tala clandestina, política forestal no sustentable, pastoreo, plagas, sequías e incendios forestales. Estos cambios en el uso del suelo traen consecuencias en la integridad del paisaje y del ecosistema, además de generar otros problemas, como son: erosión, alteración del clima a nivel local, alteración del régimen de lluvias, escasez de materia prima, deterioro faunístico, efectos socioeconómicos y emigración rural.

Las redes de caminos y transportes permiten el desarrollo económico de las zonas que conectan; sin embargo, también traen efectos en el ecosistema y el paisaje. Estos efectos son pérdida de hábitat y especies, modificación de la red hidrográfica, cambios en el clima a pequeña escala, cambios en la composición florística de las comunidades vegetales, mayor probabilidad de invasión de especies exóticas, efecto de borde, cambio de hábitos de la fauna, mayor incidencia de atropellos de especies, además de que se facilita el acceso a las actividades de tala clandestina y extracción de flora y fauna.

El proceso de alteración forestal en Calakmul es relativamente reciente, aunque en el pasado fue uno de los principales centros urbanos mayas, con el paso del tiempo los procesos de sucesión de la vegetación permitieron absorber los impactos antrópicos y que la selva se regenerara. Posteriormente, no hay evidencia de mayor ocupación de la selva salvo por algunos grupos mayas pequeños. Fue hasta principios de siglo XX que se permitió la concesión de grandes porciones de selva a empresas extranjeras y nacionales para abrir caminos e introducir población, proveniente

principalmente de Veracruz, para que extrajera chicle y madera, en especial del cedro y caoba.

Al desarrollo de la extracción de chicle y madera le vinieron acompañados la apertura de caminos, con esto se favoreció la política de colonización de tierras tropicales del sur y así empezó la etapa formal de colonización y transformación de la selva, y con ello cambios en la cobertura forestal.

En 1989 se decretó la Reserva de la Biósfera Calakmul, aunque en la realidad este espacio es un ejemplo complejo de diferentes intereses sobrepuestos en un mismo espacio y recurso. Los procesos de cambios en la cobertura forestal de Calakmul y Balam Kú y Balam Kin han sido recurrentes desde que se inició la colonización del lugar a principios del siglo XX, hasta su creación como Área Natural Protegida, debido a que en las décadas pasadas se privilegió la política para el cambio de uso de suelo de forestal a agropecuario, por lo que se formalizó la migración de población de otros estados del país, además de que se ha incrementado la incidencia de incendios. Actualmente, existen otros problemas para la biodiversidad y la bioculturalidad debidos a esquemas de saqueo y biopiratería.

La Reserva de la Biósfera Calakmul y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin cuentan con el macizo de selva tropical protegida más amplio del país, y es uno de los más amplios del continente americano. Es uno de los últimos santuarios para especies emblemáticas y de importancia ecológica como el jaguar, el tapir, entre otros.

Calakmul es un espacio donde convergen riqueza biológica, paisajística, cultural e histórica, puesto que ha sido y es escenario y refugio de eventos geomorfológicos que han generado ríos subterráneos y los *cenotes sagrados*; es base del rico patrimonio histórico y cultural de la civilización maya, siendo una de las antiguas principales ciudades. Es uno de los lugares de país más biológicamente diversos, es el hábitat del felino más grande de América, el jaguar, y de numerosas especies que interaccionan entre sí y con el ambiente, teniendo como resultado ecosistemas íntegros. Todos estos elementos dan como resultado paisajes complejos, complementados por la influencia de la acción humana, que genera cambios a diferente escala, provoca disturbios e influye y cambia el paisaje.

El análisis de cambio de cobertura forestal, mediante imágenes satelitales, brinda la oportunidad de conocer la dinámica que ha habido en el lugar en los últimos años (2001-2012). El uso de imágenes constituye un aporte fundamental para el monitoreo de la deforestación y cambio de uso de suelo, con ellas se podrá obtener la pérdida de vegetación por deforestación u otros factores.

Al ser el área de estudio una zona relevante por lo anteriormente mencionado, se considera necesario realizar un estudio como el que se pretende, con el fin de que pueda ser el inicio de una serie de estudios que demuestren el estado de conservación de las áreas protegidas, teniendo a la vegetación y los efectos de los caminos como indicadores de ese estado. Este estudio integra aspectos físicos y sociales, pero lo hace de manera integral, aportando algunas ideas en busca de la consolidación de una geografía ambiental.

La tesis se sustenta en la hipótesis siguiente: la cobertura forestal de la Reserva de la Biósfera Calakmul y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin ha sido afectada por las acciones del ser humano, debido a que cada vez se está generando mayor presión sobre la selva. Entre las razones de ello se encuentra la red de caminos, que genera mayores cambios en la cobertura forestal debido a que hay un mayor acceso a la zona para la deforestación, extracción ilegal de flora y fauna, además de que provoca otros efectos ecológicos como efectos de borde, cambios en los hábitos de especies, mayor presencia de especies exóticas, atropello de individuos de diferentes especies; además de consecuencias socioeconómicas como cambios en las costumbres de los habitantes, inmigración, mayor afluencia de turistas y comercio, mayor tránsito, y en general mayor presión sobre recursos estratégicos de la zona, sobre todo el agua y el espacio.

Con estas bases, el objetivo general de la investigación es determinar los cambios de cobertura forestal 2001-2012 en relación con la red de caminos de la RBC y ZSCE Balam Kú y Balam Kin. Para alcanzar dicho objetivo se cuentan con los siguientes objetivos particulares: enmarcar la problemática de la investigación en un enfoque geográfico y de conservación, puesto que es un tema novedoso; determinar la tasa de deforestación mediante el empleo de técnicas de percepción remota; realizar mapa de cambios de cobertura forestal; identificar algunos efectos ecológicos de la red de

caminos sobre la RBC y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin; utilizar una metodología de procesamiento de imágenes satelitales que sea adecuada para obtener resultados satisfactorios y objetivos.

La tesis se integra por el Capítulo I Biodiversidad, Conservación y Geografía de la Conservación, donde se hace una revisión de la evolución del término biodiversidad, explicando su origen, su distribución desigual por el planeta, las condiciones que hacen de México un país megadiverso, así como una reflexión acerca de la conservación de la biodiversidad desde la geografía. El Capítulo II Percepción Remota, trata acerca de la Percepción Remota como ciencia, de la cual, entre otras cosas, se obtienen investigaciones sobre cambios de cobertura forestal. El Capítulo III Efectos de caminos en Áreas Protegidas, es una revisión acerca de las investigaciones que se han hecho sobre cómo impactan los caminos en las áreas destinadas a conservación, así como sus principales objetivos y propuestas. El Capítulo IV Área de estudio, incluye una caracterización física, económica y social de las áreas protegidas incluidas en este estudio. El Capítulo V Materiales y métodos, menciona los insumos utilizados para la realización de la investigación, así como una descripción de los métodos utilizados. En el Capítulo VI Resultados, se tratan los resultados obtenidos, incluyendo la actualización de la red de caminos, los resultados de las clasificaciones supervisadas, la verificación de resultados, el análisis del cambio de cobertura forestal, así como el análisis asociado a la red de caminos. Para finalizar se encuentran las conclusiones de la investigación, así como algunas recomendaciones.

CAPÍTULO I. BIODIVERSIDAD, CONSERVACIÓN Y GEOGRAFÍA DE LA CONSERVACIÓN.

1.1 Biodiversidad

La biodiversidad evoca numerosas reflexiones y pensamientos en el ser humano, es tema de discusión entre especialistas y gente que no se dedica al tema, además en los medios de comunicación se hace uso constante de esta palabra. Sin embargo, biodiversidad es un término reciente, aunque claro está, la biodiversidad ha existido desde mucho antes de la conciencia humana de crear un término que englobe la vida en la Tierra.

1.1.1 Orígenes

El origen del concepto biodiversidad o diversidad biológica tiene sus raíces en revisiones que se hacían acerca del estado en el que se encontraba el ambiente, es decir surge en un contexto de crisis por el deterioro ambiental debido a las acciones del ser humano y de una incipiente preocupación global de ello (Jeffries, 2006).

De acuerdo con Jeffries (2006), el término diversidad biológica, que surge primero que el de biodiversidad aunque tienen el mismo significado, se acredita a dos documentos publicados en 1980, uno por Lovejoy y el otro por Norse y Mc Manus. Jeffries (2006) afirma que en el documento de Lovejoy se estudiaron dos consecuencias de la explotación forestal: cambios en el clima global y cambios en la diversidad biológica. Esta fue la primera vez que se hacía referencia del término; sin embargo Lovejoy consideró la diversidad biológica simplemente como el número total de especies. Además, aportó algunos estimados de extinción basados en tasas de pérdida forestal, escribió acerca del capital biológico, de la incapacidad del mercado de valorar propiamente los sistemas ecológicos y las funciones que los sistemas realizan y que benefician a los humanos. Es notoria la concepción económica, social y funcional con el que venía acompañado el término diversidad biológica en sus inicios. Por otra parte, Norse y Mc Manus, dos ecólogos que trabajaban en el Consejo de Calidad Ambiental de la Casa Blanca durante el periodo de James Carter (1977-1981), publicaron un capítulo en el *Eleventh Annual Report of the Council on Environmental Quality*, el cual se llamó *Ecology and living resources. Biological Diversity*. En este

capítulo examinan la variedad de la vida en dos niveles: diversidad genética y diversidad ecológica, esta última referida únicamente al número de especies. Además, discuten los beneficios materiales de la diversidad biológica, las bases psicológicas y filosóficas para la preservación, los impactos antrópicos y las estrategias en la política de conservación.

La palabra biodiversidad surge de la contracción de las palabras diversidad biológica, fue acuñada a mediados de la década de los 80's, y es acreditada a Walter Rosen, un investigador del *American Natural Research Council*. En 1986, bajo la dirección de Rosen, se realiza *The National Forum on Biodiversity*, del cual se publica un libro llamado *Biodiversity* en 1988, la primera publicación con tal nombre, y donde se plasman las conclusiones de la conferencia de manera integral, abordando temas no sólo biológicos, si no económicos, sociales y filosóficos (Jeffries, 2006).

Para 1992, la palabra biodiversidad, que apenas había sido escuchada una década antes de la Cumbre de Río, ha ganado audiencia global, llegando a ser la palabra de índole ambiental que más familiaridad ha ganado en un corto lapso. Se popularizó rápidamente, gracias en parte a que se combinaban aspectos de ciencias biológicas, económicas y políticas (Jeffries, 2006).

En 1997 fue publicado otro documento que sería la continuación de *Biodiversity*, el *Biodiversity II* de Reaka-Kudla, *et al*; sin embargo existieron muchas diferencias entre ambas publicaciones. *Biodiversity* mostraba temas más allá de la biología, mostraba la biodiversidad como un sistema modificado por el ser humano, que respondía a lógicas económicas y sociales. Por su parte, *Biodiversity II* mostraba grandes aportes a la ecología e inventarios pero carecía de nociones sociales y económicas (Jeffries, 2006).

El concepto biodiversidad surge integrando concepciones biológicas y ecológicas con concepciones sociales, económicas y filosóficas, son evidentes en mucha literatura temprana, no así en la contemporánea, donde se ha perdido esta noción integradora. Anteriormente, la unión entre temas políticos-económicos con biológicos era más importante (Jeffries, 2006). Un todavía pequeño sector de profesionales de la geografía busca retomar la biodiversidad desde un contexto social,

teniendo como especialista de esta interacción no sólo biólogos y ecólogos, sino también al geógrafo.

1.1.2 Definición.

La biodiversidad o diversidad biológica es un concepto muy amplio pero que puede ser definida de manera simple, se refiere a la variedad de la vida. Sin embargo, catalogar así a la biodiversidad resulta incompleto e insuficiente, puesto que es una definición que no refiere a toda su complejidad. Bateson (citado en Primack, 2001) habla acerca de esta complejidad y de la dificultad de encasillarla en alguna categoría para su análisis, dice que *“la complejidad inherente a la naturaleza se contrapone a las simples categorías o matrices de referencia especializadas en que científicos y técnicos intentan situarla”*. Para empezar a entender lo que es biodiversidad se requiere un análisis de sus partes.

La definición de diversidad biológica dada por la World Wildlife Found 1989 es *“la riqueza de la vida en la Tierra, los millones de plantas, animales y microorganismos, los genes que contienen, los complejos ecosistemas que construyen el ambiente en el que vivimos”* (Primack, 2008). Entonces, tenemos que la biodiversidad son todos los millones de seres vivos, desde microorganismos hasta las plantas y animales, incluido el ser humano. Esta definición no sólo se refiere a las especies, sino también a los genes que se encuentran dentro de cada especie, y los ecosistemas que conforman al interactuar unas especies con otras y con los elementos abióticos del planeta.

Una definición más actual muestra la tendencia de dividir la biodiversidad en niveles. De acuerdo con Toledo (2009), la biodiversidad se manifiesta en tres niveles:

- Genes: es el nivel de riqueza dado por la variación en el interior de las especies o entre individuos.
- Especies: es el nivel de riqueza dado por el número de especies.
- Ecosistemas: es el nivel de riqueza dado por los conjuntos o subconjuntos de especies que interaccionan con el medio abiótico.

Existe coincidencia en la definición que Primack (2000, citado en Primack, 2001) da para diversidad biológica. Afirma que la biodiversidad necesita ser considerada en

los tres niveles: genes, especies y ecosistemas. El nivel especies incluye a toda la gama de organismos sobre la Tierra, desde bacterias y protistas hasta los multicelulares reinos de plantas, animales y hongos. En una escala más fina, la diversidad biológica incluye variación genética dentro de las especies, incluyendo poblaciones geográficamente separadas y entre los individuos dentro de una misma población. La diversidad biológica también incluye variaciones en las comunidades en las que las especies viven, en los ecosistemas en los cuales las comunidades existen y las interacciones entre esos niveles. Todos los niveles de diversidad biológica son necesarios para la permanencia de especies y comunidades, y todos son necesarios para la humanidad.

En una publicación elaborada por Challenger (1998), se define la biodiversidad como el total de la variación y de la variabilidad de todos los organismos vivos y de las comunidades bióticas que integran los ambientes terrestres y acuáticos del mundo. También divide la biodiversidad en tres niveles: variación genética intraespecífica, variedad de especies dentro de los ecosistemas y variedad de ecosistemas en la biósfera.

En otra publicación, Toledo (2009) afirma que en su versión más amplia, la biodiversidad tiene cuatro acepciones: los ya mencionados genes, especies y ecosistemas, y agrega un nivel superior, la variedad de paisajes. Además, dice que se deben incluir en el análisis los procesos funcionales e historia de cada uno de los niveles.

Desde igual manera, Noss (1990, citado en Primack, 2001) sostiene que la enorme y compleja diversidad biológica puede ser descrita y analizada dentro de un sistema jerárquico de niveles de organización biológica, que va desde genes hasta paisajes, dentro de los cuales se distinguen tres atributos: composición, estructura y función. La composición se refiere a los componentes físicos en diferentes niveles de organización: genes, poblaciones, especies, comunidades, ecosistemas y paisajes. La estructura se refiere a la disposición u ordenamiento físico de componentes en cada nivel de organización. La función se refiere a la variedad de procesos e interacciones que ocurren entre los componentes biológicos. Cuando se extingue un componente en

cualquiera de los niveles de organización biológica no sólo se pierde el componente en sí, sino también sus relaciones estructurales y sus interacciones funcionales con los demás componentes del sistema biológico, y con ello las funciones del ecosistema. En el Cuadro 1.1 se comparan algunas definiciones de biodiversidad.

BIODIVERSIDAD					
Autor	WWF 1989	Noss 1990	Challenger 1998	Primack 2000	Toledo 2009
Definición	La riqueza de la vida, millones de plantas, animales y microorganismos, los genes que contienen y los ecosistemas que forman	Sistema jerárquico de niveles de organización biológica, que va desde genes hasta paisajes.	Total de variación de variabilidad de los organismos vivos y comunidades bióticas que integran ambientes terrestres y acuáticos.	Variedad de organismos sobre la Tierra, incluyendo su variación genética y las comunidades y ecosistemas que forman.	La variedad de la vida en genes, especies, ecosistemas y paisajes.
Niveles	Implícitamente 3 niveles: genes, especies, ecosistemas	Explícitamente 4 niveles: genes, especies, ecosistemas y paisajes.	Explícitamente 3 niveles: variación genética, especies y ecosistemas.	Explícitamente 3 niveles: genes, especies y ecosistemas.	Explícitamente 4 niveles: genes, especies, ecosistemas y paisajes.
Detalle	Definición creada antes de las Cumbres de la Tierra, donde el término tuvo gran expansión.	De cada nivel se distinguen 3 atributos: composición, estructura, función.	Cada nivel de biodiversidad enriquece al siguiente nivel superior. Importancia al conocimiento indígena.	Todos los niveles de diversidad biológica son necesarios para la permanencia de especies y comunidades, y todos son necesarios para la humanidad.	Análisis de procesos funcionales e historia de cada uno de los niveles. Importancia de la bioculturalidad.

Cuadro 1.1 Definiciones de Biodiversidad. Fuente: elaborado sobre la base de los autores citados anteriormente

Acerca del primer nivel de biodiversidad, la diversidad genética, Toledo (2009) explica que es la variación en la composición de ADN en un mismo tipo de gen y se produce cuando los cromosomas no son duplicados con absoluta precisión (mutación), o a partir de la combinación de genes que provienen de diferentes individuos durante

la reproducción sexual. La diversidad genética es la cantidad total de información y variación que existe dentro de cada especie (Challenger, 1998), le permite afrontar a las especies cambios ambientales, la competencia de otras especies y los depredadores y patógenos del entorno (Solbrig, citado en Sarukhán y Dirzo, 1992).

La diversidad de especies se refiere a la variedad de los organismos vivos del planeta. Algunas estimaciones sitúan el número de especies entre cinco y cincuenta millones, a pesar de que el número de especies descritas es sólo de alrededor de un millón y medio (Challenger, 1998). Como menciona este último autor, es común caer en la confusión de creer que la biodiversidad sólo se refiere al número de especies, al hacer esto se está ignorando la diversidad genética y diversidad de ecosistemas, de igual importancia que las especies para evaluar la diversidad biológica. Siguiendo esta idea, el nivel al que más usualmente alude la biodiversidad es al de especies vegetales, animales y microorganismos que pueblan nuestro planeta, sin embargo es más que eso (CONABIO, 2006), no es posible definir la biodiversidad de un lugar con una cuantificación del número de especies, porque aunque es la manera más directa de saber que tan diverso es un lugar, se deja de lado a los niveles inferior y superior de diversidad (Toledo, 2009). La diversidad genética y biológica se manifiesta como especializaciones de forma, función y conducta que permiten a cada especie explotar su particular nicho ecológico (Challenger, 1998).

En cuanto a la diversidad de ecosistemas, primeramente hay que tener claro que es un ecosistema. De acuerdo con Tansley (1935, citado en Primack, 2001), el ecosistema es una unidad integral a las comunidades bióticas y su ambiente físico, es la entidad fundamental de la organización de la biósfera, condición para la existencia y mantenimiento de procesos biológicos. Ecosistema es el conjunto de elementos bióticos y abióticos que se encuentran en un espacio en el cual interactúan, intercambian energía entre sí y fuera del ecosistema, por lo que son sistemas abiertos. El nivel ecosistema es más rico mientras más número de especies y comunidades existan, teniendo como límite un cierto número de especies que son las que soporta el ecosistema, y que están en constante dinámica. El clásico paradigma del “equilibrio de la naturaleza” que suponía que la composición de especies y estructura de los ecosistemas se mantienen indefinidamente ha sido reemplazado por el de “flujo de la

naturaleza”, donde los regímenes de perturbaciones pueden ser cruciales para la conservación de la biodiversidad, es decir las perturbaciones son algo natural y benefician a ciertas especies en detrimento de otras. Sin embargo, las perturbaciones humanas superan ampliamente los regímenes de perturbaciones naturales (Primack, 2001). Todos los ecosistemas son el resultado único de los caminos evolutivos de millones de años de vida; su historia completa está escrita en los genes de su flora y su fauna y en las formas en que cada una interactúa (CONABIO, 2006). De acuerdo con Challenger (1998), la diversidad de ecosistemas abarca, además de por supuesto los ecosistemas, a los hábitats, nichos, paisajes ecológicos y biomas, junto con los procesos ecológicos que los sustentan.

La medición de la biodiversidad es algo compleja puesto que la biodiversidad es muy amplia, son millones de especies y variación genética dentro de los individuos los que componen tan sólo los primeros dos niveles de biodiversidad, además la riqueza de especies es un parámetro usado para estudiar comunidades. Aunque hay organismos poco evidentes como bacterias e insectos, podemos darnos una idea de la diversidad de algún sitio mediante la medición de especies (Toledo, 2009), para lo cual se han elaborado tres categorías: diversidad alfa, diversidad beta y diversidad gamma (véase figura 1.1).

La diversidad alfa refleja las relaciones ecológicas que se encuentran en un espacio puntual, es fácil de entender este concepto, es el número de especies presentes en un lugar (Halffter y Moreno, 2005). Esta definición puede parecer sencilla, pero es confusa debido a la dificultad de delimitar un lugar, ¿qué tan grande o qué tan pequeño es un lugar? Halffter y Moreno (2005) proponen considerar punto o lugar a la extensión mínima en términos de espacio y tiempo que contiene una muestra del conjunto de una comunidad o ensamble funcional. Toledo (2009) agrega que se puede realizar en comparación con un área similar pero con diferente ubicación. Por ejemplo, las selvas tropicales del sur de México en comparación con las del Amazonas. De esta manera se sabe qué tan rico es un ecosistema. La diversidad beta se refiere al número de especies que existen en hábitats contiguos, por lo que nos informa sobre la heterogeneidad de hábitats. Mientras menos especies compartan ecosistemas colindantes, más distintos serán entre sí, y más diversa resultará la región

en su conjunto (Toledo, 2009). Mide las diferencias entre las especies de dos puntos, dos tipos de comunidades o dos paisajes, de acuerdo con Halffter y Moreno, 2005, estas diferencias pueden ocurrir espacial y temporalmente. De manera espacial se refiere a las mediciones que se hacen en sitios distintos en un mismo tiempo. La manera temporal se refiere a las mediciones realizadas en un mismo lugar pero en diferente tiempo. De acuerdo con Cornell y Lawton (1992, citado en Halffter y Moreno, 2005), la diversidad beta es el enlace entre las diversidades local y regional. La diversidad gamma es el número de especies dentro de un conjunto de ecosistemas o un paisaje, es decir a una escala mayor que la diversidad alfa. Es consecuencia de los procesos histórico-geográficos que actúan a nivel de meso escala, condiciona y a su vez es influida por las diversidades alfa y beta, a este nivel es donde las acciones humanas que llevan a la fragmentación de comunidades tienen efectos más importantes (Halffter y Moreno, 2005). Para Forman y Godron, 1986 (citado en Halffter y Moreno, 2005), el paisaje es un área terrestre heterogénea conformada por un conjunto de ecosistemas interactuantes. El paisaje debe tener ciertas condiciones ambientales similares, como son una historia geomorfológica y evolutiva común.

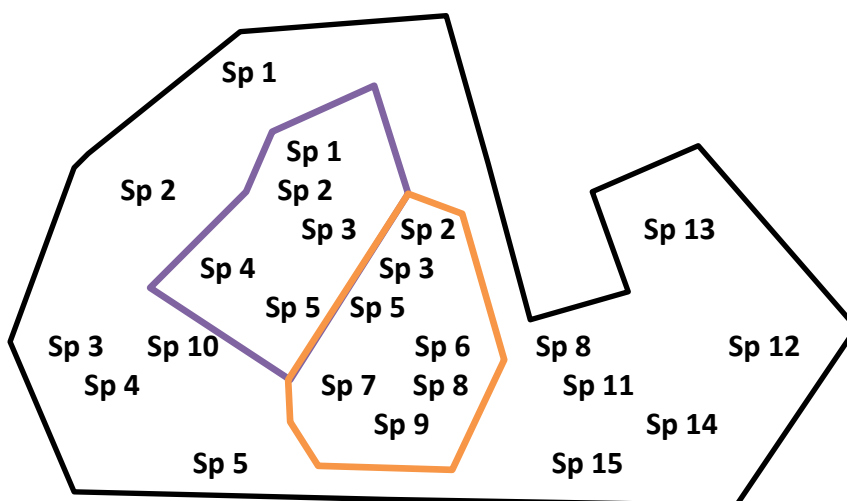


Figura 1.1 Medición diversidad de especies: diversidad alfa, beta y gamma. Elaboración propia a partir de Toledo (2009).

En las figuras de color se observa la diversidad alfa presente en dos comunidades del paisaje completo (figura en negro). La figura morada presenta una diversidad alfa de cinco especies, mientras que la figura naranja presenta siete especies, es decir la segunda figura tiene mayor diversidad alfa. Comparando ambas comunidades se

aprecia la diversidad beta, las especies compartidas son sólo tres (sp 2, sp 3, sp 5) por lo que las otras especies no se encuentran en la comunidad contigua, lo que incrementa la diversidad del paisaje. La diversidad total del paisaje, llamada diversidad gamma, es de 15 especies.

Sarukhán y Dirzo (1992) definen la biodiversidad como la variabilidad genética dentro de cada especie o el número de especies distintas en una región o el número de ecosistemas presentes en una región, es decir, tiene una similar concepción de la biodiversidad acerca de los tres niveles antes comentados, o como él lo define, la concepción purista de biodiversidad. Sin embargo, realiza una muy importante adición, considera que otro nivel de biodiversidad es la riqueza cultural, y es que está muy cercanamente relacionada con la biodiversidad. Considera que la cultura del ser humano ha sido resultado de su interacción con el ambiente. Toledo y Boege (2009; citado en Toledo, 2009) reafirma esto al mencionar que las relaciones entre la variedad de la vida y los seres humanos se encuentran medidas por la cultura, pues cada sociedad percibe, conoce, utiliza y maneja de manera singular la diversidad biológica embebida en sus territorios.

La diversidad cultural se encuentra estrechamente asociada con las principales concentraciones de biodiversidad existentes. Las sociedades indígenas albergan un repertorio de conocimientos ecológicos vasto, ya que llevan siglos interactuando con la naturaleza, es un conocimiento que se ha pasado generación tras generación hasta nuestros días. Al acabar con la biodiversidad se acaba con la riqueza cultural que contiene todos estos saberes, ambas están ligadas. Es inimaginable concebir los grupos étnicos sin el bosque, la selva, o cualquier ecosistema en el que se han desarrollado, al perder la biodiversidad se pierde cultura, conocimiento, tradiciones, el legado histórico que ha conformado las relaciones del ser humano con la naturaleza.

Los pueblos indígenas que han convivido desde milenios con los distintos tipos de vegetación han “coevolucionado” con ellos, seleccionando ciertos rasgos de plantas o animales y desechando otros, de tal manera que se construye así la “biocultura” de la “gente de los ecosistemas” (Toledo y Boege, 2009; citado en Toledo, 2009).

La bioculturalidad corresponde a las diferentes formas de apropiación y uso que un grupo de seres humanos organizados le da a la biodiversidad, beneficiando a ciertas especies de interés para sus acciones, modificando las características de las especies adaptándolas a las diferentes condiciones en las que se distribuye el ser humano, esto lleva a los procesos de domesticación de diferentes plantas a animales.

Por otra parte, la biodiversidad es un área de investigación científica, incluyendo descripción y medición de la diversidad y explicaciones de cómo fue creada, sus relaciones con el ser humano, desde las formas de manejo de diferentes grupos étnicos hasta los cambios provocados por el ser humano (Jeffries, 2006), existe, de acuerdo con Halffter y Moreno (2005), una Ciencia de la Biodiversidad.

1.1.3 La biodiversidad en México y en el mundo.

El planeta Tierra se formó hace aproximadamente 4 500 millones de años, la vida hace 3 500 millones; sin embargo, para que la vida se haya formado tal como hoy la conocemos tuvieron que pasar millones de años y cambios ambientales para propiciar la evolución de los seres vivos, además de mutaciones para generar nuevas especies. El tiempo y los cambios ambientales han moldeado la vida en el planeta, generando una gran variedad de organismos distribuidos de manera heterogénea. Esta riqueza diferencial ha sido provocada por cambios en el relieve, cambios climáticos, cambios en la distribución de los recursos, cambios en la distribución de tierras y mares, entre otras. La distribución de la biodiversidad sigue en general un patrón sencillo y contundente: la riqueza biológica tiende a incrementarse hacia el ecuador (Toledo, 1988; SCDB, 2001), esto se explica puesto que existe una mayor cantidad de energía disponible para seres vivos en la zona intertropical. Relacionado a este fenómeno, la regla de Rapoport se refiere a la tendencia de las especies tropicales a tener áreas de distribución más pequeñas que las de las zonas templadas (Rapoport, 1975, 1982; Stevens, 1989) (citado en Halffter y Moreno, 2005), esto es debido a que a mayor cantidad de recursos, entonces mayor número de especies y por lo tanto menor el área de distribución de cada especie en comparación con zonas templadas, además de mayor competencia. La diversidad beta es inversamente proporcional al área de

distribución promedio, por lo tanto, la diversidad beta deberá ser mayor en zonas tropicales.

En las comunidades terrestres la riqueza de especies tiende a aumentar con la precipitación, la radiación solar y la disminución de la latitud (Primack, 2001). Al no encontrarse distribuida de manera homogénea, la biodiversidad es mayor en algunos países que en otros, la zona intertropical es la que presenta mayor riqueza, por lo tanto, los países que se encuentren en esta gran franja planetaria son los países más biológicamente diversos.

Sin embargo, también dentro de este grupo de países hay diferencias en los niveles de biodiversidad, ya que existen los llamados países megadiversos, y es que además de estar en la zona tropical existen otros factores que inciden en los niveles de biodiversidad, estos son la historia geológica, la historia de los seres vivos, altitud, corrientes marinas, distribución de tierras y mares. Se considera que un país megadiverso contiene al menos 10 % de las especies conocidas en el mundo y 2 % de las especies endémicas, por lo que unos cuantos países albergan la mayor biodiversidad de todo el planeta. En el Cuadro 1.2 y en el Mapa 1.1 se enumeran los países megadiversos y se muestra su distribución.

En el Cuadro 1.1 se muestran los veinte países más diversos del planeta utilizando cinco clases. Los insectos, que son la clase más diversa de animales, no están tomados en cuenta, aunque se acepta que los países tropicales albergan la mayor cantidad de insectos.

La asignación de países como megadiversos es relativa, puesto que aún existen numerosas especies que aún no son descubiertas, además de que el grado de investigación de la biodiversidad en cada país es diferente. Existen zonas muy bien estudiadas y otras que no lo están tanto. Para ejemplificar esto utilicemos a Paraguay. El país es atravesado por el Trópico de Capricornio, por lo que, en una de sus mitades, recibe energía solar suficiente para que se desarrollen bosques tropicales y grandes pantanos, sin embargo el grado de estudio de las especies puede que no sea el suficiente para considerar a Paraguay como un país megadiverso, porque aunque las especies pueden estar ahí, no se sabe puesto que no se ha estudiado. Es el mismo

caso de los países centroamericanos. Un país relativamente pequeño en extensión territorial como Costa Rica es reconocido por su gran biodiversidad, sin embargo ¿qué hace que Honduras o Guatemala no sean considerados megadiversos? Simplemente el grado de estudio de biodiversidad que se tenga.

País	Mamíferos	Aves	Reptiles	Anfibios	Plantas con flor	Total
Brasil	394	1 635	468	502	55 000	57 999
Colombia	359	1 695	584	585	50 000	53 223
China	394	1 244	340	263	30 000	32 241
Indonesia	436	1 531	511	270	27 500	30 248
México	450	1 026	687	285	25 000	27 448
Sudáfrica	247	790	299	95	23 000	24 431
Venezuela	305	1 296	259	199	20 000	22 059
Ecuador	302	1 599	374	402	18 250	20 927
Perú	344	1 678	298	315	17 121	19 756
Bolivia	316	1 274	208	112	16 500	18 410
EUA	428	768	280	233	16 302	18 011
India	316	1 219	389	197	15 000	17 121
Australia	252	751	748	205	15 000	16 956
Malasia	286	736	268	158	15 000	16 448
RD Congo	415	1 096	304	208	11 000	13 023
Costa Rica	205	850	214	162	11 000	12 431
Papúa Nueva Guinea	214	708	280	197	10 000	11 399
Madagascar	105	253	252	144	9 000	9 754
Filipinas	153	556	190	63	8 000	8 962
Kenia	359	1 068	187	88	6 000	7 702

Cuadro 1.2 Países megadiversos y número de especies. Modificado a partir de Durand y Neyra, en Toledo (2009).

En adición con la disponibilidad de energía en la zona intertropical, un país puede contener numerosas especies endémicas debido a la historia geológica y su relación con la biota del lugar. Por ejemplo, Australia, todo un continente separado hace aproximadamente 65 millones de años de la masa denominada Gondwana, conformada por América del Sur, la Antártida, África, India y la propia Australia, es considerado un país megadiverso porque cuenta con algunos bosques tropicales, aunque en su mayoría es un territorio desértico, pero también porque ése aislamiento producido generó que las especies tuvieran una peculiar historia evolutiva, proliferando los marsupiales y no otros mamíferos.

Mapa 1.1 Países megadiversos

La biodiversidad marina, presente en cuerpos de agua interiores, arrecifes de coral, zonas costeras y el océano abierto presenta marcadas diferencias en diversidad, también generadas por la cantidad de energía solar recibida. Los arrecifes de coral son los ecosistemas más ricos de los cuerpos de agua, son el equivalente marino de los bosques tropicales terrestres. En el océano abierto también se presentan diferencias en los niveles de diversidad, la mayor riqueza se encuentra en donde convergen aguas que albergan diferentes comunidades biológicas (Primack, 2001).

Existen algunos factores que permiten la abundancia de ciertas especies en zonas extra tropicales. Un factor son las corrientes marinas, que influyen en la abundancia de nutrientes para la producción primaria de la red trófica, lo que permite la presencia de otras especies que a su vez atraen la presencia de otras que las consumirán. Sin embargo, ciertas especies tienden a migrar durante una etapa del año hacia refugios tropicales con condiciones más favorables para su desarrollo. Entonces podemos observar que la biodiversidad, aunque distribuida heterogéneamente, es dinámica.

La forma de medir las diferentes relaciones de apropiación y uso entre el ser humano, a través de la gran variedad de grupos étnicos, y la biodiversidad, están medidos por la biocultura. A través de las diferentes costumbres de grupos humanos se genera la biocultura, formando así su legado, su identidad y su cosmovisión. El principal elemento con el cual podemos distinguir la diversidad cultural de un país se obtiene al contabilizar la variedad de las lenguas habladas por determinados conjuntos sociales. Tomando como referencia el criterio lingüístico, toda la población humana pertenece a unas seis mil culturas (Toledo, 2009).

Al observar el Mapa 1.2, podemos constatar que existe relación entre las mayores concentraciones de biodiversidad y los grupos étnicos, es decir que los países denominados megadiversos son también los países que albergan grupos étnicos con diferentes formas de asimilar la naturaleza. Utilizando los criterios de diversidad de lenguas y riqueza de especies y endemismos se puede obtener cuáles son los países que cuentan con este patrimonio biológico y cultural, a estos países se le llaman países

bioculturalmente más diversos. En el Cuadro 1.3 se puede observar la lista con esos países.

Países bioculturalmente más diversos	Número de lenguas	Nivel Biodiversidad
Indonesia	742	2
Australia	273	4
India	428	10
México	298	5
Brasil	235	1
RD Congo	215	15*
Papúa Nueva Guinea	830	17*
Filipinas	175	9
China	236	8
Colombia	101	3

Cuadro 1.3 Países bioculturalmente más diversos. Modificado a partir de Toledo y Boege (2009). Los datos de número de lenguas obtenidos *Ethnologue* (www.ethnologue.org). Los datos de nivel de biodiversidad toman en cuenta riqueza y endemismo usando las clases mamíferos, aves, reptiles, peces de agua dulce, mariposas, escarabajos y fanerógamas (Mittermier y Goettsch-Mittermier, 1887), tomados de Toledo y Boege (2009; citado en Toledo, 2009).

*Tomados del Cuadro 1.1

La bioculturalidad es adquirida a través del conocimiento empírico llevado a cabo desde hace milenios, teniendo cada grupo humano diferentes formas de relacionarse, diferentes respuestas ante los fenómenos y diferentes visiones del mundo, es decir de la naturaleza, transmitidos generación tras generación. Una de las formas de apropiación y uso con mayor relevancia para la historia humana y del manejo de la biodiversidad empezó hace unos diez mil años, en diferentes regiones del planeta, con el inicio de la “revolución neolítica”, que se caracterizó por la domesticación masiva de especies de plantas para la agricultura y animales, lo que permitió el paso al sedentarismo (Toledo, 2009). El ser humano escoge las plantas y animales que mejor se adaptan a sus necesidades y las favorece, lo que ha provocado cambios a nivel genético, generando diferentes razas geográficas. Ejemplo de ello es el maíz, que actualmente tiene alrededor de 250 razas, 39 de las cuales se distribuyen en México (país considerado como el centro de diversificación de maíz más importante del mundo), que son resultado de los procesos de adaptación que el ser humano provocó para su consumo (Toledo, 2009).

Mapa 1.2 Países bioculturalmente más diversos

México es un país diverso y complejo. Lo es en la forma, ubicación y topografía de su territorio, sus ecosistemas y diversidad biológica, su historia y sus culturas (CONABIO, 2006). Es atravesado por cadenas montañosas que van de este a oeste y de norte a sur. También cuenta con planicies y depresiones, entre otras formaciones que son testigo de los eventos geológicos y geomorfológicos que han configurado los paisajes mexicanos. La diversidad de climas también ha resultado en una configuración especial de los paisajes, a la vez que los eventos geológicos influyen en la presencia de algún clima en específico. Estos dos elementos han provocado que se generen distintos tipos de suelo en el país. La vegetación es influenciada por todos estos elementos, por lo que si tomamos en cuenta la diversidad de climas y la topografía, entonces resulta que existen en el país prácticamente todos los tipos de vegetación del mundo (véase Mapa 1.3). Ante esta gran riqueza, los retos son también mayores, además de que la heterogeneidad geográfica y las propiedades de nuestros recursos naturales imponen tener formas de manejo complejas (CONABIO, 2006).

La diversidad conjunta de especies de México representa aproximadamente 12% del total mundial, dicho de otra manera 12 de cada 100 especies se encuentran en México (CONABIO, 2006). El país está reconocido por su megadiversidad; sin embargo, se sabe que la diversidad puntual (alfa) es moderada, sabiendo esto, ¿entonces por qué México es considerado un país megadiverso? La respuesta está en la diversidad beta, es decir la presencia de diferentes especies en diferentes comunidades y ecosistemas, que son heterogéneos y permiten la presencia de diferentes especies.

Además de la heterogeneidad paisajística, otro generador de la megadiversidad en México es que en el territorio se encuentran dos regiones biogeográficas: la neártica y la neotropical, por lo que las biotas de ambas regiones se mezclan generando en buena medida la biodiversidad del país.

En México abundan ciertos taxa: la diversidad de reptiles es la mayor del mundo, el segundo en mamíferos terrestres, cuarto en anfibios y posiblemente el cuarto en plantas vasculares (Challenger, 1998).

Mapa 1.3 Tipos de vegetación potencial de México.

De acuerdo con la World Wildlife Found (WWF), México es el país con mayor diversidad ecológica de América Latina y el Caribe, esto debido a que existen una gran cantidad de ambientes en los que se presentan ecosistemas variados, aunque algunos tipos de vegetación tengan una distribución restringida. Además, México se caracteriza por tener una gran cantidad de especies que se distribuyen exclusivamente dentro de los límites territoriales (Toledo, 2009), es decir son endémicas. Las razones de ello son la historia geológica que ha provocado aislamientos geográficos de especies, y de igual manera, la unión de dos regiones biogeográficas provoca altos índices de endemismo. Para visualizar esto, se puede tomar como ejemplo a los mamíferos del país: la riqueza de especies de mamíferos en los diferentes estados de la República es muy heterogénea, es decir comparten pocas especies. Por lo tanto la diversidad beta en México es alta (Toledo, 2009).

México no sólo cuenta con riqueza en especies, ecosistemas y paisajes. Aunque es menos conocida, con lo que se sabe se puede afirmar que se cuenta con una elevada riqueza genética. Esta afirmación se realiza con base en dos argumentos. El primero es muy simple: si se tiene una elevada riqueza de ecosistemas y de especies, es en parte porque se tiene una amplia base genética que permite a las especies adaptarse a los nichos que ofrecen los ecosistemas. El segundo argumento consiste en utilizar las especies domesticadas como indicadoras del potencial genético de las especies mexicanas (Toledo, 2009).

Aunque la variabilidad genética de especies silvestres es poco conocida, se sabe que México ha aportado al mundo más de 118 especies de plantas domesticadas para ser usadas como alimento, textiles, colorantes, ornamentos y más (Toledo, 2009).

México fue escenario hace unos 9600 años aproximadamente, de importantes procesos de domesticación. En cuanto a animales sólo el guajolote, el perro xoloscuintle y tal vez las meliponas. En cuanto a plantas, la domesticación fue mucho mayor: aguacate, amaranto, calabaza, chiles, tomate, cacao, chíá, frijol, guaje, vainilla, barbasco, jícama, epazote y otras treinta y cinco especies frutales (Toledo, 2009).

Como ya se ha mencionado anteriormente, la riqueza cultural forma parte de la biodiversidad. México es también lugar de numerosos grupos étnicos que han

interactuado hace milenios con la naturaleza, lo que ha resultado en distintas formas de manejo. Más de 80 % de los ecosistemas en buen estado de conservación, en donde se encuentra gran parte de la biodiversidad, pertenecen a comunidades rurales e indígenas (CONABIO, 2006), la superficie que ocupan estos (24 millones de hectáreas, es decir 12.4 % del territorio) tiene una cubierta de vegetación primaria y secundaria de 18 millones de ha (75 %), el resto son pastizales (11.3 %), tierras de uso agrícola (11.9 %), y cuerpos de agua y zonas urbanas (1.8 %). En los territorios indígenas que se encuentran en las partes altas de las cuencas se capta 21.7 % del agua total del país; la mitad de las selvas húmedas y de los bosques de niebla y la cuarta parte de los bosques templados tienen su distribución allí. Esto demuestra la importancia de esas comunidades y de los territorios que ocupan para la conservación de la biodiversidad y el aporte de servicios ambientales (CONABIO, 2006).

Además de su importancia biológica y ecológica, la biodiversidad mexicana, específicamente de las selvas húmedas, tiene otro atributo importante para la conservación. De acuerdo con Challenger (1998) algunas especies de las selvas mexicanas, al ocupar el límite septentrional de su distribución desarrollan una tolerancia especial a las variaciones del clima a que estén expuestas. El estudio de estas especies podría dar información valiosa para futuros intentos de restauración ecológica y reforestación de sitios donde hubo presencia de selvas húmedas y se ha alterado el clima.

Sin embargo, la biodiversidad se encuentra en peligro debido a las actividades del ser humano. Durante las últimas décadas, numerosas comunidades biológicas que albergan constelaciones de especies, cuya evolución tardó millones de años, han sido rápidamente devastadas por la acción humana (Primack, 2001).

La mitad de los bosques tropicales y templados del mundo ha desaparecido; la mitad de los humedales y un tercio de los manglares tampoco existen ya; 95 % de los grandes peces depredadores se han perdido; tres cuartas partes de las pesquerías del mundo se han agotado o se explotan a su máxima capacidad; se han perdido 20 % de los arrecifes coralinos; y la mayor parte de las tierras agrícolas de las zonas semiáridas está muy deteriorada (CONABIO, 2006). Con base en estas cifras y utilizando la teoría

de la biogeografía de islas de McArthur y Wilson, si la superficie de un hábitat se reduce 90%, al cabo del tiempo se perderán cerca de la mitad de las especies, los grandes depredadores animales que requieren de grandes territorios para cazar y mantener una población reproductiva viable desaparecerán rápidamente, y con ello el comienzo de la degradación del ecosistema (Challenger, 1998).

El impacto humano en la velocidad de extinción de las especies abarca un periodo de varios milenios a partir de la prehistoria, pero con una aceleración de la pérdida durante los últimos 500 años, a tal grado que entre 1600 y 1950 la velocidad de extinción es cien veces mayor a la que sería naturalmente (Reid y Miller, 1989, citado en Challenger, 1998).

La pérdida de comunidades y especies biológicas no sólo es lamentable por el valor intrínseco de cada forma de vida, sino también por sus consecuencias para la supervivencia de las demás especies (Primack, 2001). Se están reemplazando selvas tropicales por pastizales improductivos, praderas y sabanas están siendo sobre pastoreadas, suelos agrícolas altamente productivos son degradados por una tendencia al monocultivo (Solbring, en Sarukhán y Dirzo, 1992). El contexto de las presiones destructivas sobre los ecosistemas son causadas por las poblaciones humanas empobrecidas, sin acceso a tecnología, ni incluidos a la economía de mercado, que intentan satisfacer sus necesidades básicas y que se ven obligadas a usar los recursos que tradicionalmente han utilizado o que tienen un acceso más sencillo, además de por esfuerzos de gobiernos e iniciativa privada para generar ganancias, muchas de ellas para beneficio personal. El contexto sociopolítico en el cual resultan necesarias estas estrategias se funda en gran medida en un sistema económico internacional que sigue explotando a los países en desarrollo.

La actual crisis ambiental es severa pero aún más sombrío es el panorama futuro, ya que la pérdida de biodiversidad estimada para el periodo 1990-2020 es de entre 5 y 25% del total de especies (Reid y Miller 1989, citado en Challenger 1998). Una de las principales estrategias que se han usado para tratar de conservar la biodiversidad es la implementación de Áreas Protegidas; sin embargo, en tanto continuemos confinando las comunidades naturales y las especies que las componen a

áreas cada vez más limitadas y fragmentadas en aras del desarrollo material de nuestras sociedades, estaremos empujando los ecosistemas hasta el límite de su capacidad de sustento autónomo, poniendo en riesgo el futuro de las especies, incluida la nuestra (Challenger, 1998).

Es necesario abordar estas problemáticas desde un punto de vista geográfico. Sin embargo, ¿qué línea de la geografía aborda más adecuadamente estas problemáticas?

1.2 Conservación de la biodiversidad, papel de la geografía en la conservación de la biodiversidad, geografía ambiental y geografía de la conservación.

Dadas las condiciones actuales de degradación del planeta, es necesario tomar acciones que deriven en el cuidado y mantenimiento de la biodiversidad. En este marco surge la conservación de la biodiversidad, una línea de investigación multidisciplinaria que pretende prevenir la degradación del hábitat, restablecer relaciones sustentables entre comunidades humanas y ecosistemas, contribuir a integrar las complejas relaciones entre el medio y la sociedad involucradas en tales prácticas y elaborar una perspectiva general para la protección de la diversidad biológica y cultural a largo plazo, más que la preservación de las especies o comunidades, se trata de posibilitar la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos (Primack, 2001).

Como antecedente de la conservación de la biodiversidad debe decirse que la conservación, como un acto consciente y universal de los seres humanos, es un fenómeno reciente, surgido como reacción a la depredación de los recursos naturales y ambiente, provocado por la expansión del mundo industrial (Toledo, 2009), el modelo económico y las políticas llevadas a cabo por los tomadores de decisiones. Esta conciencia ambiental surge primeramente por razones éticas y estéticas, y no como de protección explícita de las especies y su diversidad genética ni por su importancia ecológica.

Primeramente, es necesario realizar una distinción lexicológica. Está relacionada a los términos conservación y preservación, comúnmente se hace uso de

estos términos sin distinción alguna, incluso entre especialistas; sin embargo, son visiones diferentes en el cuidado y manejo de la naturaleza (Primack, 2001).

- Conservación: biodiversidad bajo una visión de uso sustentable, es decir la biodiversidad es utilizable pero sin comprometer su composición, estructura ni función.
- Preservación: enfatiza el valor intrínseco de la naturaleza más allá de su valor instrumental o de uso para los seres humanos.

La conservación es una disciplina de crisis, puesto que suele estar fundamentada en la toma de decisiones sobre temas de biodiversidad con severas presiones de tiempo, puesto que a veces no es posible realizar investigaciones prolongadas debido a la urgencia de tomar una decisión ante alguna problemática (Primack, 2001). Dentro de la conservación de la biodiversidad pueden participar biólogos, ecólogos, historiadores, antropólogos, sociólogos, geógrafos, entre otros especialistas. Es objetivo de este capítulo definir una postura y argumentar por las que los geógrafos deben estudiar e incidir en la conservación de la biodiversidad.

1.2.1 Conservación de la biodiversidad y el papel de la geografía.

La biodiversidad, desde un punto de vista geográfico debe tener un enfoque conservacionista, entender la biodiversidad como elementos de la naturaleza de los cuales se hará uso pero sin comprometer la realización de los procesos ecosistémicos, no podemos tener una visión de estudio meramente preservativa o de explotación. Sin embargo, hablar de conservación es también hablar de distintos mecanismos. Uno de ellos tiene el objetivo de acrecentar, extender y optimizar la estrategia de creación de Áreas Naturales Protegidas (ANP's) con el objetivo de proteger la biodiversidad mundial, vista como un recurso que debe ser cuidado mundialmente, por lo que deben tener injerencia y apoyo los países desarrollados y organismos internacionales. Para ello fomenta la investigación científica en búsqueda de estrategias prioritarias identificando los países megadiversos, los llamados *hot spots* y las regiones silvestres o vírgenes que aún puedan existir (Toledo, 2009). El término *hot spot*, ideado por el ecólogo inglés N. Myers, se refiere a regiones clave para la conservación, puesto que son lugares donde se encuentran altos niveles de biodiversidad pero cuya distribución

original se ha perdido 88%, son puntos críticos para la conservación (Toledo 2009). La idea de proteger las “últimas regiones vírgenes del mundo” consiste en identificar zonas con bajas densidades de población humana, por lo que el impacto de las acciones del ser humano no debería existir. Estas zonas equivalen a 46% de la superficie terrestre que contiene tan sólo 2.4% de la población humana.

Una visión alterna de la conservación de la biodiversidad sugiere que por muy extendida y significativa que sea una red de ANP' s, éstas estarán permanentemente amenazadas si fuera de sus límites existe una irracionalidad económica de hiperconsumo y gran necesidad de recursos, puesto que las áreas protegidas no son islas de naturaleza aisladas de influencias externas, son sistemas abiertos y perturbables. Esta visión pone en duda si la dimensión y extensión de las ANP' s son refugios verdaderos y duraderos para la biodiversidad y si alcanzan a proteger fenómenos de importancia biológica y ecosistémica, como migraciones de especies, tamaño de territorio necesario para una especie, áreas de dispersión de plantas y servicios ambientales (Toledo, 2009), además los ecosistemas pueden contener recursos clave críticos, a menudo físicos o estructurales, que ocupan sólo un área restringida y que son cruciales para muchas especies. En el caso de la Reserva de la Biósfera Calakmul las aguadas son las únicas fuentes de agua disponible dentro de una superficie considerable, por lo que representa un recurso clave. Para todos los seres vivos la pérdida de un recurso clave puede llevar a la pérdida de la especie. ¿Se puede creer que unas áreas protegidas aisladas o incluso todo un conjunto de áreas que forman un corredor protegerán la biodiversidad de fenómenos catastróficos de escala regional como huracanes, inundaciones, sequías e incendios? Estos fenómenos, según se cree, aumentan su frecuencia debido al cambio climático generado por las actividades del ser humano. En este caso, que es el más realista, se requeriría transformar la política económica de libre mercado, acabar con el hiperconsumo al que aspira la mayor parte de la población que genera una gran presión sobre los recursos naturales, lo que lleva a cambios en la cultura de la sociedad globalizada y a la reivindicación de los saberes tradicionales de grupos étnicos ancestrales.

La conservación de la biodiversidad está en íntima relación con el desarrollo, y así es como debe de estudiarse y como se deben tomar acciones, la biodiversidad no

está aislada de factores sociales, económicos culturales, demográficos y políticos (Primack, 2001), no debe existir la dicotomía entre conservación y desarrollo, puesto que el bienestar humano va de la mano de la conservación de la estructura y funcionamiento de la biodiversidad (Rozzi, 2001, en Primack, 2001). Esto ha llevado a replantear la estrategia de la conservación. Sin embargo, la principal política de conservación en el mundo ha sido el aislamiento de porciones de naturaleza terrestre o marina de toda actividad humana y su conversión en áreas protegidas. Actualmente, México dispone de un sistema nacional de ANP' s con una superficie superior a los diecisiete millones de hectáreas distribuidas en 34 Reservas de la Biósfera, 65 parques nacionales, 26 áreas de protección de flora y fauna, entre otras (véase Mapa 1.4). Incluso si se lograra establecer un número apreciable de Áreas Protegidas será difícil prevenir la extinción de muchas especies, puesto que sus poblaciones reducidas y procesos quedarán confinadas a estos hábitats fragmentados y alterados (Primack, 2001).

A pesar de los esfuerzos en las áreas protegidas, la biodiversidad se encuentra en riesgo. Las ANP son indudablemente necesarias pero no suficientes. Un posible esquema exitoso de conservación desde lo biológico y lo social y económico permitiría tener un enfoque multidisciplinario, permitiendo la participación no sólo de biólogos, sino de geógrafos y otros especialistas. ¿Qué otra disciplina está tan interesada y es capaz de integrar los elementos físicos y sociales que tienen injerencia en el territorio? La respuesta está en la Geografía, más específicamente en la Geografía Ambiental, como una disciplina encargada problemas ambientales y de la conservación de la biodiversidad, sin olvidar la importancia de la biología de la conservación, sino tejer una red que una ésta con la geografía ambiental, en específico con una nueva Geografía de la Conservación. La integración de ambas podría resultar en un enfoque más completo.

Mapa 1.4 Áreas protegidas de México

1.2.2 Geografía Ambiental y Geografía de la Conservación.

El objetivo de estas líneas es hablar de la Geografía Ambiental y aportar el término Geografía de la Conservación. Para empezar es necesario realizar una serie de preguntas clave: ¿existe una geografía no ambiental y no humana?, ¿por qué distinguir a la geografía con un apellido llamado ambiental?, ¿no es un pleonasma? Para tratar de responder esto partamos del argumento de que el espacio, ambiente y paisaje son categorías de estudio socialmente construidas, pero es necesario realizar un particular énfasis en lo ambiental debido a las problemáticas mundiales de deterioro causado por las actividades del ser humano, desigualdad económica y social y las políticas llevadas a cabo (Fernández Christlieb y Klooster, en Bocco *et al*, 2011).

La Geografía Ambiental no es una rama de la Geografía, es una forma de estudiar el espacio, tampoco se quiere decir que la Geografía tenga un nuevo objeto de estudio, simplemente se trata de abrir su visión respecto a algo que siempre ha existido pero que a veces es rebajado a un mero campo de los biólogos: el ambiente (Cabrales, 2011, en Bocco *et al*, 2011). El ambiente debe ser entendido a partir de su construcción social, que de acuerdo con la definición de Reboratti (2000, en Bocco *et al*, 2011) se define como el continuo de elementos naturales, naturales modificados y artificiales que construyen el ámbito concreto que nos rodea, el cual es fuente de recursos y servicios, lugar de habitación, actividad y depósito de recursos (Reboratti, 2011, en Bocco *et al*, 2011) (véase figura 1.2). El estudio del ambiente no puede reducirse a un objeto o rama particular de la geografía (Cabrales, 2011, en Bocco *et al*, 2011), es posible que sea un puente de entendimiento o diálogo entre geógrafos físicos y humanos, y a mayor escala, entre el ser humano y su ambiente (Reboratti, 2011, en Bocco *et al*, 2011), ya que uno de los objetivos principales es conocer el estado del ambiente en su dimensión territorial, y así se demostrará en esta tesis.

De acuerdo con Bucek *et al* (1979, 1981, 1983, citado en Arcia, 1994), el ambiente es un sistema abierto de formación histórica, conformado como producto de las relaciones bilaterales entre sociedad y naturaleza. El ambiente es el sistema de elementos abióticos, bióticos y socioeconómicos con los que el ser humano entra en

contacto, modificándolos y utilizándolos para la satisfacción de sus necesidades y a los que él mismo se adapta.

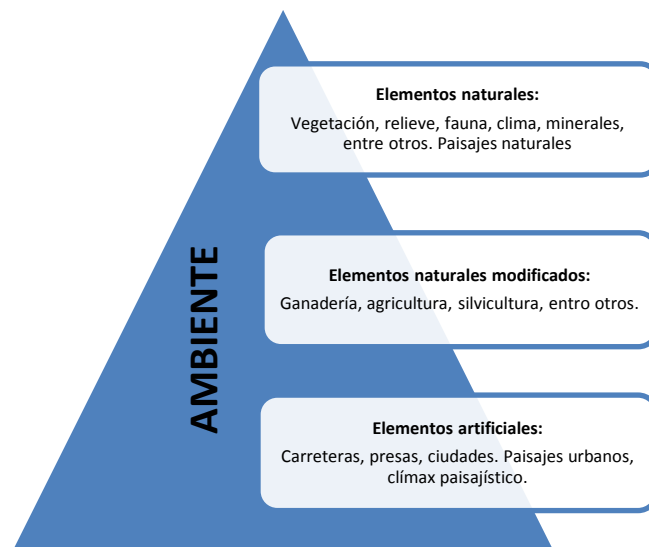


Figura 1.2. *La construcción social del ambiente*. Fuente:Elaboración propia a partir de Reboratti (2011).

Todos los problemas ambientales tienen un origen político y social, como diría el presidente uruguayo José Mujica durante su discurso en la Cumbre Río +20 de 2012, el problema no es ecológico, el problema es político y económico. Esta visión se asocia con la necesidad de superar la compartimentación disciplinaria que impide una apropiada integración entre las esferas del conocimiento y la toma de decisiones (Primack, 2001).

La Geografía debe asumir mayor interés en temas ambientales, ya que en ellos confluyen múltiples factores naturales y sociales, que potencian la búsqueda de soluciones prácticas. El paradigma ambiental, a través de la geografía, puede posicionarse como el puente entre las ciencias naturales y sociales, por lo que es necesario realizar investigación geográfica fuertemente vinculada a los problemas ambientales. La Geografía Ambiental provee un acercamiento para entender las relaciones entre el ambiente y las actividades del ser humano, también es la búsqueda de soluciones de los problemas ambientales que confrontamos (Saxena, 1999). En el entendido de que la biodiversidad es necesaria económica, social y define la cultura, resulta necesario transitar a un término que englobe esta concepción y la importancia

de su conservación, al reconocerse la geografía como una disciplina integradora, entonces es así como dentro de la geografía ambiental se propone el término geografía de la conservación. La conservación de la biodiversidad es uno de los principales objetivos de la geografía ambiental (Saxena, 1999). Con base en lo anterior, una de las principales preocupaciones de la Geografía debe ser la protección del ambiente y la biodiversidad.

Es posible identificar varias líneas de trabajo generales dentro de la Geografía Ambiental, aunque el objetivo de todas es el estudio de los problemas ambientales que tienen un origen social e impactos a la misma sociedad y los otros componentes del ambiente. Una línea de trabajo es analizar las formas de apropiación y explotación de recursos por el ser humano y los efectos sociales que tienen dentro de la sociedad misma. Otra línea de trabajo es el estudio de los efectos que un elemento social tiene sobre la biodiversidad, ya que esto también afecta al ser humano, sus actividades y genera cambios ambientales.

Las relaciones directas y específicas entre los demás seres vivos, sin tomar en cuenta las consecuencias a los humanos, debe dejarse al campo de la biología y ecología, puesto que su disciplina así se los exige y están preparados para ello. Sin embargo, ante los graves cambios ambientales y para atender las necesidades anteriormente explicadas acerca del ambiente como una construcción social es necesario que la Geografía estreche un gran puente con la Ecología, puesto que se puede generar un rico intercambio de conocimientos y en el que el principal beneficio será para la investigación, la conservación de la biodiversidad y dará soporte al concepto desarrollo sustentable y justicia social. Es válido desde cualquier disciplina argumentar la conservación desde el punto de vista estético y ético. Como ejemplo, un tema que encaja con esta visión de geografía ambiental es el propuesto en esta tesis, puesto que se está estudiando un elemento artificial (carreteras) que tiene una lógica económica y social pero que incide sobre el conjunto de elementos naturales (selva) y que está modificándolo, además de que existen otros elementos artificiales y naturales modificados que inciden sobre la selva y dan forma al ambiente socialmente construido. Por otra parte, un trabajo netamente biológico y ecológico sería el estudio del efecto de borde provocado por la fragmentación del paisaje producida por las

carreteras. Los geógrafos podemos nutrirnos de estos conocimientos, así como los ecólogos pueden nutrirse del conocimiento geográfico social. También existe una gran variedad de temas que dan sustento a la Geografía y en específico a la Geografía Ambiental y que no deben dejarse, como son investigaciones geomorfológicas, económicas, agro climatológicas, geopolíticas, entre otras. No se sugiere que se abandonen estas investigaciones, simplemente se sugiere que es necesario ver la Geografía Ambiental como un puente entre lo que tradicionalmente se ha dividido en Geografía Física y Geografía Humana, y que se le de mayor importancia como una forma de estudiar el espacio y tomar acciones al respecto.

Por otro lado, también es válido hacer Geografía Ambiental a través de la investigación de las reacciones sociales generadas por problemas ambientales, puesto que no dejan de estar ligados al ser humano y a la desigualdad económica y social. Los movimientos sociales son generados tras una acción que trajo consigo cambios ambientales que desfavorecieron a algún sector de la sociedad, por lo que estudiarlos genera conocimiento acerca del problema ambiental y a la vez sirve de denuncia.

La geografía como ciencia social debe llevar el rumbo en este trabajo, las grandes preguntas de investigación así como los grandes marcos estratégicos donde articular las respuestas emanan desde la ciencia social (Bocco *et al*, 2011). También debe tener un compromiso social, no se trata solamente de estudiar la relación del ser humano con el ambiente, es necesario que tras realizar las investigaciones imparciales y llegar a resultados se tiene que asumir una postura, no es posible permanecer pasivo ante la degradación del medio y la desigualdad social, es necesario ser crítico del modelo económico, del pensamiento neoliberal, del hiper consumo, y del modo de vida que nos ha llevado a tal situación, o de cualquier otro factor que incida en la desigualdad y degradación ambiental.

El concepto ambiente en geografía no es el primer término que intenta abarcar la complejidad de las relaciones del ser humano con la naturaleza, anteriormente surgieron propuestas de integrar esta relación para su estudio. En la extinta URSS y la RFA se introdujo el término *geosistema*, el cual es definido por Kobrinski y Mijaieva (1971, citado en Saxena, 1999) como la unidad jerárquica de interacción entre la

naturaleza, la economía y la población, los cuales son subsistemas interactuantes y es una forma de manifestación espacial (Arcia, 1994). El geosistema es la unidad espacio-temporal básica donde se producen los complejos mecanismos de interacción del proceso impacto-cambio-consecuencia dentro del sistema ambiente., integrado por los subsistemas naturaleza y sociedad (economía y población) (CAME, 1981, en Arcia, 1994). Geosistema y ambiente son similares, pero no son lo mismo. El geosistema es la unidad básica, es lo que determina el ambiente, entendido como todo un grupo de geosistemas diferentes que resultan en ambientes diferenciados. Los geosistemas dan lugar a diferentes paisajes. El paisaje también trata de integrar la interacción de los elementos bióticos y abióticos con las actividades del ser humano, de manera que el componente social es inherente a los espacios reales, de esta manera se transforma un paisaje biofísico en un paisaje cultural en donde los diversos componentes son indisolubles (Van der Zee y Zonneveld, 2001, citado en Bocco *et al*, 2011). Este tema merecería mayor detalle pero al no ser el tema central de esta tesis se dispondrá solamente de estas ideas generales.

Una gran herramienta para la Geografía es el ordenamiento ecológico del territorio, con el cual se pueden conciliar los objetivos de conservación de la biodiversidad con bienestar social; sin embargo, requiere mayor interés por parte de los geógrafos, otros especialistas y los tomadores de decisiones. El ordenamiento puede ser la base territorial para la toma de decisiones, ya que acota el quehacer de las diferentes actividades productivas y de los asentamientos humanos, zonifica el territorio y determina áreas de manejo productivo, zonas de conservación y protección de bosques y su biodiversidad, así como áreas de restauración (CONABIO, 2006). De acuerdo con Koleff (2011), el ordenamiento territorial es una expresión del conocimiento siconatural de la geografía, que expresa una óptima distribución de las actividades y edificaciones humanas, se convierte en un instrumento que puede disminuir la vulnerabilidad de la sociedad, proteger el bien común, conservar la biodiversidad, y en general gestionar el territorio.

Capítulo II Percepción remota.

2.1 La percepción remota o teledetección.

En este capítulo se mostrará una de las técnicas que permiten el estudio de problemáticas ambientales para tomar acciones que lleven a la conservación, y la cual es la técnica utilizada para este estudio: la percepción remota o teledetección.

2.1.1 Definiciones.

El término percepción remota, proveniente del término inglés *remote sensing*, ideado a principios de los años sesenta, es aplicado para designar cualquier medio de observación a distancia, por lo que fue usado en esos años a la cámara fotográfica y a la fotografía aérea, debido a que era el sensor del momento (Chuvienco, 2008). Sin embargo, con el desarrollo de tecnología espacial se lograron avances en los sensores que captan la radiación electromagnética o que emiten una fuente de energía propia y en las plataformas que traen esos sensores, con ello se abrió un gran campo de investigación y una gran herramienta para realizar investigaciones ambientales, mineras, urbanas, geológicas o de cualquier otra índole que pueda ser captada mediante un sensor.

La percepción remota o teledetección es definida por Chuvienco (2008) como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales, usando la interacción energética entre el sensor y el objeto de estudio, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial emitido por el sensor propio. La teledetección no es solamente los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación. Esta definición es coincidente con la de Seco (2002), que menciona que la teledetección es el proceso de recoger e interpretar información sobre un objeto, sin estar en contacto físico con él, pero que no se limita a captar y almacenar información sobre objetos, puesto que también se incluye el procesamiento e interpretación de la información.

Por su parte, Lira (1995) le da el carácter de ciencia al mencionar que la percepción remota es una moderna ciencia de observación a distancia de un sistema físico, con métodos eficientes de análisis de imágenes, diseño y construcción de

arquitecturas computacionales especiales y fabricación de sensores remotos con alta eficiencia. El mismo autor también afirma que la teledetección ha tenido un acelerado desarrollo en la prospección de recursos naturales.

No es el objetivo de esta tesis entrar en detalle sobre aspectos epistemológicos y de filosofía de la ciencia para averiguar qué es la percepción remota. Para el caso de esta investigación tomaremos a la percepción remota como un conjunto de técnicas que permitirán ayudar en la solución de un problema ambiental desde un enfoque geográfico.

2.1.2 Elementos del sistema de teledetección.

De acuerdo con Chuvieco (2008), un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos (véase figura 2.1):

- Fuente de energía (*a*): la fuente de energía más importante es el Sol, en cuyo caso se habla de sistemas de teledetección pasiva, ya que el sensor es sensible a las regiones del espectro electromagnético. También existen sensores que emiten su propia fuente de energía, en este caso se habla de teledetección activa.
- Cubierta terrestre (*b*): formada por suelo, vegetación, agua, construcciones humanas o cualquier elemento sobre la superficie terrestre que responda al espectro electro magnético, ya sea que la refleje o la emita.
- Sistema sensor (*c*): compuesto por el instrumento sensible a la energía proveniente de la cubierta terrestre y la plataforma que lo alberga. Capta, codifica y graba o envía la información a la que es sensible.
- Sistema recepción-comercialización (*d*): se recibe del sistema sensor la información que se captó. Es probable que se realicen correcciones necesarias debido a errores normales.
- Intérprete (*e*): es el encargado de tratar las imágenes para obtener información temática de interés, con el objetivo de facilitar la evaluación de algún problema de estudio.
- Usuario final (*f*): encargado de analizar el producto de la interpretación, así como de dictaminar las consecuencias que de él se deriven.

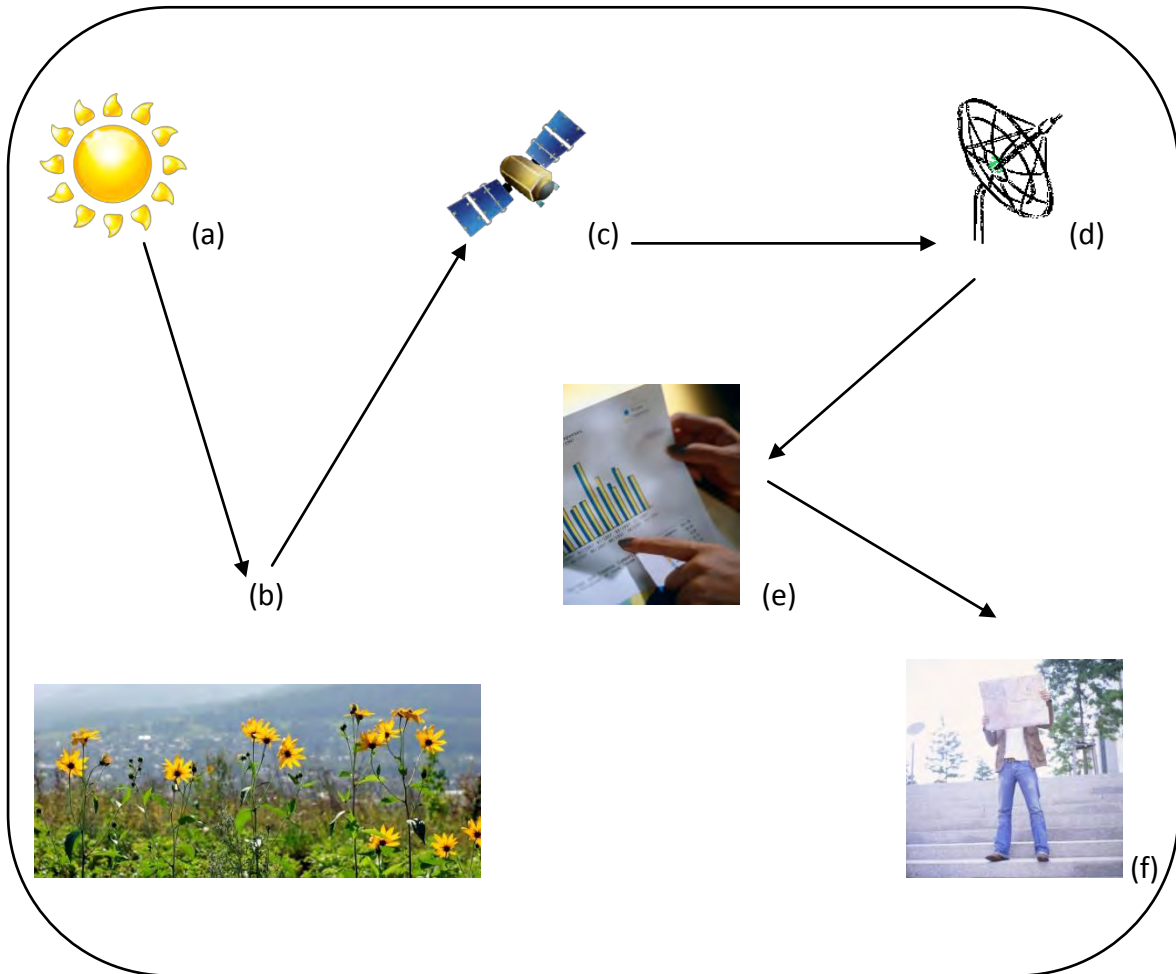


FIGURA 2.1 Elementos del sistema de teledetección espacial. Elaborado sobre la base de (Chuvieco, 2008).

Para que el sensor pueda registrar la información de la cubierta terrestre es necesario que exista una energía con la que la cubierta interactúe para que pueda generar una respuesta, esta energía es la proveniente del Sol. La radiación electromagnética es la base del funcionamiento de todo sistema de teledetección, esto debido a que constituye una forma dinámica de energía que se propaga a través del espacio y que interactúa con los objetos. El comportamiento de la radiación electromagnética tiene un carácter dual, por lo que se explica mediante dos teorías diferentes: ondulatoria y cuántica, la energía se traslada en forma de ondas por el espacio y que la transmisión se realiza por medio de fotones (Seco, 2002). Existen tres formas por las que un sensor adquiere información de los objetos a partir de su respuesta a la radiación, estas son por reflexión, emisión y emisión-reflexión (véase figura 2.2) (Chuvieco, 2008). La reflexión es la forma más importante de teledetección,

pues es originada directamente de la luz solar, el proceso consiste en que cuando la radiación llega a la superficie terrestre, parte de ella es reflejada dependiendo de las propiedades de la superficie. La radiación incidente es devuelta desde la superficie con un ángulo de reflexión igual y opuesto al ángulo de incidencia. La emisión se produce cuando el objeto es capaz de absorber parte de la radiación incidente que le llega, cuando la absorbe completamente se dice que es un cuerpo negro perfecto. Dependiendo de su estructura y temperatura, la radiación incidente es emitida generalmente con una longitud de onda mayor. La reflexión-emisión consiste en ambos fenómenos, en parte refleja la energía y parte la absorbe y posteriormente la emite.



- **Reflexión:** la radiación llega a la superficie terrestre, la cual es reflejada dependiendo de las características de la superficie, esto es captado por el sensor.
- **Emisión:** dependiendo de las características del objeto, la radiación es absorbida para posteriormente ser emitida y captada por el sensor.
- - → **Reflexión-emisión:** parte de la energía es reflejada y parte absorbida y luego emitida

2.1.3 El espectro electromagnético.

Figura 2.2 Adquisición de información por el sensor

La radiación electromagnética se puede representar en una escala continua y ordenada en ondas de diferente longitud y frecuencia, a esto se le llama espectro electromagnético. Abarca el grupo de todas las ondas electromagnéticas, incluyendo desde las largas longitudes de onda de radio, pasando por las microondas, el infrarrojo, la luz visible, ultravioleta, los rayos X y por último, las ondas gamma, las de menor longitud de onda (Mather, 2004). La energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda (definida como distancia entre dos nodos o crestas) y directamente proporcional a la frecuencia (definida como el número de crestas que pasan por un punto dado en un cierto periodo de tiempo) (Seco, 2002; Chuvieco, 2008).

El espectro electromagnético se divide en varias regiones o bandas (véase figura 2.3), que agrupan radiaciones enmarcadas en un cierto rango de valor de longitud de onda (Seco, 2002), aunque la sucesión de valores es continua, se establecen estas bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Chuvieco, 2008). La unidad de medida más común del espectro son los micrómetros para las longitudes de onda más cortas y centímetros o metros para las más largas.

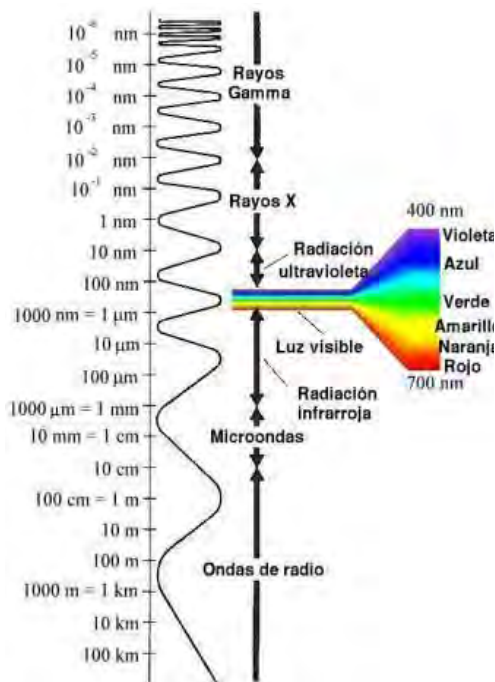


Figura 2.3 El espectro electromagnético

Fuente: http://partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_1

Los rayos gamma, los rayos X y la mayor parte de la radiación ultravioleta no llegan a la superficie ya que son interceptadas por la atmósfera, de no ser así, la vida estaría en riesgo, ya que son las bandas de menor longitud de onda y mayor frecuencia y energía.

Desde el punto de vista de la teledetección, las bandas espectrales que tienen utilidad son (Seco, 2002; Chuvieco, 2008):

- Ultravioleta (UV): sólo útil de las longitudes entre 300 y 400 nanómetros (nm), puesto que ese intervalo puede ser captado por ciertos tipos de película fotográfica.

- Visible: el ojo humano es capaz de captar sólo esta banda, comprende la radiación con longitudes de onda entre 400 y 700 nm. La componen el violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo, aunque también se divide en tres bandas esenciales; azul, verde, rojo.
- Infrarrojo: de acuerdo con su longitud de onda se divide en infrarrojo cercano (700-1 500 nm), medio (1 500-3 000 nm) y lejano (3 000-1 000 000 nm). Es importante por su capacidad de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad. También se divide en infrarrojo reflejado (700-3 000 nm), que es la radiación solar reflejada; y térmico, que es la banda constituida por la radiación emitida desde la superficie terrestre (3 000-14 000 nm).
- Microondas: ondas de longitudes de 0.1-30 cm, el mayor interés está en que son capaces de penetrar nubes, niebla y lluvia.
- Radio: la banda con las mayores longitudes de onda, radares operan en esta banda.

2.1.4 La estructura de la imagen satelital.

Tras captar la radiación proveniente de los objetos de la superficie terrestre, el sensor toma como valor un promedio de la radiación proveniente de un área específica que depende del diseño de cada sensor, a esta área específica se le denomina pixel. El pixel es la unidad básica de la imagen, determina la resolución espacial del sensor y permite discriminar información a detalle en el espacio, puesto que entre más pequeño sea el pixel, mejor resolución tendrá la imagen (Seco, 2002; Chuvieco, 2008).

Como ya se dijo, los objetos pueden reflejar o absorber y luego emitir la radiación, para ello los sensores deben tener detectores que sean sensibles a las diferentes bandas del espectro electromagnético, la anchura de las bandas espectrales medidas en micrómetros o nanómetros es lo que se denomina resolución espectral del sensor. Un sensor multiespectral es capaz de detectar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro, mientras el hiperespectral adicionalmente es capaz distinguir diferentes longitudes de onda de la misma banda (Mather, 2005).

Cuando cada detector capta la radiación, la amplifica y la convierte en una señal eléctrica cuya intensidad dependerá de la radiación recibida. La señal eléctrica es convertida en un valor numérico en una escala generalmente de 8 bits, formada por 256 valores del 0 al 255, aunque también existen sensores de 10 hasta 16 bits, lo que se traduce en hasta 65 536 niveles. Esto determina la resolución radiométrica del sensor, en general, entre mayor sea el número de niveles mayor será el detalle en la información colectada por el sensor porque se permite identificar de mejor manera objetos con niveles similares de reflectividad que no serían separables con otros sensores menos sensibles. La señal eléctrica es grabada en forma de número o dígito, al que se denomina nivel digital, los cuales se almacenan en un arreglo de filas y columnas en una matriz que puede ser convertida en una imagen similar a una fotografía. La resolución temporal se refiere al tiempo que transcurre entre la adquisición sucesiva de datos específico del terreno, es decir se refiere a la periodicidad con la que se adquieren imágenes de una misma porción de la superficie terrestre. La resolución temporal depende de los objetivos de cada sensor, para el caso de los satélites meteorológicos es necesario que aporten información cada cierto periodo corto de tiempo. Los satélites que se utilizan para monitoreo ambiental y de recursos naturales pueden aportar información con un periodo más largo de tiempo (Mather, 2004).

Es posible observar una zona desde distintos ángulos, esto es muy útil en caso de que exista mucha nubosidad, ya que un sensor óptico electrónico utilizado para monitoreo ambiental no es capaz de penetrar las nubes. A esta capacidad del sensor se le denomina resolución angular (Chuvienco, 2008).

2.1.5 El programa Landsat.

A continuación se hará una revisión acerca de los dos principales programas de teledetección espacial utilizados para la observación de los recursos naturales y que son utilizadas en esta tesis: el programa LANDSAT y el programa SPOT.

El programa LANDSAT, iniciado por la agencia espacial norteamericana a fines de la década de los 60's, es el que mayor uso ha tenido globalmente, puso en órbita su primer satélite el 23 de julio de 1972, con un satélite llamado ERTS (Earth Resource

Technology Satellite) que posteriormente comenzó a ser llamado LANDSAT. Fue el primer satélite de uso civil para la observación terrestre (Mather, 2004). Este satélite llevaba instalados dos tipos de sensores para el estudio de la superficie terrestre: un sistema constituido por tres cámaras denominadas RBV (Return Beam Vidicon) y un sensor óptico electrónico de barrido transversal al que se le denominó MSS (Multispectral Scanner). Este sensor opera con una resolución espectral de cuatro bandas, que recibieron una numeración del cuatro al siete (Seco, 2002; Chuvieco, 2008):

- Banda 4: 0.5-0.6 Mm (banda verde)
- Banda 5: 0.6-0.7 Mm (banda roja)
- Banda 6: 0.7-0.8 Mm (banda IR)
- Banda 7: 0.8-1.1 Mm (banda IR)

En cuanto a su resolución espacial, el MSS contaba con una resolución espacial de 80 m, resolución radiométrica de las bandas 4, 5 y 6 era de 7 bits con 128 niveles, y de 6 bits con 64 niveles para la banda 7. La imagen captada por el barrido del sensor cubre un área de 185 x 185 km, que forma una escena completa (Seco, 2002).

En 1975 se lanza el Landsat 2, que contaba con los mismos sensores que su predecesor, sólo con la diferencia de que la resolución radiométrica se mejoraba al pasar de 7 a 8 bits. En 1985, tras ser administrado por distintas entidades del gobierno de EEUU, el gobierno de Ronald Reagan decide privatizar parte del programa Landsat. Para 1992, cuando el uso y demanda de imágenes satelitales se incrementó, se transfirió de nuevo el control del programa al gobierno federal a través del Servicio Geológico de EEUU, la NASA, y la NOAA. Actualmente la empresa encargada de comercializar y distribuir las imágenes Landsat es llamada *Space Imaging*. Para 1978, se lanza al espacio el tercer satélite de esta línea, que contaba con mejoras en la resolución espacial, al pasar de 80 m a 40 m (Seco, 2002; Chuvieco, 2008).

Tras esta primera generación, que se denominó experimental y que consiguió aportar miles de imágenes para estudios de recursos naturales, es lanzado en 1982 el Landsat 4, sin embargo tuvo algunos defectos y salió de operación en 1986. El Landsat 5, lanzado en 1984 funcionó hasta finales del Siglo XX. Para estos satélites se eliminó el

sensor de cuadro RBV, sustituyéndolo por otro barredor óptico electrónico de mayor resolución espectral y mayor resolución espacial que el MSS, el cual se mantuvo. El nuevo scanner, llamado TM (*Thematic Mapper*) opera en siete bandas del espectro, las cuales son (Seco, 2002; NASA, 2012):

- Banda 1: 0.45-0.52 Mm (banda azul)
- Banda 2: 0.52-0.60 Mm (banda verde)
- Banda 3: 0.63-0.69 Mm (banda roja)
- Banda 4: 0.76-0.90 Mm (banda IR cercano)
- Banda 5: 1.55-1.75 Mm (banda IR medio)
- Banda 6: 10.40-12.50 Mm (banda IR térmico)
- Banda 7: 2.08-2.35 Mm (banda IR medio)

Como se aprecia, el TM incorpora la banda azul, con lo cual es posible obtener imágenes de síntesis de color real, además de que sea agrega una banda en el infrarrojo reflejado y otra en el térmico. La resolución espacial del TM es también mayor, teniendo 30 m en todas las bandas, a excepción de la Banda 6 térmica, con una resolución de 120 m. La resolución espectral alcanza los 8 bits, es decir 256 niveles. En cuanto el tamaño de la escena, sigue teniendo una cobertura de 185 x 185 km, las mismas del sensor MSS (Seco, 2002).

Posteriormente, el TM fue sustituido por una versión mejorada al que se le denominó ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*). La mejoría consistió en agregar un canal pancromático (0.5-0.9 Mm) de 15 m de resolución, conservando las restantes siete bandas del TM. El satélite Landsat 6 fue lanzado en 1993, sin embargo quedó destruido al tener un despegue fallido. Para 1999 fue lanzado el Landsat 7, que lleva a bordo el sensor ETM+, con las mismas características del TM a excepción de la ya comentada banda pancromática, además de que se mejora la resolución de la banda térmica que pasa a tener 60 m de resolución espacial (Seco, 2002).

Los satélites Landsat se han erigido como una de las principales opciones para realizar estudios de recursos naturales y monitoreo ambiental gracias a la facilidad con la que se pueden adquirir, ya que desde 2008 se anunció la liberalización de todo el archivo histórico Landsat, de 1972 hasta la fecha. Actualmente se encuentran fuera de

servicio los seis primeros satélites, teniendo sólo al Landsat 7 bajo uso (Chuvieco, 2008; NASA, 2012)

2.1.6 El programa SPOT.

Otro de los programas de mayor importancia comercial es el programa francés SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), desarrollado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia en colaboración con Bélgica y Suecia (Mather, 2004).

El programa SPOT está compuesto por el satélite SPOT 1, lanzado al espacio en 1986 y sacado de órbita en 1993. El siguiente satélite en ser lanzado, el SPOT 2, fue puesto en funcionamiento en 1990 y el SPOT 3 en 1993, estos tres primeros satélites presentan las mismas características. Llevan instalados dos sensores óptico electrónicos denominados HRV 1 y HRV 2 que operan en dos modos (Seco, 2002):

- Multiespectral: constituido por tres bandas con resolución de 20 m.
 - o XS1 (0.50-0.59 Mm)
 - o XS2 (0.61-0.68 Mm)
 - o XS3 (0.79-0.89 Mm)
- Pancromático: constituido por una banda con resolución de 10 m.
 - o Banda de 0.5-0.73 Mm.

Estos sensores poseen la ventaja sobre Landsat de producir imágenes estereocópicas, a través de la sobre posición de imágenes y una mayor cantidad de sensores, lo que ha permitido el uso de SPOT en la producción de mapas topográficos (Seco, 2002).

El siguiente satélite fue el SPOT 4, lanzado en 1998, con mejoras en la resolución espectral al incluir una banda más en el infrarrojo medio que es equivalente a la banda 5 TM de Landsat, además se introduce una banda roja de 0.62-0.68 Mm (Seco, 2002; Chuvieco, 2008; CNES, 2012).

En el año 2002, fue puesto en funcionamiento el SPOT 5, el cual cuenta con un nuevo sensor llamado HRG (*Haute Résolution Géométrique*) que cuenta con cinco bandas: verde (0.5-0.59 Mm), roja (0.61-0.68 Mm), infrarrojo cercano (0.78-0.89 Mm), infrarrojo medio (1.58-1.75 Mm) y pancromático (0.48-0.71 Mm), además de que se

mejora la resolución espacial, al tener 10 m en el modo multiespectral y 5 m O 2.5 m en el pancromático (Seco, 2002; Chuvieco, 2008; CNES, 2012).

Las principales aplicaciones del sistema SPOT han sido en compañía del uso de los SIG para distintos fines, sobre todo para realizar cartografía temática, agricultura y silvicultura, estudios del ambiente en general y para la realización de mapas topográficos (Seco, 2002).

El futuro del programa SPOT está en el programa llamado Pleiades, el cual está destinado a ser su sucesor ofreciendo satélites con mejor resolución espectral y pancromática (Seco, 2002; Chuvieco, 2008; CNES, 2012). El nueve de septiembre de 2012 fue lanzado el SPOT 6, que comparte órbita con el PLEIADES (Satelmac, 2012).

2.2 Uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas.

De acuerdo con Chuvieco (2008) la teledetección desde satélite cuenta con numerosas aplicaciones gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación como la fotografía aérea y los trabajos de campo, aunque también recalca que más que sustituir estas técnicas, las complementa adecuadamente.

Con el tratamiento y la interpretación de las imágenes satelitales es posible disponer de un conjunto de datos sobre el territorio, algunos de ellos accesibles en tiempo real, ayudan a elaborar una interpretación rápida y económica del problema bajo estudio, a la vez que permiten abordar análisis integrados, difícilmente viables con otros métodos (Chuvieco, 2008).

Entre los atributos de la percepción remota considerados por Chuvieco (2008) se encuentran que es una fuente de información homogénea de datos de todo el planeta que permiten contemplar grandes áreas en una sola imagen, mucho mayores que en fotografías aéreas. Las características técnicas de los sensores fotográficos impiden que de ellos se realice una cobertura sistemática de la superficie terrestre, pues están limitados por la cantidad de la película que pueden cargar a bordo.

Una de las ventajas más claras de los equipos de barrido multiespectral en relación con los sensores fotográficos es la mayor resolución multiespectral, ya que las emulsiones fotográficas están limitadas a la radiación visible e infrarrojo reflejado. Esta

ventaja permite la posibilidad de distinguir bandas del espectro electromagnético a las que no son sensibles el ojo humano con las que se pueden realizar composiciones para resaltar información específica del ambiente, algo que no es posible con la fotografía aérea. Por otra parte, las características orbitales de los satélites permiten adquirir imágenes repetitivas de toda la Tierra, idóneas para realizar estudios multitemporales. También se debe considerar que las imágenes satelitales se graban en formato digital, por lo que su disponibilidad es inmediata o casi inmediata porque se transmiten a estaciones terrestres en tiempo real.

En cuanto a la disponibilidad, parece que se presenta otro inconveniente de las fotografías aéreas, ya que en caso de que no existan fotografías del área de estudio o se requieran fotos del momento, es necesario contratar un avión para tomar las fotos, lo que resulta caro y hace necesario verificar disponibilidad del avión, permisos para volar y condiciones meteorológicas óptimas. Por otra parte, el avión debe contar con características especiales, como son tener un hueco en el fuselaje para colocar las cámaras, y deben elevarse a 5 500 m sobre el terreno. En México no existen muchos aviones con estas características (López-García, 2007). En este tema, las imágenes satelitales pueden llevar la delantera, ya que la totalidad de las imágenes Landsat se encuentran libres desde el año 2008, aunque claro está, la resolución de 30 m las imágenes es mucho menor que las de las fotografías. Sin embargo, también cuentan con serios inconvenientes como son errores en el sensor ETM+ que provocan que varias de las imágenes a partir del 2004 salgan bandeadas en la totalidad de la escena, haciendo difícil su utilización, por lo que la disponibilidad de ellas es casi nula a pesar de que se encuentren libres. En cuanto al programa SPOT, el convenio de la Secretaría de Marina con dicho programa se realizó a partir de 2004, por lo que las imágenes anteriores a ese año no entran dentro del convenio, además, este convenio no cubre toda la superficie de la República Mexicana, por lo que hay zonas sin cubrimiento, como se comprobó en la zona de estudio de esta tesis. Fuera de estos inconvenientes, las imágenes satelitales se encuentran a la venta variando el precio dependiendo de la cobertura, y las resoluciones espacial, espectral y radiométrica.

En cuanto a la calidad de la información parecen encontrarse diferencias significativas a favor de las fotografías aéreas. López-García (2007) utilizó fotografías

aéreas e imágenes satelitales en investigaciones relacionadas al cambio de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM); sin embargo, encuentra diferencias en los resultados de ambos procesos. Las fotografías aéreas requieren tiempo y esfuerzo pero se gana precisión y exactitud, mientras que las imágenes satelitales dan resultados rápidos aparentemente, pero son poco confiables, ya que sólo permiten ver cambios en dimensiones relativamente amplias, pero no cambios en disminución de densidad arbórea. Bajo estas bases, este autor expone ampliamente las ventajas de las fotografías aéreas, entre ellos se encuentran la mejor resolución espacial, la posibilidad de realizar estereoscopia, la reducción de los efectos de sombras y orientación de las imágenes.

De acuerdo con López-García (2007), los estudios realizados con imágenes satelitales y clasificación multiespectral puede que sean más rápidos que los realizados con fotografía aérea, pero se pierde objetividad, ya que muchos parámetros afectan la respuesta espectral de los objetos en las imágenes. Por otra parte, también acepta la importancia que estas técnicas tienen para el monitoreo de la deforestación y determinación del uso del suelo, siempre y cuando haya un tratamiento adecuado de las imágenes, se hagan fusiones para mejorar resolución espacial o se visualicen en color real para su interpretación visual. Sin embargo, también afirma que metodologías con base en imágenes satelitales no permiten una distinción adecuada entre diferentes densidades de cobertura forestal, siendo las fotografías aéreas los materiales que más precisión aportan, además de que la cantidad de errores reportados en las fotografías aéreas es menor respecto a los de las imágenes satelitales tras verificación en campo. López-García (2007) concluye que una metodología híbrida es lo más adecuado para obtener resultados objetivos, ya que se pueden explotar los beneficios de ambos insumos y compensar con el otro las deficiencias.

En cuanto a la resolución espacial, López-García (2007) tiene razón al afirmar que las fotografías aéreas ofrecen más ventajas debido a una mejor discriminación de los objetos; sin embargo, actualmente existen sensores que cuentan con resolución espacial de menos de un metro (similar a una fotografía aérea), y se avanza cada vez más para que los sensores tengan una mejor resolución. A pesar de la existencia de

imágenes con gran resolución espacial similar a una fotografía aérea, estas aún no se encuentran libres por lo que es necesario realizar una fuerte inversión para adquirirlas. López-García (2007) utilizó la imagen satelital de manera que mediante un algoritmo visualizó una imagen SPOT 5 en color real para que simulara ser una fotografía aérea, al hacer esto el método que utiliza continúa siendo solamente la comparación visual, con lo que se pierde la posibilidad de extraer información multiespectral, pero está ganando en la fiabilidad de los resultados al no permitir una clasificación automática. Debido a la gran resolución espacial de las fotografías aéreas y la imagen SPOT 5, López-García (2007) no requería realizar clasificaciones multiespectrales, sin las cuales obtenía resultados satisfactorios, esto demuestra que la selección de una metodología adecuada depende de los objetivos y de la escala del trabajo, o bien son técnicas complementarias y que en ambas es requerido el trabajo de campo para validación.

De cualquier manera, no se trata de eliminar métodos, sino de complementarlos y en cualquier caso el trabajo de campo es necesario para validar la información obtenida. La principal limitante no es técnica, puesto que una combinación de ambas la que puede resultar en trabajos adecuados. La principal limitante es de disponibilidad de los insumos, ya que como se muestra es difícil obtener las imágenes satelitales adecuadas por errores en los sensores o el alto costo de ellas. Por otra parte, las fotografías aéreas también resultan en una fuerte inversión en caso de que no existan fotografías disponibles.

2.3 Pre procesamiento de imágenes satelitales.

Antes de realizar procesos para obtener información de la imagen es necesario realizar algunas correcciones que eliminen cualquier anomalía en ella, sea en su localización o en su radiometría, ya que las imágenes no están exentas de errores. A estas operaciones se les llama pre procesamiento de imágenes, y están encaminadas a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea (Chuvienco, 2008).

Las correcciones de la imagen están clasificadas en dos temas:

- Corrección radiométrica: mediante transformaciones de los Niveles Digitales (ND) a reflectancia para obtener valores parecidos a los ideales.
- Corrección geométrica: para ubicarlos en su posición geográfica correcta.

Las fuentes de error en las imágenes se deben a cuestiones relativas a las propias plataformas y sensores, pero también a fuentes naturales como pueden ser la presencia de elementos que componen la atmósfera como aerosoles, gases y vapor de agua que modifican la radiancia original proveniente de la superficie terrestre (Chuvienco, 2008).

Por otra parte, se debe tomar en cuenta que la Tierra no se encuentra estática, tiene un movimiento de rotación que provoca distorsiones, además de que la curvatura del planeta genera variaciones en el tamaño del pixel, sobre todo en sensores con una baja resolución espacial.

La plataforma y el sensor que capta la radiación también son susceptibles a fallas que influyen en la geometría y radiometría. Los sensores exploran la cubierta terrestre mediante varias líneas simultáneas, por lo que se requieren varios detectores, es común que existan errores en la calibración de estos, provocando un efecto de bandeo en la imagen. Además, es probable que los sensores tengan fallos momentáneos o permanentes y que dejen de detectar la señal recibida, lo que provoca la pérdida de una serie de líneas o píxeles en la imagen.

Todos estos problemas durante la adquisición de la imagen hacen necesaria la aplicación de correcciones para poder tener valores de radiancia lo más cercano posible a los verdaderos; sin embargo, hay ocasiones en las que simplemente no es posible lograrlo; por ejemplo, en el caso de que un detector falle y no reconozca la radiación que le llega, no es posible realizar alguna corrección ya que no se puede corregir lo que no se tiene (Chuvienco, 2008)

2.3.1 Correcciones radiométricas.

Las correcciones radiométricas son técnicas que convierten los niveles digitales (ND) originales registrados por el sensor a valores independientes de las condiciones atmosféricas, permitiendo comparar imágenes de diferentes fechas o directamente

pixeles con medidas de campo y de laboratorio (Rodríguez-Galiano *et al*, 2010). Dentro de ellas se incluyen las necesarias para tratar la imagen de un mal funcionamiento del sensor, errores en las magnitudes físicas y corrección atmosférica de los datos (Chuvienco, 2008)

El mal funcionamiento en los detectores del sensor puede provocar que no existan algunas líneas o pixeles, por lo que en una imagen pueden visualizarse líneas anómalas o pixeles aislados muy contrastantes del resto, lo que lleva a que no es posible restaurar aquello. Sin embargo lo que sí es posible es tratar de mejorar el aspecto visual de la imagen estimando los ND de los pixeles perdidos y para ello existen varias formas, una de ellas es el cálculo de los pixeles a partir de los pixeles vecinos, debido a que existe una fuerte probabilidad de continuidad de algún elemento en el espacio. Otro método consiste en promediar los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa y otro mediante la utilización de una banda auxiliar altamente correlacionada con la que presenta problemas. Cada uno de estos métodos consiste en un algoritmo que realiza las operaciones correspondientes a la descripción realizada. Es necesario recalcar que aunque exista una alta probabilidad de continuidad de algún fenómeno en el espacio de manera que es posible que los vecinos cercanos brinden información adecuada, no deja de ser un valor ficticio, ya que no es posible tener la información original de estos casos (Seco, 2002; Chuvienco, 2008).

En cuanto a la corrección atmosférica, se debe decir que la radiancia recibida por el sensor no es la misma que la que sale desde la superficie terrestre debido a que hay que considerar los efectos de la radiancia difusa procedente de otros objetos vecinos, la dispersión atmosférica y la transmisividad ascendente y descendente de la atmósfera (Chuvienco, 2008). Los procedimientos matemáticos para abordar estas correcciones son muy complejos, los más accesibles se basan en modelos físicos de transferencia radiativa, que suelen basarse en una serie de atmósferas estándar. Los más utilizados son los llamados 6S, el MODTRAN4, el ATCOR, el ACORN y el FLAASH (Chuvienco, 2008).

Los procedimientos de corrección varían en cantidad y exactitud de los datos atmosféricos requeridos para la aplicación, a excepción del método de sustracción del objeto oscuro realizado por Chávez (Rodríguez-Galiano *et al*, 2010). Este método se basa en asumir que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción (agua, sombras) deben tener radiancia espectral próxima a cero. Se puede asumir que los valores mínimos del histograma son consecuencia de la dispersión atmosférica, ya que la llamada dispersión Rayleigh afecta a las longitudes de onda más cortas y en los histogramas de una imagen se puede verificar esto al observar que los niveles más bajos se encuentran en las bandas con menor longitud de onda (Chuvienco, 2008).

2.3.2 Correcciones geométricas.

Las correcciones geométricas permiten la transformación de una imagen satelital de manera que tenga la escala y proyección propias de un mapa específico u otra imagen de referencia, puesto que no tienen las características de un mapa ya que son medidas de reflectancia almacenadas en un eje cartesiano de columnas y líneas (Seco, 2002; Mather, 2004). Esto se hace mediante el cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. Uno de los procedimientos utilizados, denominado corrección orbital, aplica transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición de la imagen y con ello se pueden corregir errores derivados de la rotación y curvatura de la Tierra y de la inclinación de su órbita. Otro método consiste en realizar las correcciones a partir de puntos de control con coordenadas conocidas, de manera que se tengan puntos lo suficientemente representativos de la deformación geométrica de la imagen (Chuvienco, 2008).

Aunque son procesos necesarios, se suele recomendar que se releguen, siempre que sea posible, a la fase final del trabajo, una vez que se hayan obtenido los resultados finales de los procesamientos, debido a que es preferible realizar las clasificaciones con los valores originales. Son procedimientos necesarios ya que en muchos casos es necesario que la información de la imagen corresponda a su verdadera posición en la cartografía y aunque es una tarea importante debe de haber claridad en cuanto a la conveniencia de ella antes o después de otros procedimientos (Seco, 2002).

2.4 Procesamiento de imágenes.

El procesamiento de las imágenes está encaminado a obtener información de ellas a partir de los valores de ND o de reflectancia presentes. En esta tesis se trabaja con el objetivo de obtener los cambios de cobertura a partir de los caminos, por lo que el interés en los procesos se centra en la detección de cambios a partir de dos fechas.

De acuerdo con Singh (1989, citado en González, 2006), la detección del cambio es un proceso de identificación de diferentes estados de un objeto o fenómeno observado en diferentes instantes temporales (tomado de Rodríguez Galiano *et al*, 2010). Singh agrupa las técnicas de detección de cambio en: realce de la imagen, clasificación directa multifecha y comparación de imágenes previamente clasificadas.

El realce de la imagen es relativamente simple, directo y fácil de poner en ejecución, pero no pueden proporcionar matrices completas de la información del cambio. Entre las técnicas de realce más utilizadas se encuentran el cociente de imagen, la diferencia de NDVI y Transformación Tasseled Cap, entre otros (González, 2006).

Por otra parte, la clasificación de imágenes se basa en el análisis de una combinación de bandas espectrales de diferentes fechas para identificar áreas de cambio. Las categorías de cambio y no cambio pueden deducirse de una clasificación supervisada o no supervisada (González, 2006).

Para el primer caso es necesario tener conocimiento de la zona de estudio para poder utilizar campos de entrenamiento, en este caso de las zonas que hayan tenido algún cambio en el periodo de tiempo. En el caso de la clasificación no supervisada, el usuario deja que el algoritmo sea el que identifique las categorías, por lo que no se requiere un conocimiento previo de la zona (Seco, 2002).

De acuerdo con Singh (1989, citado en González, 2006), el método más utilizado para la detección de cambio es mediante la generación de una matriz multifecha formada por la clasificación espectral de imágenes de diferente fecha.

2.5 Clasificación digital de imágenes.

La clasificación digital de imágenes es una técnica que permite agrupar los píxeles en una imagen en función de sus valores, haciéndoles corresponder un determinado tipo de cobertura con el objetivo de obtener una cartografía e inventario de la imagen (Seco, 2002). Puede considerarse el proceso de clasificación como una forma de reconocer patrones, es decir identificar patrones asociados a la posición de capa pixel dependiendo de las características presentes en la superficie terrestre (Mather, 2004).

Se pueden distinguir dos métodos de clasificación de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento, estas son la clasificación supervisada y la no supervisada. Como primera aproximación a estas técnicas, puede decirse que el método supervisado define clases informacionales, es decir las referentes a la leyenda del trabajo, mientras que el método no supervisado identifica clases espectrales, es decir grupos de valores espectrales homogéneos (Chuvieco, 2008). De acuerdo con Townshend y Justice (1981, citado en González, 2006) la elección entre uno y otro método depende de los datos y medios disponibles y de los objetivos marcados, aunque el método no supervisado suele usarse de guía para posteriormente aplicar un método supervisado y existen técnicas que utilizan los beneficios de ambos métodos.

2.5.1 Clasificación no supervisada.

De acuerdo con Chuvieco (2008), la clasificación no supervisada se realiza a partir de una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, por lo que no implica ningún conocimiento del área de estudio. En la imagen se agrupan píxeles con un comportamiento espectral homogéneo, con lo que forman *clusters* que debieran definir clases temáticas de interés, aunque puede que estas no coincidan con las del usuario.

Para la agrupación de los píxeles se basa en tres parámetros: 1) variables que intervienen en el análisis, 2) criterio para medir la similitud o distancia entre casos, 3) criterio para agrupar casos similares.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles y otro que marque las condiciones del

agrupamiento. Para medir la distancia entre píxeles el criterio más utilizado es la distancia euclidiana. Para el agrupamiento, uno de los criterios más extendidos es el llamado ISODATA (Duda y Hart, 1973; citado en Chuvieco, 2008). Este algoritmo funciona a través de unos centros de clase señalados de acuerdo al número y forma indicados por el usuario.

Se considera que la importancia de los métodos no supervisados está en que sirven como exploratorios antes de realizar una clasificación supervisada (Chuvieco, 2008). En este sentido, Mather (2004) considera que el término “exploratorio” debería ser aplicado en vez del de “no supervisado”.

2.5.2 Clasificación supervisada.

La clasificación supervisada parte de un conocimiento previo del terreno, lo que permite que el usuario delimite áreas representativas de cada una de las categorías de interés que compondrán la leyenda. Los píxeles de estas áreas son utilizados para que los píxeles restantes sean asignados a cada una de las categorías de acuerdo a la mayor similitud de sus valores de reflectividad o de ND. Los datos de entrada aportados por el usuario pueden provenir del trabajo de campo, fotointerpretación, artículos o mapas del área de interés (Mather, 2004).

Los métodos supervisados utilizan algoritmos estadísticos o algoritmos neuronales. Los métodos estadísticos usan parámetros derivados de una muestra de datos en forma de clases de entrenamiento. Los métodos neuronales no se basan en la información estadística de las muestras pero utilizan directamente la información de las muestras (Mather, 2004).

De acuerdo con Chuvieco (2008), dentro de la clasificación digital de imágenes pueden distinguirse las siguientes fases:

- Fase de entrenamiento: definición digital de las categorías de interés.
- Fase de asignación: agrupación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías.
- Fase de comprobación: verificación de resultados.

2.5.2.1 Fase de entrenamiento.

Es la columna vertebral de la clasificación, consiste en seleccionar una muestra de píxeles de la imagen que sean representativas de las categorías de interés. Se debe definir con rigor cada una de las categorías que pretenden discriminarse, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio. Los resultados de la clasificación dependen de la muestra de píxeles por lo que de tener una selección incorrecta se obtendrán pobres resultados en la clasificación.

Obteniendo las áreas de entrenamiento se calculan las estadísticas elementales de cada categoría utilizando los píxeles muestra de las áreas de entrenamiento. Es recomendable elegir un número de píxeles de entre 10 y 100 por el número de bandas que integran el análisis, por cada área de interés. Deben estar preferentemente en varias posiciones de la imagen y tener dimensiones pequeñas para evitar elegir áreas heterogéneas (Jensen, 1996,; citado de Chuvieco, 2008).

2.5.2.2 Fase de asignación.

En esta fase se agrupan los píxeles a una de las clases previamente seleccionadas, si el ND o reflectancia se encuentran dentro del dominio de alguna clase, entonces le será asignada esa categoría. Los criterios más utilizados para determinar la clase de los píxeles son (Chuvieco, 2008):

- 1) Mínima distancia. Es el criterio más sencillo, consiste en incluirlo en la categoría más cercana, es decir en aquella que minimice la distancia espectral entre el píxel y el centroide de clase, obteniéndolo a través de la distancia euclidiana. No deja píxeles sin clasificar, lo que puede resultar en errores si existen categorías no incluidas en la leyenda pero que están presentes en la imagen. Se suele utilizar cuando el área de estudio no presenta gran complejidad debido a que ofrece buenos resultados cuando no hay solape entre categorías.
- 2) Paralelepípedos. Un píxel es asignado a alguna determinada clase si su valor se encuentra a menos de una determinada distancia del centro de la clase, esa distancia es definida por el intérprete. Cuanto mayor sea el umbral, mayor el

número de píxeles asignados a esa clase, y por lo tanto también mayor el riesgo de error y viceversa.

- 3) Máxima probabilidad. Debido a que se ajusta con más rigor a la disposición original de los datos, este criterio de clasificación es el más utilizado en teledetección, es más complejo que los anteriores y requiere mayor volumen de cálculo. Este método permite calcular la probabilidad de que un píxel pertenezca a alguna categoría.

Es necesario estimar la distribución de probabilidad para cada categoría, a partir de medidas realizadas sobre las áreas de entrenamiento. Para ello se considera que los valores de los píxeles en el seno de cada clase se distribuyen normalmente, por lo que basta calcular la media y la desviación típica de cada categoría para calcular la probabilidad asociada con un determinado valor de píxel.

- 4) Clasificadores en árbol: Este método es descrito como más sencillo que el de máxima probabilidad pero es también eficiente. Discrimina secuencialmente cada una de las categorías basándose en valores espectrales, variables texturales, temporales o en información auxiliar. Para cada clase se discriminan unas reglas dicotómicas de interpretación que permiten concentrar la discriminación de cada clase a partir de las variables en que mejor se discrimina.
- 5) Redes neuronales artificiales (RNA): Se utilizan para predecir un cierto comportamiento complejo, habitualmente a partir de una muestra de entradas y salidas observadas. Con los datos de esa muestra, la red reconoce el resultado a partir de los valores de entrada, clasificando el resto de las observaciones de acuerdo a esas reglas. Las RNA son una alternativa a los clasificadores tradicionales, especialmente cuando no pueden asumirse distribuciones normales de las categorías, ya que las RNA son independientes del tipo de distribución.

2.6 Índices de vegetación.

Índice de Vegetación (IV) se define como un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que extrae la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones debidas al suelo y a condiciones atmosféricas (Gilabert *et al*, 1997). De acuerdo con Mather (2004) es una de las aplicaciones más utilizadas en percepción remota.

De acuerdo con Jackson (1983; citado en Gilabert *et al*, 1997), un Índice de Vegetación Ideal es aquel que es particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, factores ambientales y geometrías de la observación e iluminación. Sin embargo con lo visto ya anteriormente en el pre procesamiento de imágenes y los problemas al tomar una imagen, se sabe que un Índice de Vegetación Ideal no existe. Por esta razón, es que existen varios índices, de acuerdo con Gilabert *et al* (1997) la elección del más apropiado es un tema abierto y pendiente de un profundo análisis.

El empleo de los índices para discriminar vegetación se deriva del comportamiento espectral que la propia vegetación tiene. Como se aprecia en la Fig. 2.4, la respuesta espectral de la vegetación sana es contrastante entre las bandas visible e infrarrojo. Como se sabe, la vegetación absorbe, mediante la clorofila, la radiación de la banda del rojo pero refleja el verde, razón por la que los seres humanos la vemos verde. Sin embargo en el infrarrojo cercano es donde tiene su mayor reflectividad, consecuencia de las dispersiones múltiples por el interior de la estructura celular. Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés (plagas o sequías intensas) la reflectividad en el infrarrojo cercano es menor, con lo que el contraste entre bandas es menos contrastante (véase Figura 2.4). De esta manera se puede identificar vegetación enferma, senescente o con poca densidad (Chuvienco, 2002).

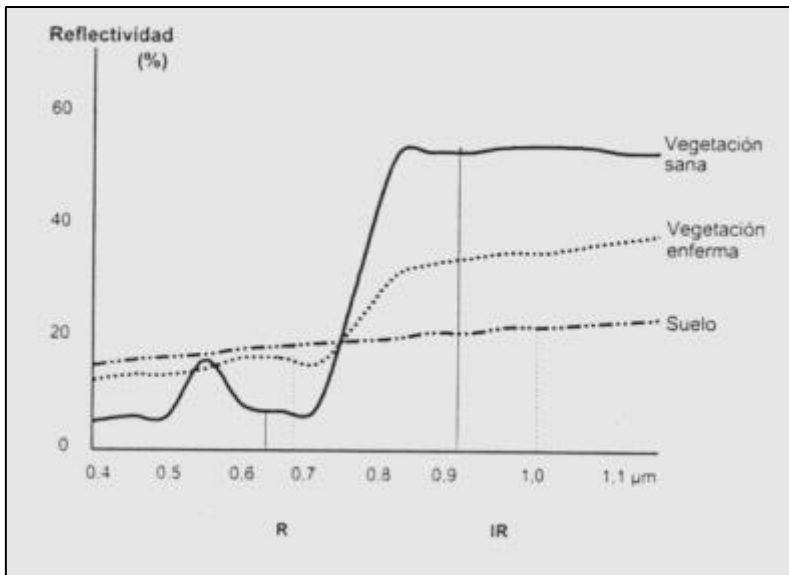


Figura 2.4. La respuesta espectral de la vegetación sana y enferma.
Fuente: http://www.scanterra.com.ar/conozca_mas.html

Los índices de vegetación más comunes utilizan los valores de reflectividad en las bandas del rojo e infrarrojo, puesto que aproximadamente 90% de la información relativa a vegetación está contenida en esas bandas (Gilabert *et al*, 1997). Es importante hacer notar que la definición habla de valores de reflectividad, lo que hace necesario realizar corrección atmosférica y radiométrica, aunque de acuerdo con Chuvieco (2002) existen algunos autores que utilizan los niveles digitales, siempre que no se pretenda conceder un valor físico a los resultados. Los índices más utilizados son el cociente simple entre bandas (RVI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Chuvieco, 2002).

El *Ratio Vegetation Index* (RVI) o cociente simple entre bandas, propuesto por Pearson y Milles en 1972, es el cociente entre el infrarrojo cercano y el rojo (Gilabert *et al*, 1997).

$$RVI = \frac{irc}{r}$$

Donde irc es el infrarrojo cercano y r es rojo.

El Índice más utilizado en teledetección es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), propuesto por Rouse *et al* en 1974, puesto que su cálculo es sencillo y parece ser menos sensible que el RVI al suelo y a las condiciones atmosféricas, factores que modifican el comportamiento del NDVI (Gilabert *et al*, 1997).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{irc} - r}{\text{irc} + r}$$

Otra ventaja del NDVI frente al RVI es la facilidad de interpretación, ya que el NDVI varía entre -1 y 1, lo que quiere decir que un umbral crítico para cubiertas vegetales sería en torno a 0.1 y para vegetación densa entre 0.5 y 0.7 (Holben, 1986, en Chuvieco, 2002).

Como ya se comentó, existen factores que modifican el resultado de los NDVI, como son el suelo y las condiciones atmosféricas, por lo que han surgido una gran cantidad de índices que se intentan ajustar a estas condiciones. Uno de estos índices es el llamado *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), el cual, como su nombre lo indica incluye el factor suelo, el cual es clave cuando se trabaja en zonas áridas (Chuvieco, 2002).

$$\text{SAVI} = \frac{(\text{irc} - r)}{(\text{irc} + r + l)} (1 + l)$$

Donde:

l es el factor de corrección de brillo del suelo, en regiones con mucha vegetación verde su valor es de cero, en áreas sin vegetación verde su valor es uno. Generalmente se usa por default 0.5

El valor de *l* indica una constante para ajustar la línea vegetación-suelo al origen, algunos autores indican su valor posible en torno a 0.5. Estudios indican que aplicando este índice se reduce la variación inducida por el suelo en comparación con el NDVI (Huete *et al*, 1994, en Chuvieco, 2002).

Existen otros Índices de Vegetación que son más complejos puesto que incluyen elementos para atenuar problemas como la corrección atmosférica.

2.7 Verificación de resultados.

Como en cualquier investigación, es necesario verificar la calidad de los resultados, por lo que el último paso del procesamiento digital de imágenes, sea cual sea el método elegido, es la verificación de resultados.

La verificación es un proceso importante puesto que si se desea tomar decisiones a partir de la información generada permite conocer el riesgo que se asume al considerarlas (Chuvieco, 2008).

Existen varias formas de validar los resultados, o al menos acercarse a este objetivo; sin embargo, la forma más certera es mediante un muestreo que compare los resultados con la realidad en el terreno. El muestreo implica una inversión económica y de tiempo, por lo que en algunos casos se prefiere una valoración cualitativa o una valoración no espacial; sin embargo, estos no otorgan la precisión y certidumbre de un muestreo espacial (Chuvieco, 2008).

2.7.1 Diseño del muestreo.

El muestreo consiste en seleccionar una porción representativa del área de estudio para verificar los resultados de la investigación. El diseño de muestreo contempla la determinación del tipo de unidades de muestreo, su método de selección y el tamaño de la muestra (González, 2006).

2.7.1.1 Unidad de muestreo.

La unidad de muestreo se refiere al elemento que servirá para extraer la información de referencia para comparar con los resultados obtenidos en el procesamiento de imágenes (Chuvieco, 2008).

Para verificar los resultados de una clasificación digital pueden utilizarse como unidad muestral los polígonos temáticos resultado de la clasificación. Es importante considerar que el tamaño de la unidad no debe ser menor a la unidad mínima cartografiable.

2.7.1.2 Tipos de muestreo.

La forma de realizar el muestreo varía de acuerdo a las necesidades y disponibilidad de tiempo e inversión. Entre los más regularmente empleados se encuentra (Chuvienco, 2008) (véase Fig. 2.5):

- 1) Aleatorio simple: los elementos a verificar se eligen de tal forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados. Puede ser costoso y no ser representativo de la variación espacial.
- 2) Aleatorio estratificado: la población se divide en regiones o estratos de acuerdo a una variable auxiliar, como pueden ser las categorías que se han clasificado.
- 3) Sistemático: la muestra se distribuye a intervalos regulares a partir de un punto de origen aleatorio. Garantiza cubrimiento total pero puede ser caro y llevar a errores.
- 4) Sistemático no alineado: similar al sistemático, pero varía las zonas aleatoriamente, lo que puede llevar a una mejor representación de la zona.
- 5) Por conglomerados: en lugar de individuos aislados se selecciona un grupo de observaciones denominadas conglomerado o *cluster*. Reduce los costos de transporte pero es más complejo y menos preciso que los anteriores.

2.7.1.3 Tamaño de la muestra.

De acuerdo con Chuvienco (2008), el tamaño de la muestra depende del nivel de confianza que quiera otorgarse a la estimación, del error tolerable en la estimación y de la propia heterogeneidad de la variable.

Para el caso de una imagen clasificada, en donde la variable no es cuantitativa sino categórica se recomienda utilizar la distribución binomial de probabilidad.

Algunos autores como Chuvienco, (2008) proponen un mínimo de cincuenta muestras por categoría para obtener una estimación fiable del error.

Es recomendable realizar el muestreo para todas las clases por separado, partiendo de la clase con menor extensión, lo que marcará la proporción del área a muestrear.

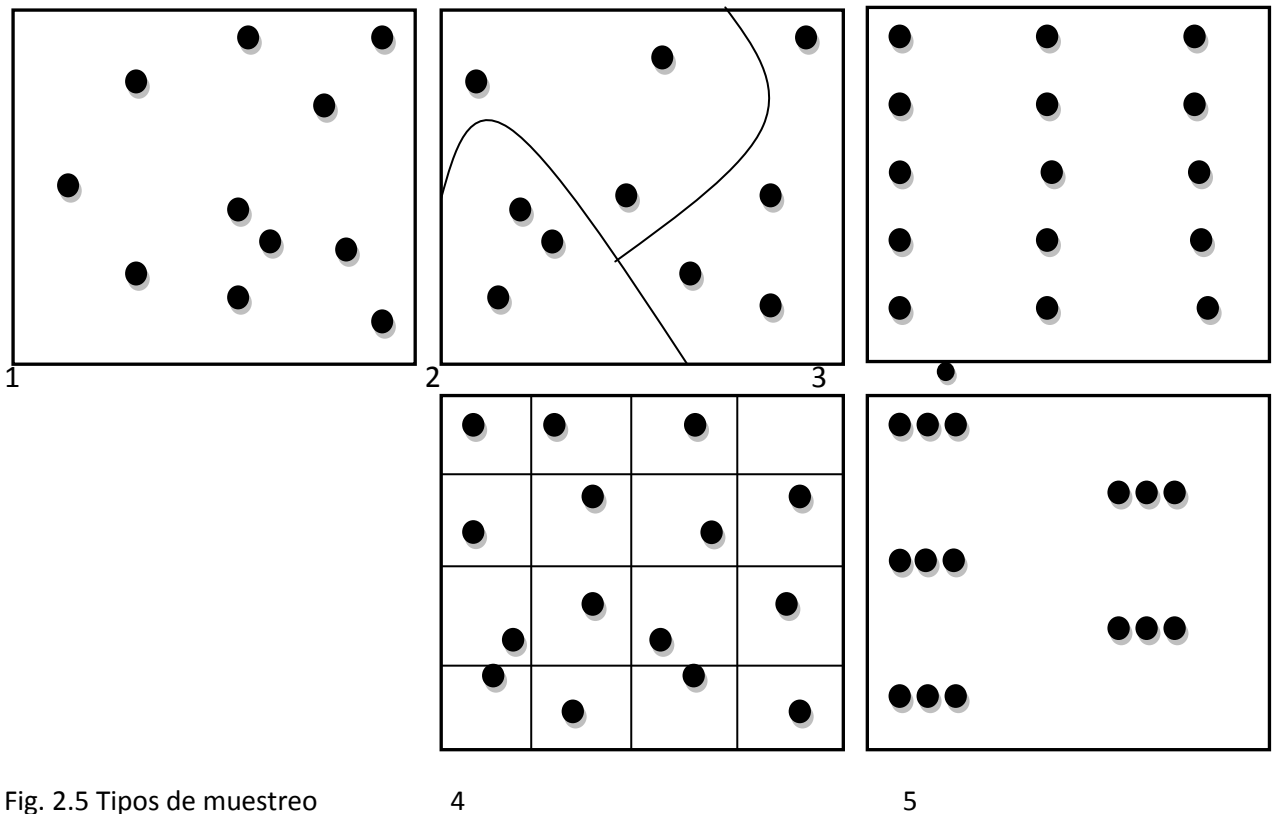


Fig. 2.5 Tipos de muestreo
 Fuente: elaborada con base en Chuvieco (2008)

2.7.2 Evaluación de los sitios de verificación.

Una vez diseñado el muestreo, el siguiente paso es obtener el valor de la variable o clase temática de referencia en contraste con el obtenido en los resultados del procesamiento digital. Para ello existen dos alternativas: realizar mediciones directas en trabajo de campo, o recurrir a fuentes de información auxiliares (Chuvieco, 2008).

En el caso particular de los mapas de clasificación es notorio que es necesario aplicar las mismas definiciones de las categorías temáticas, de lo contrario se estaría tomando como cambio algo que en realidad no ha cambiado, pero que se le está dando otra definición. Como alternativas al trabajo de campo están las fotografías aéreas, imágenes de mejor resolución y cartografía temática, la principal condición es que éstas deben ser de una fecha igual a similar a las de las imágenes que se utilizaron, y que deben tener certeza en la información.

Tras haber verificado las zonas seleccionadas en el muestreo, se puede proceder a evaluar la validez de los resultados. En las imágenes clasificadas se utiliza la matriz de confusión, la cual es una tabla con el listado de puntos de verificación con su

cobertura real y la obtenida en la clasificación. La diagonal de la matriz muestra el número de puntos de verificación correctos, por lo que la relación de estos y el total muestra el nivel de fiabilidad del mapa.

Los valores en las columnas expresan tipos de cobertura real que no se incluyeron en el mapa (errores de omisión), mientras que los valores en filas muestran cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad (errores de comisión).

Capítulo III Efectos de caminos en Áreas Protegidas.

De acuerdo con Jiménez (2006), la ecología de caminos es una rama de la ecología del paisaje, por lo que es necesario abordar brevemente este tema.

3.1 Ecología del paisaje.

La ecología del paisaje (Troll, 1939) o geobiocenología (Sucatjev, 1944)(citado en Bocco, 2003) es una rama de la ciencia que se dedica a la investigación del paisaje natural, que deriva de la sinopsis de las manifestaciones ordenadas por espacios geográficos naturales, es decir de la armonía ecológica funcional del suelo, agua, aire y el mundo biótico; sin embargo, en su intención de investigar los paisajes, también contempla las acciones económicas y culturales del ser humano, al cual toma como parte de los ecosistemas al tener un papel decisivo al modificarlos, destruirlos y crearlos (Jiménez, 2006), por lo que el enfoque que utiliza incluye las ciencias físicas, naturales y sociales (componente abiótico, biótico y humano), el paisaje está en constante dinámica debido a las acciones de estos componentes, lo que lleva a la sucesión paisajística (estado pionero, secundario y clímax) (Bocco, 2003). Con esta aproximación se puede hacer énfasis en las causas y consecuencias de la heterogeneidad espacial sobre un rango de escalas (Burel y Baudry, 2002; citado en Jiménez, 2006). De acuerdo con Jiménez (2006), esta ciencia nace con el objetivo de abordar las crecientes problemáticas debido a los efectos de fragmentación forestal y para comprender los patrones y procesos ecológicos del espacio que percibimos, mientras que Bocco (2003) agrega que fue gracias a la interpretación científica de la imagen aérea lo que derivó en la ecología del paisaje. Los conceptos ecología y paisaje están relacionados con el entorno del ser humano, un entorno natural modificado por sus actividades que transforman el paisaje natural a un paisaje económico y culturalmente aprovechado (Bocco, 2003). Este enfoque combina la aproximación espacial del geógrafo con la aproximación funcional del ecólogo (Forman y Godron, 1986; citado en Jiménez 2006) y tiene como unidad de estudio al paisaje entendido, como el espacio formado por la conjunción de elementos bióticos y abióticos (ecosistemas) influenciados por las variadas actividades del ser humano, lo que resulta en diversos paisajes, es decir socialmente construidos.

3.2 Ecología de caminos.

Los caminos han llegado a ocupar un lugar permanente de nuestro ambiente físico, social y cultural, siendo un elemento indispensable para el desarrollo y prosperidad de los asentamientos desde épocas remotas. Sin duda generan beneficios como crecimiento económico (sin embargo no homogéneo), reducción en los tiempos de viaje, reducción en los costos de transporte, oportunidad de nuevos empleos, incremento del bienestar social y económico e integración del territorio.

A pesar de las ventajas antes citadas, los caminos y el tráfico producen efectos en el ambiente. Las investigaciones en torno a este tema son aún escasas, existiendo grandes vacíos en la escala que afectan, así como en la magnitud e implicaciones (Spellerberg, 2002). De acuerdo con Jiménez (2006), los temas mayormente investigados en la ecología de caminos son cambio en la composición de la vegetación, dispersión y movimiento de fauna, erosión, deforestación, pérdida de especies y cambios en el sistema hídrico. Si las investigaciones a nivel mundial han sido escasas, en México tampoco ha alcanzado difusión suficiente. Algunos trabajos se han realizado a partir del año 2006, teniendo como responsables a biólogos con un enfoque ambiental y de conservación. En Geografía se ha realizado un único trabajo de este tipo llevado a cabo en la tesis de licenciatura de Jiménez (2006) con el título de *“La red de caminos en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y su relación con la perturbación del bosque, 2003”*.

Es importante señalar que los caminos no sólo provocan efectos ecológicos y ambientales, también provocan efectos negativos en las comunidades humanas. A este respecto existen algunas investigaciones que concluyen que los caminos con tráfico pesado trastornan a las comunidades cercanas y tienen impactos en la salud mental. Otros han mostrado que el volumen del tráfico es proporcional a la interacción social, ya que entre más pesado sea el tráfico, menos interacción social entre las comunidades cercanas. En general el tráfico pesado cambia el comportamiento humano en el hogar, ocasionando poco uso en las habitaciones de las viviendas en las zonas cercanas a los caminos debido al ruido y a la contaminación (Spellerberg, 2002).

en su conjunto (Toledo, 2009). Mide las diferencias entre las especies de dos puntos, dos tipos de comunidades o dos paisajes, de acuerdo con Halffter y Moreno, 2005, estas diferencias pueden ocurrir espacial y temporalmente. De manera espacial se refiere a las mediciones que se hacen en sitios distintos en un mismo tiempo. La manera temporal se refiere a las mediciones realizadas en un mismo lugar pero en diferente tiempo. De acuerdo con Cornell y Lawton (1992, citado en Halffter y Moreno, 2005), la diversidad beta es el enlace entre las diversidades local y regional. La diversidad gamma es el número de especies dentro de un conjunto de ecosistemas o un paisaje, es decir a una escala mayor que la diversidad alfa. Es consecuencia de los procesos histórico-geográficos que actúan a nivel de meso escala, condiciona y a su vez es influida por las diversidades alfa y beta, a este nivel es donde las acciones humanas que llevan a la fragmentación de comunidades tienen efectos más importantes (Halffter y Moreno, 2005). Para Forman y Godron, 1986 (citado en Halffter y Moreno, 2005), el paisaje es un área terrestre heterogénea conformada por un conjunto de ecosistemas interactuantes. El paisaje debe tener ciertas condiciones ambientales similares, como son una historia geomorfológica y evolutiva común.

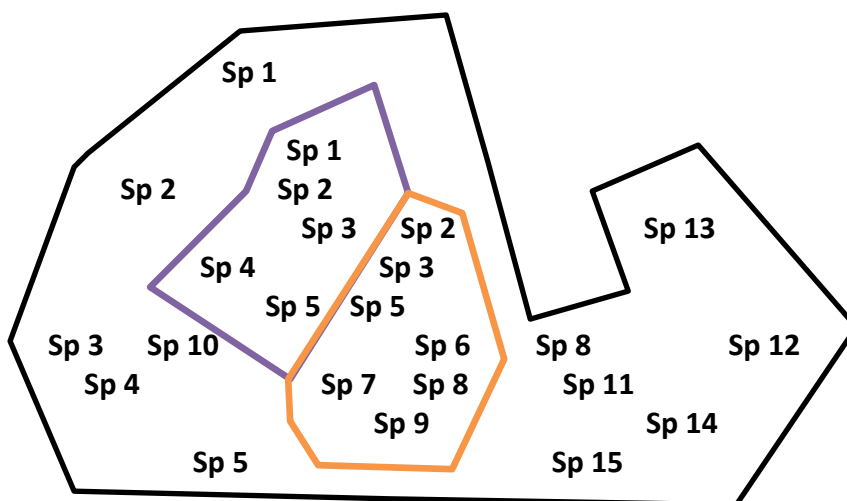


Figura 1.1 Medición diversidad de especies: diversidad alfa, beta y gamma. Elaboración propia a partir de Toledo (2009).

En las figuras de color se observa la diversidad alfa presente en dos comunidades del paisaje completo (figura en negro). La figura morada presenta una diversidad alfa de cinco especies, mientras que la figura naranja presenta siete especies, es decir la segunda figura tiene mayor diversidad alfa. Comparando ambas comunidades se

Entre los efectos provocados están los problemas ocasionados por cambios en el relieve (Spellerberg, 2002). Deslizamientos, desprendimientos, cambios en el drenaje, materiales aluviales inestables y hundimientos presentan muchos retos durante la construcción y el uso de los caminos. En general, se puede decir que provocan erosión, además durante su construcción las cargas de sedimentos llegan a los cauces. Los caminos sellados incrementan el área de la superficie impermeable, incrementando los escurrimientos que contribuyen a la erosión. Los caminos rurales generalmente tienen menores superficies estables, las cuales son más susceptibles a aumentar la erosión (Spellerberg, 2002).

Impactos físicos y químicos son también causados por los caminos, incluyen el ruido, luz, polvo y otras partículas, así como metales como plomo, cadmio, níquel y zinc, además de gases como óxido de carbono y diversos óxidos de nitrógeno. Algunos estudios muestran que los efectos físicos y químicos van cientos de metros más allá del camino (Spellerberg, 2002).

Por otra parte, las explotaciones forestales y los caminos provocan inestabilidad en las pendientes afectando los patrones de escurrimientos. Los sedimentos que llegan a los cuerpos de agua afectan a los organismos acuáticos, lo que repercute en las pesquerías de subsistencia o comercial y en actividades de recreación; la pérdida de suelo y nutrientes tienen repercusiones en la productividad del ecosistema (Spellerberg, 2002).

La construcción de caminos provoca cambios en los microclimas, causando la pérdida de poblaciones locales de especies o la extinción de especies muy restringidas, así como cambios en la composición del *pool* regional. Los cambios en el clima local se dan por cambios en los niveles de luminosidad, temperatura, velocidad del viento y humedad. Por otra parte, el tráfico provoca ruido, vibraciones, perturbaciones por las luces, atropellamientos, con lo que muchas especies evitan los caminos y se aíslan en porciones de su hábitat (Spellerberg, 2002).

Otros impactos son ocasionados por cuestiones estéticas, ya que se suele preferir dar atención a estas cuestiones que a las ecológicas mediante la plantación de especies exóticas pero de buena apariencia. Los costados de las carreteras pueden

servir como conductos para la propagación de especies exóticas plantadas o invasoras, provocando la disminución de las nativas. Los caminos facilitan la invasión de exóticas, ya sea que lleguen ahí por las capacidades de dispersión de la propia especie o mediante la propagación a través de los vehículos o pasajeros (Spellerberg, 2002).

Un adecuado manejo de los bordes de las carreteras puede traer beneficios a la conservación de la biodiversidad, sin embargo se ha dado poca atención a las oportunidades ecológicas y biogeográficas que se presentan en los caminos (Spellerberg, 2002).

En general, se dice que los caminos afectan 2.5 ó 3.5 veces las superficie del área que ocupan (Reed *et al.*, 1996; citado en Jiménez, 2006), otros afirman que influyen alrededor de 200 m más allá de su posición (Spellerberg, 2002); sin embargo, es necesario considerar que los caminos facilitan la entrada de taladores y cazadores para explotar los recursos naturales, ya que proveen acceso hacia áreas conservadas, provocando cambios de uso de suelo, presión sobre poblaciones de especies y creación de nuevos asentamientos, o, de manera inversa, los asentamientos ya existentes tienen la necesidad de comunicarse mediante caminos adecuados, por lo que su creación o crecimiento es inminente. Peñaranda (2000; citado en Jiménez, 2006), propone clasificar el riesgo de deforestación a partir de los caminos primarios y secundarios (ver cuadro 3.1). Por lo tanto, es necesario considerar no solamente los efectos directos en el ecosistema, sino es fundamental tomar en cuenta los problemas ocasionados por una mayor entrada a las zonas conservadas, también es necesario tomar esto en cuenta en el análisis costo/beneficio de los caminos a construirse.

Factor	Influencia (m)	Riesgo para la deforestación
Caminos primarios	0 – 2500	Severo
	2500 - 5000	Alto
	5000 - 7500	Moderado
	7500 - 10000	Bajo
Caminos secundarios	0 – 250	Severo
	250 – 500	Alto
	500 – 750	Moderado
	750 – 1000	Bajo

Cuadro 3.1 Riesgo de deforestación según distancias desde el camino. Fuente: elaborado con base en Jiménez, 2006).

Los caminos traen consigo desarrollos habitacionales, resultando en una rápida urbanización y cambios demográficos; los caminos llevan a más caminos y creación de nuevos asentamientos (Spellerberg, 2002). Esta cuestión es en la que está basada esta tesis, ya que se busca cómo los caminos han provocado y favorecido cambios en la cobertura forestal, y como a partir de ellos existe una presión sobre el espacio para la creación o crecimiento de asentamientos humanos y zonas agrícolas.

Por otra parte, algunas especies son beneficiadas con las carreteras. Algunos reptiles utilizan los bordes de los caminos para tomar el Sol, carroñeros aprovechan los cadáveres de animales atropellados para alimentarse, y especies exóticas encuentran las condiciones para desarrollarse y expandirse.

Spellerberg (2002) menciona que los efectos varían de acuerdo a la etapa en la que se encuentre el camino, estando a largo plazo las mayores consecuencias. Algunas de ellas se muestran en el Cuadro 3.2

La fragmentación del hábitat es un proceso natural causado por incendios, inundaciones, terremotos, cambios en dirección de las corrientes; sin embargo, las actividades humanas han ocasionado también fragmentación en escalas de tiempo más rápidas, con mayor frecuencia y espacialmente más amplias. La fragmentación es un proceso durante el cual el hábitat de las especies es reducido o seccionado en componentes más pequeños. Este proceso puede presentar ventajas para las especies distribuidas en los límites o en el ecotono, pero no para las especies que habitan en el centro del área del hábitat, esto se debe a que el hábitat apto para las especies centrales se reduce y porque para algunas especies, las áreas entre los fragmentos actúan como barreras, inhibiendo el movimiento de un fragmento a otro (Spellerberg, 2002). Otras consecuencias son que el tamaño de los fragmentos puede ser demasiado pequeño como para soportar la sobrevivencia de especies, provocando extinciones a nivel local. Algunas especies, en la necesidad de trasladarse, salen del fragmento protegido en el que se encuentran, exponiéndose a la cacería furtiva, o por otra parte, al existir un camino que lleve al fragmento es más sencillo que cazadores furtivos lleguen a obtener sus presas.

Efectos ecológicos de caminos en las distintas etapas del camino.			
<i>Durante la construcción</i>	<i>Debido al mantenimiento</i>	<i>A corto plazo</i>	<i>A largo plazo</i>
<p>Pérdida de hábitat y biota.</p> <p>Compactación del suelo.</p> <p>Erosión.</p> <p>Efectos debidos a actividades de apoyo para la construcción.</p> <p>Los impactos ocurren más allá del entorno inmediato del camino</p>	<p>Cuando son sellados con asfalto, los caminos son fuente de contaminantes químicos.</p> <p>En los mantenimientos se suelen ampliar los caminos, aumentando la fragmentación del hábitat.</p> <p>La velocidad de los vehículos es mayor, aumentando el riesgo de mortalidad de fauna.</p>	<p>Si la vegetación es removida, se crea un nuevo microclima.</p> <p>Compactación del suelo.</p> <p>La mortalidad de las plantas influye directa e indirectamente sobre otras especies.</p> <p>Migración de fauna debido a la pérdida de hábitat y disturbios.</p> <p>Atropellos de fauna.</p>	<p>El terreno necesario para los caminos debe ser al menos el doble del área de su cobertura sellada. Además, los efectos se extienden más de 200 m dentro de la selva.</p> <p>Fragmentación de hábitats.</p> <p>Efectos de borde.</p> <p>Invasión de especies exóticas adaptables a los cambios, provocando su dispersión a lo largo del camino.</p> <p>Superficies impermeables y alcantarillas provocan cambios en el drenaje, llevando contaminantes a cuerpos donde afectan a especies acuáticas y subacuáticas.</p>

Cuadro 3.2 Efectos ecológicos de caminos en diferentes etapas. Los efectos de los caminos varían de acuerdo a la etapa en la que se encuentre el camino, además de las características inherentes al propio camino y a la zona donde se encuentre. Como se observa, los mayores efectos son a largo plazo, siendo difíciles de revertir. Fuente: elaborado a partir de Spellerberg (2002)

De manera más crítica, de acuerdo con Spellerberg (2002), parece que los caminos alteran procesos ecológicos fundamentales que determinan la estructura de las comunidades y provocan una menor resiliencia ante disturbios.

De acuerdo con Peñaranda (2000; citado en Jiménez, 2006) la construcción de un camino no sólo implica la deforestación y los efectos provocados por este hecho, ya que alrededor de ese camino principal suelen nacer otros caminos secundarios que penetran en el bosque y provocan mayor deforestación y otros efectos. Algunas otras investigaciones encuentran que la alteración de los ecosistemas es mayor mientras se encuentren más cercanos al camino (Jiménez, 2006).

La mortandad de animales en carreteras es uno de los efectos más abordados en ecología de caminos, debido a que además de la dimensión ecológica y etológica tiene repercusiones en el ámbito social y genera emotividad en la población, aunque existen marcadas diferencias entre especies. Los caminos se superponen y fragmentan los hábitats de diversas especies, además de que el camino puede ofrecer algunas oportunidades interesantes para algunas otras. Este el caso de algunos reptiles y aves atraídas por el calor absorbido por el concreto de una carretera, o el uso que algunos mamíferos le dan al desplazarse de manera más sencilla sobre ella. Esto hace que las carreteras representen un peligro para todas las especies que hacen uso de ella o de las cuales se ha invadido su hábitat y en su necesidad de dispersión se ven obligadas a cruzar los caminos. Los factores que contribuyen a estos incidentes son la densidad de caminos, el ancho, su localización, la densidad de tráfico y velocidad, naturaleza de los hábitats circundantes, el comportamiento del conductor y las condiciones del camino. Por otra parte, es probable que mayor tráfico implique mayor mortandad de animales, y lo que se ha demostrado en algunas investigaciones es que la velocidad del tráfico está correlacionada con la mortandad de animales (Spellerberg, 2002). No todas las especies son afectadas por igual, en general, se cree que los pequeños mamíferos son más vulnerables a ser atropellados en los caminos; sin embargo, esto representa un pequeño porcentaje del total poblacional, en cambio mamíferos grandes son más afectados a nivel poblacional (Spellerberg, 2002).

3.2.2 Alternativas de manejo.

Es necesario que al planear un camino se conozcan los elementos que componen el paisaje, incluyendo además de las cuestiones físicas necesarias, el conocimiento de las especies que se encuentran, sus nichos, hábitats, movimientos, poblaciones, áreas de importancia para la conservación y cuestiones sociales.

Un apropiado manejo puede ayudar a compensar los efectos, por ejemplo plantar especies nativas en los bordes de los caminos. En algunos países europeos se han propuesto y llevado a la práctica la construcción de puentes llamados ecoductos o puentes verdes, los cuales están cubiertos de suelo, hierbas y arbustos, de manera que la fauna pueda transitar libremente; evidentemente, para ello se requiere conocer cuáles son las zonas donde existe mayor paso de fauna (Spellerberg, 2002). Para tener alta probabilidad de éxito en estos puentes es necesario que cumplan con una serie de características como el ancho de cada puente, la distancia entre ellos y las características del hábitat en cada puente (Spellerberg, 2002).

A pesar de todos los efectos negativos de los caminos, los bordes son considerados una oportunidad de conservación de la biodiversidad que sobreviva si es que se les da un buen manejo, ya que en algunos casos son los últimos vestigios de las comunidades originales, aunque la visión de algunos investigadores es que estos intentos de mitigación son mínimos en comparación con los efectos provocados. En adición a esto, los costos de mantenimiento de los bordes se reducen al utilizar germoplasma nativo y ofrecen mayores oportunidades de conservación.

La Royal Society for Natural Conservation (RSNC) del Reino Unido, publicó en 1986 una guía de manejo de bordes de carreteras con fines estéticos y de conservación. En esta guía se proponen formas de manejo mediante la segmentación del camino en varias zonas (figura 3.1 Manejo de bordes de carretera), aunque es claro que las formas de manejo no pueden ser iguales en todos los lugares, puede ser una opción de manejo de algunos caminos en las áreas protegidas del país. La zona "A", ubicada un metro adyacente a la carretera, debe tener pastos de unos 20 cm, con cortes cada seis meses, evitando cortar todo el césped para inhibir el crecimiento de malas hierbas. La zona "B", de pequeños prados con flores nativas, debe ubicarse en

los siguientes 1 ó 2 m, debe ser cortada con menor frecuencia, unas dos veces al año. Si las primulas son predominantes, se deben cortar en junio antes de que suelten sus semillas. La zona "C", ubicada al lado de los setos (*hedge*) o arroyos (*ditch*), debe ser cortada una vez cada dos años, debe tener hierbas altas que sirvan de alimento y refugio a insectos. La siguiente zona puede ser ocupada por arroyos (*ditch*), los cuales son valiosos para la vegetación nativa y animales acuáticos. La última zona de manejo es la llamada seto (*hedge*), la zona de mayor cobertura de vegetación. Tienen como función servir como corredor que conecte zonas fragmentadas y que permita que se realicen procesos naturales. Deben utilizarse especies nativas, aunque cuando estas se han perdido debido a un alto impacto pueden ser reemplazadas por otras de valor comercial. El uso de herbicidas en todas las zonas debe ser nulo debido a que inhibe el crecimiento de plantas nativas, a excepción de casos donde se presenten malas hierbas (Spellerberg, 2002).

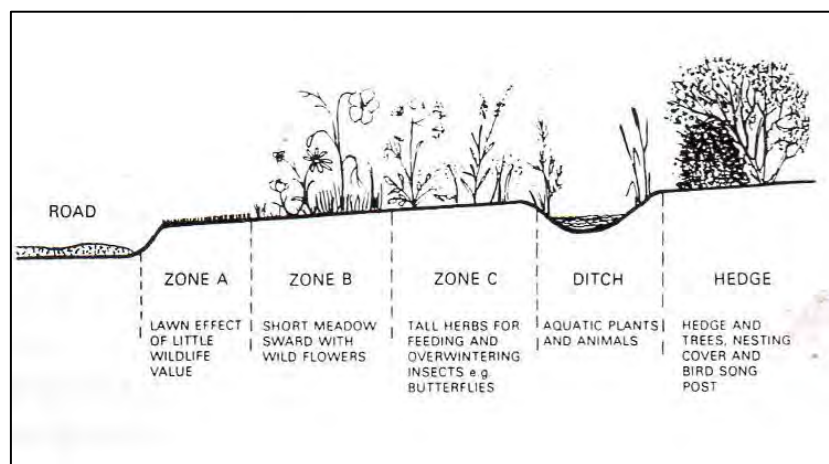


Figura 3.1 Manejo de bordes de carretera. Fuente: Spellerberg (2002).

El diseño de túneles y puentes, la aplicación de cercas, señalizaciones y control del tráfico son métodos para tratar de aliviar el problema de los atropellos (figura 3.2), sin embargo la solución prioritaria consiste en una adecuada planeación.

El manejo de los bordes de los caminos requiere más que el conocimiento ecológico, físico y geográfico, se requiere un genuino interés de los tomadores de decisiones para que sean capaces de considerar las prioridades que las investigaciones identifiquen; además, se requiere la cooperación de los intereses que pueda haber sobre las zonas donde se desarrollan los caminos.

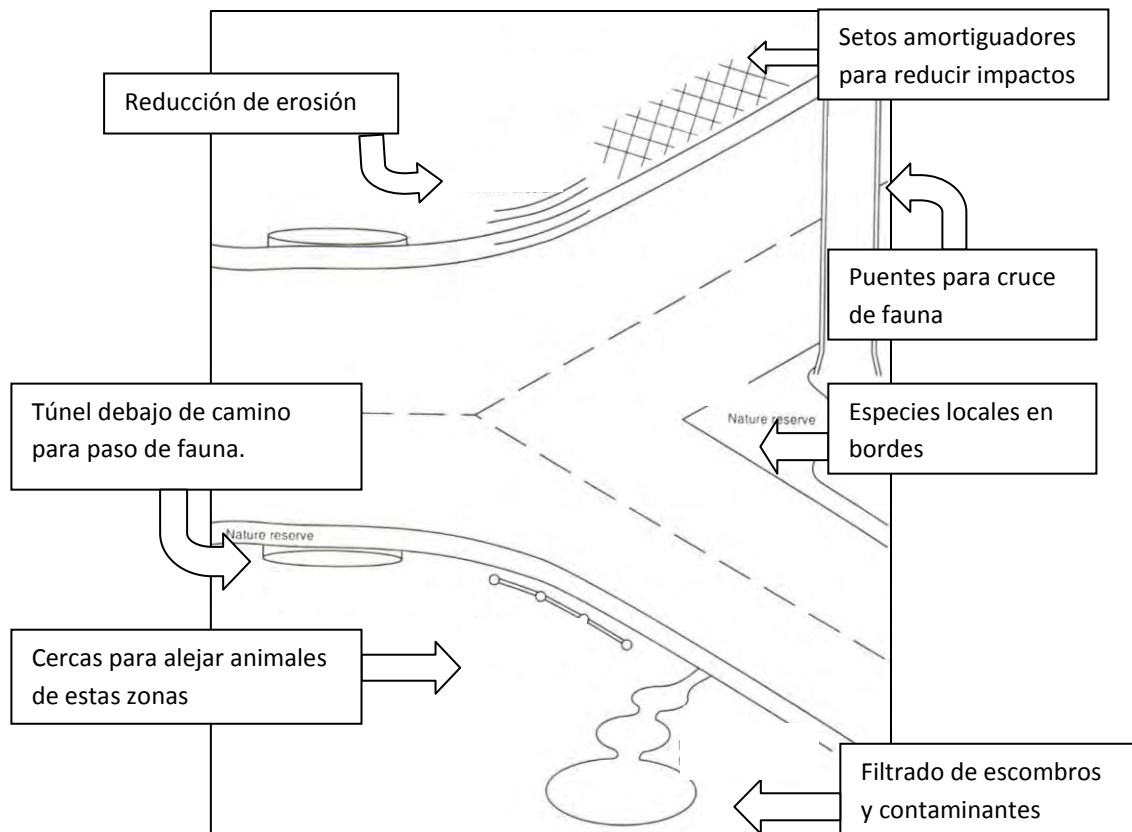


Figura 3.2. Alternativas de manejo de la carretera para mitigar impactos. Fuente: traducida de Spellerberg (2002).

Las oportunidades de mitigación de impactos de caminos existen en cada área que cuente con ellos, y son grandes opciones de refugio para numerosas especies, además de que es posible obtener beneficios estéticos y económicos.

Capítulo IV Área de estudio.

La zona de estudio de esta tesis se encuentra ubicada en el sureste de México, en el estado de Campeche, abarcando los polígonos de la Reserva de la Biósfera Calakmul (RBC) y las Zonas Sujetas a Conservación Ecológica Balam Ku y Balam Kin (ZSCE).

La Reserva de la Biósfera Calakmul, de carácter federal, y las Zonas Sujetas a Conservación Ecológica Balam Ku y Balam Kin, de carácter estatal, forman un continuo de bosque tropical protegido, forman un corredor para las especies presentes en el lugar y uno de sus últimos santuarios en el país, además de tener un gran valor paisajístico y cultural.

4.1 Localización geográfica.

La RBC se encuentra ubicada en el municipio del mismo nombre, que se ubica al sureste del estado de Campeche, que a su vez limita al este con el estado de Quintana Roo y al sur con la República de Guatemala. Las coordenadas extremas en que se ubica la Reserva son 19 ° 15' y 17 ° 45' latitud norte y 90 ° 10' y 89 ° 15' longitud oeste (INE-SEMARNAT, 2000). El origen legal de la Reserva se remonta al 23 de mayo de 1989, fecha en la que fue establecida mediante decreto presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación. En el año de 1993, fue incluida en la Red Internacional del Programa del Hombre y la Biósfera (MAB) de la UNESCO, además de que forma parte del Programa de Conservación de la Biodiversidad de Áreas Naturales Protegidas Selectas de México, parcialmente financiada por la Global Environmental Facility (GEF) (INE-SEMARNAT, 2000).

La RBC cuenta con una superficie de 7 231 km² (723 185 ha), repartida en dos zonas núcleo, que en su conjunto comprenden un área de 2 482 km² (248 260 ha); y una zona de amortiguamiento de 4 749 km² (474 924 ha) (INE-SEMARNAT, 2000). Sin embargo, un trabajo elaborado por García Gil (2003) ajusta el tamaño de la RBC en 7 221 km² (722 121.69 ha), más de 10 km² menos que en el decreto.

La importancia de la zona de estudio estriba en que es la zona de bosque tropical protegido más amplia de México, albergando una gran diversidad de biota. Los bosques tropicales como Calakmul han estado sujetos a procesos de destrucción y

fragmentación en los últimos 40-50 años como resultado de prácticas de manejo de la tierra incompatibles con la conservación y el aprovechamiento razonado de los recursos (Estrada *et al*, 2003).

Por otra parte, las ZSCE Balam Ku y Balam Kin permiten la contigüidad de bosque tropical protegido, ya que se encuentran al oeste de la RBC y cuentan con condiciones naturales adecuadas y en buen estado de conservación, presentando también especies no registradas en la RBC, resulta un área de especial importancia para la conservación de la biodiversidad, ya que además estas áreas protegidas se conectan al noreste de la RBC con la Reserva Estatal Balam Ka'ax, en Quintana Roo, y al sur con la Reserva de la Biósfera Maya, extendida por el Petén guatemalteco, y en Belice con el área de conservación de Milpas-Río Bravo, formando un macizo forestal de más de 30 000 km² (3 000 000 ha) (Gates *et al.*, 1999; Ceballos, 1999; en SECOL Campeche, 2009), aunque con distintos grados de presión por los recursos.

La ZSCE Balam Ku, anteriormente a su decreto llamada Frontera Ambiental, se encuentra en la porción centro-sur de Campeche, colinda al norte con la ZSCE Balam Kin, al este con la zona de amortiguamiento de la RBC, al oeste con los municipios de Escárcega y Candelaria y al sur con el Petén guatemalteco. Fue decretada el 14 de agosto de 2003, tiene un área de 4 092 km² (409 200 ha), las coordenadas extremas son 17°49' y 18°45' latitud norte, 89°41' y 90°26' longitud oeste (SECOL Campeche, 2009).

La ZSCE Balam Kin, anteriormente conocida como segunda ampliación de Dzibalchén, se encuentra en la parte central de Campeche, colindando al norte con los municipios de Champotón y Hopelchén y el extremo noroeste de la zona de amortiguamiento de la RBC; al este con el área de amortiguamiento de la RBC y con pequeñas propiedades; al oeste con el municipio de Champotón, y al sur con la ZSCE Balam Ku, el área de amortiguamiento de la RBC y el municipio de Escárcega. Fue decretada el 15 de diciembre de 1999; sin embargo, desde 1995 se había expropiado esta zona en favor del estado. Cuenta con un área de 1 109 km² (110 990 ha), las coordenadas extremas son 18°50' y 19°10' latitud norte, 89°40' y 90°10' longitud oeste (SECOL Campeche, 2009).

El área total de la zona de estudio es de 12 432 km² (1 243 200 ha), incluyendo en los procesos de imágenes satelitales el área correspondiente a Laguna Ik, una propiedad privada al norte de la ZSCE Balam Kin y al oeste del extremo norte de la RBC (ver Mapa 4.1). A cada área protegida le corresponde un distinto manejo, por lo que las áreas al interior de cada una de ellas tienen distintos objetivos, en el Mapa 4.2 se muestra la zonificación de cada una de ellas.

4.2 La historia que Calakmul, Balam Ku y Balam Kin cuentan.

La zona de estudio es compleja, es resultado de diferentes manifestaciones naturales y humanas. Es tierra del jaguar pero también de su cacería y la deforestación de los últimos remanentes de selva, un espacio de contrastes y de múltiples intereses, aquí un poco de su historia. La SECOL Campeche (2009) reporta que la región estuvo altamente modificada por asentamientos mayas por más de 1 000 años. De acuerdo con Daltabuit *et al.* (2005), posiblemente los primeros pobladores de la zona se asentaron a orillas del río Hondo, donde se inicio el sedentarismo de los nómadas que practicaban la agricultura en el año 2 600 a.C. De años posteriores a estos registros existen vestigios que datan desde el Preclásico (1 000 a.C.-320 d.C.), tiempo en que ya existían más poblaciones que vivían de la agricultura, la caza y recolección. Las evidencias arqueológicas confirman el poblamiento de la antigua civilización maya en el extremo sur de Quintana Roo y Campeche, a partir del periodo Preclásico hasta el Clásico terminal (INE, 2000; Daltabuit, *et al.*, 2005). Durante el periodo Clásico (320-987 d.C.), época del mayor esplendor maya, la selva sufrió transformaciones como consecuencia de los cambios tecnológicos y el aumento de la población; de esta manera surgieron grandes ciudades, siendo Calakmul la de mayor tamaño, teniendo como principal rival a Tikal. Ambas ciudades ejercían su influencia sobre los espacios próximos, exigiendo tributo y sometimiento. (Daltabuit *et al.*, 2005). Calakmul incluía en su pasado templos y adoratorios, juego de pelota, palacios y casas-habitación construidas con piedras labradas (Pronatura *et al.*, 2005). Por otra parte, en el espacio ocupado actualmente por la ZSCE Balam Ku, se tiene registro de dos sitios de importancia: Nadzaca'an y Balam Ku.

Mapa 4.1 Área de estudio

Mapa 4.2 Zonificación áreas protegidas.

En el caso de la ZSCE Balam Kin existieron dos zonas de importancia: Hochob y la denominada El Tabasqueño (SECOL Campeche, 2009).

Posteriormente, durante el Posclásico (1 000-1687 d.C.), las grandes urbes colapsan y la población se dispersa en varias pequeñas aldeas aisladas y sin cohesión, de manera que a la llegada de los europeos estos creían que la selva estaba inhabitada debido a las condiciones de insalubridad, peligro latente de ataque de fieras, altas temperaturas e incomunicación, por lo que el encuentro de los españoles con la población nativa fue en las costas y en el norte de la península, lo que permitió que la escasa población de las selvas del interior siguiera con su forma de vida (Ruz, 1993; en Daltabuit *et al*, 2005).

Algunos investigadores como Jones (1989, en INE-SEMARNAT, 2000) proponen una cifra de población maya en la zona durante la época colonial de alrededor de 20 000 habitantes, los cuales subsistían mediante el cultivo tradicional de la milpa, actividades de cacería, comercio con áreas vecinas y además recibían influencia de la Colonia.

Después de la Conquista, las selvas del interior de Quintana Roo y Campeche fueron territorios inexplorados y de mínimo interés para los españoles por la carencia de yacimientos minerales, sin embargo García Gil (2003) reporta la existencia de vestigios de asentamientos coloniales en la región, como es el casco de una iglesia al sur de Conhuas.

Tras ser ocupada solamente por pequeñas poblaciones con una distribución irregular y en constante movimiento, en los principios del México independiente tuvo lugar la llamada Guerra de Castas en 1847, en la que mayas buscaban establecerse en tierras pacíficas y fuera del yugo y control del gobierno, con lo que las selvas de Campeche, Quintana Roo y Belice sirvieron de refugio y cuartel para los rebeldes. Además, también hubo algunos asentamientos debido a los hatos y centrales chicleras. En adición a esto, existen registros de presencia inglesa para el intercambio de maderas preciosas por armamento y otras mercancías (INE-SEMARNAT, 2000; García Gil, 2003).

Con el establecimiento de Campeche como estado (1857-1863), y con la delimitación de fronteras, el sureste cobró importancia económica. En 1890, el chicle se convirtió en una importante actividad, mientras tanto las actividades forestales eran mínimas, pero para 1913 empezó la época de oro de la explotación de maderas preciosas (INE-SEMARNAT, 2000).

Al empezar el Siglo XX, el gobierno de Porfirio Díaz dio fin a la Guerra de Castas, por otra parte, una de sus principales políticas fue la apertura de diversos sectores al capital extranjero, siendo uno de estos sectores el forestal. De la explotación de maderas y chicle sólo se beneficiaron los terratenientes, ya que estos obtenían la mayor parte de las ganancias y se aprovechaban del conocimiento y necesidad de los mayas (Daltabuit *et al.*, 2005). De las selvas de Calakmul y alrededores se extrajeron millones de toneladas de chicle para exportación, para ello se introdujo a población del estado de Veracruz. Sin embargo, hacia fines de la década de 1930, tras las reformas cardenistas, empresarios campechanos y regionales sustituyeron a los extranjeros en la producción. Posteriormente, la superficie forestal del estado fue dividida en áreas concesionadas a cincuenta empresarios, la consecuencia de esto fue un importante impacto ecológico en las selvas del estado (INE-SEMARNAT, 2000). Los primeros ejidos de Calakmul surgen entre 1927 y 1932, siendo estos Chunchintoc, Conhuas, Constitución y Concepcion (Pronatura *et al.*, 2005).

A mediados del siglo XX se intensifica la extracción del chicle y madera realizada por empresarios de Hopelchén, Campeche y Champotón. El uso de trenes para la extracción de recursos forestales permitió la creación de asentamientos humanos permanentes. A pesar de la existencia de una ley forestal que controla y regula la explotación de los recursos forestales, en la realidad se dio un vertiginoso cambio de uso de suelo debido a la implementación del sistema roza-tumba-quema para la cría de ganado (INE-SEMARNAT, 2000).

El principal interés del gobierno en la zona era su colonización, debido a que en 1970 había 50 000 habitantes en una superficie de más de 50 000 km² (Bassols, 1993, en Daltabuit *et al.*, 2005).

La demanda local y nacional de madera aumentó y con las carreteras y las innovaciones tecnológicas, la industria maderera reemplazó en importancia a la extracción de chicle, siendo el cedro y la caoba los principales objetivos. Además de los impactos por estas actividades, la fauna empieza a estar en constante peligro debido al tráfico de especies y a la cacería furtiva (INE-SEMARNAT, 2000).

En las décadas sesenta y setenta, las políticas oficiales promovieron intensamente la colonización de las selvas basada en la expansión de la agricultura y la ganadería extensiva (Daltabuit *et al*, 2005). Esta política de destrucción trajo consigo mayores cambios en la cobertura forestal; además, como consecuencia, hubo mejores accesos al área, crecimiento de la población y aumento en la presión a flora y fauna, aunque también se han obtenido avances en el conocimiento de la ecología, arqueología, botánica e historia del lugar.

Para 1960, se construye la carretera Escárcega-Chetumal y posteriormente de Xpujil hacia Arroyo Negro y Xcanja, las cuales dividen actualmente a la RBC. Además, por estos años se dieron títulos de propiedad a organizaciones ejidales; sin embargo, la población a la que se les otorgó estos terrenos fue a migrantes provenientes de Veracruz y Tabasco, en una clara política gubernamental de ocupación de tierras para la agricultura y ganadería. La técnica utilizada no fue otra que roza-tumba y quema para la producción de maíz, frijol, calabaza y comercialmente el chile (García Gil, 2003).

Es importante mencionar que entre 1871 y 1990 cerca de 14 tormentas tropicales mayores afectaron el área. La combinación de fuertes vientos y lluvias excesivas afecta los procesos de sucesión de la selva de manera natural. También resultan gravemente afectados los cultivos, se inundan las áreas bajas, y se afectan árboles maduros, con lo que la siguiente estación seca puede causar incendios forestales extensos, además de que se debe tomar en cuenta los continuos fuegos de la quema que se salen de control para el cambio de uso de suelo (INE-SEMARNAT, 2000).

El resultado de todos los elementos de la zona es un complejo mosaico de parches de selva, acahual, agricultura y ganadería, haciendo de Calakmul, Balam Ku y Balam Kin tierra del jaguar, del venado, del tapir, del faisán, de la ceiba, del chechem,

de mayas, migrantes, chicleros, madereros, apicultores, agricultores, ganaderos, ejidatarios, cazadores, aventureros, corporaciones y de científicos.

4.3 Caracterización física, biológica, económica y social.

El objetivo de este subcapítulo es identificar los elementos físicos, naturales y sociales que componen el espacio geográfico y relacionarlos para obtener una breve caracterización de este espacio. Es importante destacar que la escasa edad del territorio (3 000 000 años) en conjunción con la monotonía del relieve hacen de la zona un espacio con poca variedad de nichos ecológicos y diversidad de ambientes terrestres; sin embargo, la cantidad de energía recibida y la presencia de elementos neárticos y neotropicales provocan una riqueza en las formas de vida, funcionando de corredor biológico para ellas. En contraste con esta afirmación de escasez de nichos y hábitats, García Gil *et al* (2002) menciona que los niveles diferenciales de precipitación, densidad de aguadas, relieve y altitud provocan una gran variedad de hábitats para la flora y la fauna, sobre todo al sur de la RBC.

4.3.1 Geología y Geomorfología.

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Provincia Fisiográfica Península de Yucatán, Subprovincia Karst y Lomeríos de Campeche, que alcanzan una altura de 300 m.s.n.m. La mayor altitud de la zona alcanza 380 m, debido a una estructura geológica del Paleoceno de tipo anticlinal y ubicada al sur de Campeche (INE-SEMARNAT 2000; García-Gil, 2003). La escasa presencia de corrientes superficiales perennes, la amplia variedad de dolinas de distinto tamaño, poljes y la presencia de ríos subterráneos ha sido resultado de las condiciones litológicas, estructurales y las características morfodinámicas que han dado lugar a esta morfología kárstica (Lugo, 1999; en García Gil *et al* 2002). Existen afloramientos del mencionado Paleoceno, así como del Cuaternario, Eoceno y Mioceno.

La zona está compuesta por formaciones de rocas calcáreas cubiertas de una capa de caliche. En general, la morfología del terreno tiene pocas deformaciones y tomando en cuenta la naturaleza kárstica del subsuelo se propicia que durante la

temporada de lluvias, extensas superficies permanezcan inundadas, y por el contrario, durante la estación seca, las aguas superficiales sean escasas reduciéndose a pequeñas depresiones de disolución kárstica llamadas aguadas (Gil *et al.*, 2002; tomado de SECOL, Campeche 2009; Reyna Hurtado *et al.*, 2010). Los sistemas de drenaje son el kárstico y el fluvial, yendo principalmente hacia el noroeste y oeste (INE-SEMARNAT, 2000).

Esta región contiene la meseta de Zoh Laguna, con una altitud promedio entre los 200 y 250 m, se extiende dirección norte-sur desde el paralelo 18°50' N, hasta la parte norte del Petén guatemalteco y parte de Belice (Martínez y Galindo-Leal, 2002; en Pronatura *et al.*, 2005). Las mesetas estructurales de desarrollo kárstico cubren aproximadamente el 65% de la superficie, siendo la unidad geomorfológica dominante. Sobre ella se desarrollan valles kársticos por encima de depresiones de origen tectónico. Las laderas forman la vertiente oriental y occidental de la RBC, y están cubiertas por selvas medianas y altas (García Gil *et al.*, 2002).

Por otra parte, los valles de desarrollo kárstico tienen un fondo plano atravesado por escurrimientos superficiales intermitentes. Al sur de la RBC se ha formado un valle de más de 45 km de longitud. En tiempos prehispánicos, en este valle se asentó la antigua ciudad de Calakmul. También existen algunos valles fluviales pequeños que modelan líneas de debilidad tectónica (García Gil *et al.*, 2002).

En la ZSCE Balam Kú, gran parte de ella forma lo que es conocido como meseta kárstica denudatoria erosiva, proceso erosivo y de disolución de formas de circulación corrosivo-erosivas en la zona hidrodinámica y subsuperficial; con disección fluvial, procesos de colonización a gran escala, aproximadamente 50%; además de valles tectónicos kársticos dispersos, aproximadamente 10%. Al centro-norte de la reserva se encuentra un valle en formación, mientras que al noroeste se encuentra una meseta kárstica denudatoria, así como en una porción del suroeste de la ZSCE, representando aproximadamente 10% de su superficie. En el sur, predomina la planicie estructural baja (estable), con aproximadamente 20% del total de la superficie (SECOL Campeche, 2009).

4.3.2 Clima.

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1973), el clima de la RBC es cálido subhúmedo (Aw), con tres subtipos climáticos Aw_0 , Aw_1 , y Aw_2 (x^1). García y March (1990) encontraron que el 10% de la Reserva, a lo largo de la frontera con Guatemala, cae dentro de la zona cálida subhúmeda $Aw_2(x^1)$, el más húmedo de los subhúmedos. El subtipo cálido subhúmedo Aw_1 , intermedio en humedad, comprende el 60% de la zona central de la RBC. El subtipo cálido subhúmedo Aw_0 , el más seco de los subhúmedos, comprende el norte de la RBC (INE-SEMARNAT, 2000). La temperatura media anual es de 22 a 26 °C (García Gil *et al*, 2002).

En cuanto a precipitación, la media anual varía entre 1 200 y 1 500 mm en el centro y va aumentando hacia el sur, donde oscila entre 1 500 y 2 000 mm. El periodo lluvioso es de junio a noviembre, durante los meses secos las vaguadas polares impiden el paso de los vientos alisios, provocando el fenómeno de la canícula, las precipitaciones de invierno ocurren debido a la presencia de frentes fríos provenientes del norte (García Gil *et al*, 2002). Existe una amplia variación en diversas localidades de la RBC, pero en general el promedio del mes más seco es de menos de 60 mm, con un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2%. Los niveles de precipitación son resultado de la interacción de diversos factores como vientos, estacionalidad, oscilaciones a lo largo de los años, por lo que la humedad en la RBC es compleja (INE-SEMARNAT, 2000). En esta área se concentra la mayor cantidad de precipitaciones de la Península de Yucatán, donde se reafirma un incremento del gradiente de la humedad del noroeste al sureste (Pronatura *et al.*, 2005), lo cual influye en la distribución de la vegetación y la fauna, además de que se considera como un factor que ha incidido en la escasa población en el tiempo, ya que aunado a las condiciones, no existe gran disponibilidad de cuerpos de agua en todo el año.

4.3.3 Suelo.

Los suelos de las laderas y de las partes altas corresponden a una asociación de litosoles (*tzek'eles*) y rendzinas, con profundidades de 10 y 30 cm respectivamente, siendo suelos poco desarrollados y jóvenes, teniendo solamente horizontes A y C, con

alta pedregosidad e influencia del material parental. Los litosoles y rendzinas ocupan una superficie aproximada de 82.5% de la RBC (García Gil *et al*, 2002).

Sobre extensas planadas se forman suelos de 60 cm hasta un metro de profundidad, correspondientes a vertisoles (*ak'alches*) y gleysoles (*ya'ax homes*) con niveles fluctuantes de los mantos freáticos (INE-SEMARNAT, 2000).

En valles y depresiones inundadas e inundables separadas por colinas bajas se forman gleysoles de variantes cálcicas, sálicas, sódicas e hísticas. Hacia la periferia se encuentran vertisoles, mientras que en las partes altas y laderas se desarrollan asociaciones de litosoles y rendzinas. Los suelos presentes en los bajos inundables y cerca de las aguadas se relacionan con la cantidad de agua que mantenga el perfil del suelo y con el tiempo que permanezcan inundados, estando presentes los gleysoles. Estos últimos y los vertisoles ocupan el 17.5% de la superficie de la RBC (García Gil, 2002).

El material parental de los suelos es roca caliza, de dureza blanda y composición mineral de carbonato de calcio y pobre en hierro, sílice y aluminio. Los contenidos de materia orgánica son muy altos, la fertilidad depende de tales contenidos.

4.3.4 Vegetación.

La zona de estudio cuenta con los siguientes tipos de vegetación: selvas altas y medianas perennifolias y subperennifolias, selvas medianas subcaducifolias, selvas bajas caducifolias o *tzekelares*, selvas bajas inundables y sabanas (Pronatura *et al.*, 2005). Sin embargo, las extensiones de selva van transformándose con el avance de la frontera agropecuaria.

Selva Alta y Mediana Perennifolia y Subperennifolia.

Las selvas altas son comunidades vegetales que se caracterizan por tener especies dominantes que tienen 25 m o más de altura y algunos emergentes de hasta 40 m, además de que son pocas las especies que pierden sus hojas durante un tiempo variable en la época de secas (25%). Pronatura *et al.* (2005), reportan escasa presencia en la zona, distribuida al sur en la frontera con Guatemala y algunos manchones

pequeños al norte. Se les encuentra en relieves ondulados y planicies con pendiente entre 1 y 12%, por lo tanto en tipos de suelo con buen drenaje, presentándose en la RBC en las rendzinas (INE-SEMARNAT, 2000). En el sur se encuentran suelos mejor desarrollados y con buen drenaje, además de que es donde ocurren las precipitaciones más abundantes de la zona (García Gil *et al*, 2003). Por su parte, la selva mediana subperennifolia es la de mayor distribución en la RBC, localizándose en todo tipo de relieve a excepción de lugares con drenaje deficiente, y a diferencia de la selva alta requiere menor humedad, tirando las hojas entre un 25 y 50% de sus elementos (INE-SEMARNAT, 2000, García Gil *et al*, 2003). Además, existe lo que se puede considerar como selva baja subperennifolia cuya composición es similar a la de la selva mediana, sin embargo el viento y escaso desarrollo del suelo no permite que los árboles se desarrollen plenamente.

Se encuentran caracterizados por el chicozapote (*Manilkara zapota*), caoba (*Swietenia macrophylla*), ramón (*Brosimum alicastrum*), bayo (*Aspidosperma sp.*), tzalam (*Lysiloma latisiliqua*), guaya (*Talisia olivaeformis*), kakaoché (*Alseis yucatanensis*), sac-chacá (*Dendropanax arboreus*), chaká (*Bursera simaruba*), amapola (*Pseudobombax ellipticum*), cedro (*Cedrela odorata*), zapote mamey (*Pouteria sapota*), entre otros.

Selva Mediana Subcaducifolia.

Los árboles de estas comunidades alcanzan alturas entre los 15 y 25 m, y cuando menos la mitad de las especies arbóreas deja caer sus hojas durante la época de secas; sin embargo, quedan muchos componentes siempre verdes y otros sólo defolian un corto periodo de tiempo. Pronatura *et al.* (2005), reporta la presencia de este tipo de vegetación en casi toda la zona. Se distribuye en suelos poco desarrollados como rendzinas, en planicies, mesetas y laderas, dejándolos fuera de las inundaciones. Su distribución es mayor en el norte más seco, se desarrolla un estrato arbustivo de aproximadamente 3 m de altura (García Gil *et al*, 2003).

Se distinguen cinco tipos de asociaciones vegetales: selva de guayacán, selva de xu'ul de montaña, selva de despeinada, selva de jobillo y selva de ja'abin (INE-SEMARNAT, 2000).

Las especies más características son el machinche (*Lonchocarpus castiloi*), jobillo (*Astronium graveolens*), jabín (*Piscidia piscipula*), guayacán (*Guaiacum sanctum*), chaká (*Bursera simaruba*), chechem negro (*Metopium brownei*), entre otras.

Selva baja caducifolia y subcaducifolias.

Estas comunidades tienen una altura de dosel de 5 a 15 m, con especies caducifolias y subcaducifolias, del 50 al 75% de las especies pierden sus hojas en la temporada seca. De acuerdo con Pronatura *et al.* (2005), se distribuye en la parte norte de la zona, particularmente a lo largo de la parte occidental de la meseta y en los cerros con poco desarrollo de suelo de la ladera nor-occidental. Además se distribuye sobre algunos lomeríos y planicies intermedias en suelos muy drenados y zonas semi-secas de la RBC.

Las especies características son el chaká (*Bursera simaruba*), jabín (*Piscidia piscipula*), guayacán (*Guaiacum sanctum*), tzalam (*Lysiloma latisiliqua*), yaité (*Gliricidia sepium*), bromelias, entre otras.

La selva baja inundable se distribuye de manera fragmentada por toda el área, en especial en sitios donde el drenaje es deficiente, y en lugares donde los suelos tienen pendientes > 1%, suelos denominados *ak'alche'*, que son de pobre drenaje y muy arcillosos (Ruiz *et al.*, 2000; en Pronatura *et al.*, 2005), por lo que los árboles no sobrepasan los 10 m (INE, 2000). Las especies palo de tinte (*Haematoxylon campechianum*), el chechem negro, el pucté, la uva de monte (*Coccoloba cozumelensis*), *Mimosa bahamensis*, entre otros, son característicos de estas comunidades (INE-SEMARNAT, 2000).

Existe concordancia entre las selvas bajas inundables y selvas bajas subperennifolias; sin embargo, en algunos trabajos se ha encontrado como tipos de vegetación diferentes y en otros como la misma, las especies de estas comunidades no pierden sus hojas en la magnitud de la selva baja caducifolia.

Sabanas.

Es una comunidad dominada por hierbas y arbustos, teniendo como especies dominantes a las gramíneas y ciperáceas del estrato herbáceo. De acuerdo con Pronatura *et al.* (2005), su distribución es reducida y dispersa, encontrándose en la ladera oriental de Calakmul, en lugares con pendientes moderadas o lugares planos y en suelos con una alta acumulación de sales.

A esta comunidad la caracterizan arbustos como el nance (*Byrsonima crassifolia*), *Pinus caribea*, *Byrsonima bucidaefolia*. Además de la palma tasiste' (*Acoelorrhaphes wrightii*), zapote, chechem negro y el tachitón (*Crescentia cujete*)

Vegetación acuática y subacuática.

La vegetación de las aguadas está conformada por hidrófilos herbáceos que no sobrepasan los 60 cm de altura, entre los cuales están especies como *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*, *Nymphaea ampla*-*Salvinia auriculata*, *Thypha domingensis* y *Claudium jamaicensis*. De acuerdo con el INE-SEMARNAT (2000), tiene un cubrimiento de alrededor de 15% de la RBC, encontrándose en las aguadas y zonas inundables.

En adición a estos tipos de vegetación, existe una cada vez mayor presencia de vegetación secundaria en los denominados *acahuales*, ligados sobre todo a los sistemas de roza-tumba-quema. Incluyen a la vegetación secundaria herbácea (de 1 a 3 años), arbustiva (de 3 a 10 años) y arbórea (de más de 10 años).

4.3.5 Fauna.

En este subcapítulo se hace una breve revisión de la fauna de la zona de estudio, puesto que varias especies tienen importancia para el consumo de subsistencia de los pobladores de las localidades, además de ser objeto de cacería y tráfico ilegal y pérdida del hábitat.

Se tienen contabilizadas 18 especies de peces en la RBC, teniendo mayor presencia las especies conocidas como *sardinita blanca* (*Astyanax fasciatus*) y el pez boca de fuego (*Cichlasoma meeki*). Los peces mayor apreciados para su consumo son el cíclido de cabeza roja (*Cichlasoma synspilum*) y la tenguayaca (*Petenia splendida*). La

ictiofauna depende del régimen de inundación estacional, por lo que en época de secas las poblaciones tienden a reducirse (INE-SEMARNAT, 2000).

Los organismos acuáticos presentes en cenotes, galerías acuáticas subterráneas y aguadas se encuentran aislados, sin posibilidad de dispersión, lo que permite la presencia de endemismos en la zona así como en los ecosistemas similares de Yucatán y Quintana Roo (INE-SEMARNAT, 2000).

Se estima que la región presenta 512 especies de vertebrados terrestres (SECOL Campeche, 2009). En cuanto a anfibios y reptiles, se han contabilizado 16 de los primeros y 50 de los segundos para la RBC, la mayoría de ellas encontrándose también a lo largo del Golfo de México y tierras bajas del Caribe, por lo que muy pocas son endémicas a la Península de Yucatán. Debido a la limitante de precipitación en la zona, la distribución de las especies que requieren de agua se restringe a las aguadas. Entre los anfibios registrados, INE (2000) menciona al sapo de hábitos excavadores (*Rhinophrynus dorsalis*), sapo común (*Bufo valliceps*), sapo gigante (*Bufo marinus*), ranas de lluvia (*Leptodactylus labialis* y *L. melanonotus*), rana de hojarasca (*Hypopachus variolosus*), ranas arborícolas de la familia Hylidae, la rana pico de pato (*Tripurion petasatus*), la cual es endémica de la zona, entre otras.

Entre los reptiles presentes en la zona se encuentran el cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreleti*), tortugas monjita (*Rhinoclemmys areolata*), pochitoques o casquitos (*Kinosternon* spp.), jicotea (*Trachemys scripta*), lagartijas arborícolas (*Anolis* spp.), lagartijas escamosas (*Sceloporus* spp.), esquinco (*Mabuya brachypoda*), toloque (*Basiliscus vittatus*), turipache (*Corytophanes cristatus*), laemancto (*Laemanctus serratus*), escorpión (*Coleonyx elegans*), boa (*Boa constrictor*), petalilla (*Drymobius margaritiferus*), bejuquilla (*Oxybelis fulgidus*), cordelilla (*Imantodes cenchoa*), coralillo (*Micrurus diastema*), nauyaca (*Bothrops asper*), cascabel (*Crotalus durissus*), entre otros. Varias de estas especies se encuentran catalogadas como raras y requieren protección especial según la NOM 059-ECOL/1994.

En cuanto aves, el registro es de más de 300 especies, de las cuales el 79% son residentes y 21% son migratorias. De estas últimas, el 66.6% son residentes en invierno, 26.6% en primavera y otoño y 6.6% son de verano. (INE-SEMARNAT, 2000).

Varias de las especies se encuentran bajo algún nivel de riesgo según la NOM 059-ECOL/1994.

Entre las especies residentes se encuentran el tolobojo enano (*Hylomanes momotula*), el saltapared guatemalteco (*Sclerurus guatemalensis*), el mosquero moteado (*Platyrrhynchus cancrinus*). Por las migratorias son comunes el mirulincillo (*Catharus ustulatus*), el verderón (*Oporornis philadelphia*), el jilguero (*Hylocichla mustelina*) y el alegrín (*Helmitheros vermivorus*). Dentro de las rapaces, existen registros de gavián caracolero (*Rostrhamus sociabilis*), pico de gancho (*Chondrohierax uncinatus*), gavián pajarero (*Accipiter striatus*), gavián de Cooper (*Accipiter cooperii*), gavián aplomado (*Ictinia lúmbea*), cernícalo (*Falco sparverius*), aguililla tirana (*Spizaetus tyrannus*), el raro guincho (*Spizastur melanoleucus*), entre otros. En cuanto a búhos están ampliamente distribuidos el tecolote vermiculado (*Otus guatemalae*), tecolote pigmeo (*Glaucidium brasilianum*), búho o lechuza café (*Ciccaba virgata*), entre otros. Las especies más ampliamente distribuidas de la zona son el zopilote negro (*Coragyps atratus*), aura común (*Cathartes aura*), zopilote rey (*Sarcoramphus papa*), aguililla caminera (*Buteo magnirostris*) y halcón huaco (*Herpetotheres cachinnans*) (INE-SEMARNAT, 2000).

En cuanto a mamíferos, la zona de estudio es uno de los últimos refugios para muchas de ellas. Se tienen registros de alrededor de cien especies, entre ellas seis de las siete especies de marsupiales, dos de las tres de primates, dos de los cuatro de edentados y cinco de los seis felinos. La mastofauna de Calakmul está estrechamente asociada a la selva en buen estado, por lo que su conservación es básica para mantener la alta diversidad biológica.

Entre las especies presentes se encuentran los tlacuaches, con presencia de *Didelphis marsupialis*, *D. virginianus*, *Phillander oposum*, *Caluromys derbianus*, *Marmosa mexicana* y *M. canescens*. Los quirópteros son el grupo mejor representado, incluyendo murciélagos carnívoros, frugívoros, hematófagos y piscívoros, ocupando un importante papel en el control de poblaciones de insectos y la polinización y dispersión de semillas. Los primates presentes son el mono aullador negro (*Alouatta pigra*) y el mono araña (*Ateles geoffroyi*), ambas especies en situación de amenaza de extinción.

Dentro de los edentados se encuentran presentes aunque de manera no muy abundante el armadillo (*Dasytus novemcictus*) y el oso hormiguero arborícola (*Tamandua mexicana*). Alrededor de quince roedores habitan la zona de estudio, siendo dos ardillas, una tuza, siete ratas y ratones, y tres de los seis grandes roedores del país, el puerco espín (*Coedou mexicanus*), el tepezcuintle (*Agouti paca*) y el sereque (*Dasyprocta punctata*) (INE-SEMARNAT, 2000).

Después de los quirópteros, el siguiente Orden con mayor número de especies en la zona son los carnívoros, encontrándose un canino, cuatro prociónidos, seis mustélidos y cinco felinos. El canino presente corresponde a la zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), especie que se ha visto beneficiada por la perturbación de la selva. Dentro de los prociónidos, con hábitos omnívoros y capaces de trepar árboles, el más abundante es el coatí (*Nasua nasua*). Los mustélidos están presentes con seis especies, varias de ellas apreciadas por su fina piel. Los felinos presentes son el yagouarundi o leoncillo (*Herpailurus yagouaroundi*), el tigrillo o margay (*Leopardus wiedii*), el ocelote (*Leopardus pardalis*), el puma (*Puma concolor*) y el jaguar (*Panthera onca*). Todos ellos están en constante peligro debido a la cacería furtiva, sin embargo existe mayor presión por el jaguar, el ocelote y el tigrillo. Es probable que la mayor densidad de jaguares en el país se encuentre en la RBC (INE-SEMARNAT, 2000).

Dentro del Orden Perissodactyla, la única especie presente en la zona y en el país es el tapir (*Tapirus bairdii*). El Orden Artiodactyla está presente con el pecarí de collar (*Tayassu tajacu*), el pecarí de labios blancos (*Tayassu pecari*), el venado temazate (*Mazama americana*) y el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) (INE-SEMARNAT, 2000).

La distribución las especies que dependen de las aguadas es influenciada por factores como su tamaño y profundidad, cantidad de agua, altura y tipo de vegetación asociada. Sólo las aguadas grandes como Calakmul, Dos Lagunas, Xchumpich y Dos Banderas se alimentan de agua de flujos subterráneos y por lo tanto no se secan a diferencia de las zonas inundables, lo que permite la presencia de varias especies a lo largo de todo el año.

La población de las localidades suele consumir como alimento al armadillo, venados, pecaríes, tepezcuintle e incluso tlacuaches. La mayoría de ellos requieren de un buen estado de conservación de la selva para su subsistencia, aunque el tepezcuintle es abundante aún en las zonas cercanas a las localidades (INE-SEMARNAT, 2000). Por otra parte, la mayoría de las especies se encuentran en constante presión debido a los cambios de uso de suelo, lo que lleva a la pérdida de su hábitat.

4.3.6 Hidrografía.

La combinación de diferentes condiciones pudo haber determinado los rasgos hidrológicos de la Reserva, dentro de estas condiciones se debe mencionar al tipo de roca y sedimentos, historia geológica y cambios climáticos. Los cuerpos de agua están determinados por la cantidad y distribución de la precipitación pluvial, la evapotranspiración de la vegetación, los suelos y el drenaje de la superficie (INE-SEMARNAT, 2000). Por tratarse de karst, la superficie tiene una alta permeabilidad, que resulta en escurrimientos superficiales intermitentes. En las zonas de permeabilidad nula se forman aguadas (dolinas) que sirven de fuente de agua para la mayoría de las especies en la época seca. En la parte norte del área hay un mayor número de aguadas (868) respecto al sur (485); sin embargo, son temporales y de menor tamaño. Las aguadas del sur son permanentes pero se presentan con menor frecuencia (García Gil, 2002; García-Frapolli, 2003; en Pronatura *et al.*, 2005).

La calidad del agua se considera mala debido al exceso de sulfatos de calcio, de manera que no es recomendable para el consumo humano, lo que restringe las fuentes disponibles a las aguas pluviales almacenadas en cisternas o aguadas (García Gil *et al.*, 2002).

La mayor parte de la superficie de la zona de estudio tiene permeabilidad alta debido a las rocas calizas, por la misma razón, el desarrollo del sistema fluvial superficial es de baja integración.

4.3.7 Aspectos sociodemográficos.

En el municipio de Calakmul se encuentra ubicada la mayor parte de la zona de estudio. Este municipio cuenta con una superficie aproximada de 14 116 km², y está formado por 159 localidades (Gobierno de Calakmul, 2012). De acuerdo con el INEGI (2010), la población total es de 26 882 habitantes, siendo mujeres 13 235 y 13 647 hombres, con una mediana de edad de 19 años. La tasa de crecimiento de 2000 a 2010 fue de 16%, debido a que el municipio tiene un alto índice de nacimiento y alta inmigración. Del total de la población, alrededor del 90% es rural (localidades de menos de 2 500 habitantes) y alrededor del 10% es urbana (localidades con 2 500 habitantes o más) (INEGI, 2001; en Pronatura *et al.*, 2005). Las principales comunidades de acuerdo a su tamaño son Xpujil, Constitución, Zoh Laguna, Pablo García, Xbonil, Ricardo Payró, Nuevo Conhuas, Los Ángeles, General Manuel Castillo Brito y Gustavo Díaz Ordaz.

La migración ha sido un fenómeno recurrente en el estado, siendo una política federal durante y posterior a la mitad de siglo XX. El 79% de la población del estado es originaria de ahí, el 21% es proveniente de Tabasco, Veracruz, Yucatán y Chiapas. La dinámica de la población ha sido resultado de la política colonización de las selvas para su transformación en campos de cultivo y ganadería

El municipio de Calakmul cuenta con 5 901 viviendas, con un promedio de habitantes de 4.55; sin embargo, existe alto porcentaje de estas viviendas carece de servicios básicos (Pronatura *et al.* 2005; INEGI, 2010).

De acuerdo con García Gil (2003) dentro del polígono de la RBC hay 38 localidades donde viven más de 700 personas, provenientes principalmente de Chiapas, Veracruz, Tabasco y Michoacán, aunque el INE-SEMARNAT (2000) ha reportado al menos 72 asentamientos. García Gil (2003) afirma que la baja densidad demográfica en las selvas de Calakmul se debe a la escasa disponibilidad de agua, ya que las aguadas suelen tener capacidad limitada, lo que resulta en el reducido número de pobladores en las localidades, sin embargo se toman medidas para solventar esta situación, en algunos casos se dota del líquido mediante camiones cisterna o mediante

la construcción de jagueyes y obras hidráulicas mayores como tubería y estaciones de bombeo para extraer agua de la laguna de Alvarado.

La población dentro de la RBC se ubica principalmente en su porción occidental, a lo largo de la carretera Xpujil hacia el norte y hacia el sur. A diferencia de la cantidad reportada por García Gil (2003), el INE-SEMARNAT (2000) reporta 3 901 habitantes dentro de los límites de la RBC, alrededor de 6 500 viven en los límites pero sus ampliaciones forestales se encuentran dentro de la RBC, y alrededor de 13 000 vive alrededor de ella.

4.3.8 Grupos étnicos.

Del total de la población del municipio de Calakmul, sólo el 20.3% habla alguna lengua indígena, las principales son el chol, tzeltal, maya yucateco y tzotzil (Pronatura *et al.*, 2005). Dentro de la RBC los grupos étnicos principales son el chol, maya y tzeltal. Los choles son la etnia que tiene mayor parte de su territorio dentro de la RBC, sin embargo los mayas son la etnia que mayor superficie de ANP ocupa. En el cuadro 4.1 Grupos étnicos dentro de la RBC se aprecia la superficie total de estas tres etnias, así como su territorio dentro de la RBC.

Grupo étnico	Superficie total territorio indígena (ha)	Superficie territorio indígena dentro de RBC (ha)	% territorio indígena dentro de RBC
Maya	6 928 371	33 689	2.349
Tzeltal	821 584	2 456	0.299
Chol	698 371	162 747	4.824

Cuadro 4.1 Grupos étnicos dentro de la RBC. Se aprecia que la etnia con mayor distribución en la RBC es la chol, debido que aunque tiene una menor distribución total que los mayas y tzeltales, abarca más espacio de la RBC, por lo cual es su principal etnia. (Elaborado con base en Toledo (2009).

4.3.9 Actividades económicas.

La población se dedica predominantemente a las actividades primarias, posteriormente a las terciarias y con menor importancia a las secundarias (INE-SEMARNAT, 2000). La principal actividad es la agricultura, extendida por gran parte de

la zona como elemento cultural y productivo. Se siembra maíz, frijol, calabaza, chile, chihua, pepita, camote, cítricos, yuca, entre otros. Dentro de la silvicultura se utiliza al zapote, la chaya (*Cnidocolus chayamansa*), el nance (*Byrsonima crassifolia*), entre algunos otros. La milpa es el centro de subsistencia para varias familias, su tamaño promedio es de tres a cuatro hectáreas. De acuerdo con el INE-SEMARNAT (2000), la ganadería aún no se ha extendido; sin embargo, ha sido una de las principales actividades desde las políticas de colonización de las décadas pasadas, llevándose a cabo de manera extensiva. Además, se llevan a cabo otras actividades primarias como pesca, cacería de subsistencia, extracción de miel y comercio. Dentro del sector terciario sólo está empleado 2.7% de la población (Pronatura *et al.*, 2005).

Históricamente, las actividades económicas han tenido como base los recursos presentes en la selva, explotándolos a escala local sin que hubiera un gran impacto. Además hay que considerar que aunque las actividades en general han sido muy selectivas centrándose principalmente en la extracción de chicle y maderas preciosas, en las últimas décadas las necesidades de la sociedad industrial y consumista, en principio externas a las localidades de la zona, han provocado presión sobre los recursos. El anterior escaso uso de los recursos de la selva se debió en parte a las características físicas difíciles para la habitación y a la falta de capacidades tecnológicas de la población, hechos que permitieron en parte la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, el cada vez mayor acceso a las nuevas tecnologías y una constante necesidad de consumo de sociedades externas han repercutido en la biodiversidad de la selva, y donde la escasez de agua ya no es un obstáculo para la explotación de recursos. Por citar un ejemplo, el jaguar ha disminuido sus poblaciones debido a su cacería furtiva para la comercialización de su piel, y así otras especies que son blancos directos del consumo, y otras que indirectamente son afectadas.

Una actividad que está en crecimiento y cuenta con el interés de cierta población es la apicultura, que tiene un amplio potencial económico debido a la alta diversidad de plantas con flores. El INE-SEMARNAT (2000) reporta alrededor de 4 500 apiarios en el eje norte-sur de la RBC.

Respecto a la extracción del chicle, en el pasado fue la principal actividad, sin embargo ha perdido importancia debido a los materiales sintéticos con los que ahora se produce dicho producto. Aún existe cierto mercado, sobre todo japonés, al que se le vende chicle orgánico producido a través del árbol del chico-zapote.

La cacería es una actividad de importancia para algunas familias, ya sea como alimento o venta de pieles u otros productos derivados; sin embargo, no respetan vedas o número de ejemplares cazados. Al aumentar la población o exterminar especies localmente, deben penetrar más a la selva. Una especie de gran interés es el anteriormente emblemático y venerado jaguar, el cual es cazado por su piel o “deportivamente”, cazando además a las especies encontradas en el camino (INE-SEMARNAT, 2000).

Referente a las actividades terciarias, se debe mencionar la potencialidad del turismo, ya que, como se ha escrito, la zona de estudio es parte del gran legado maya, muestra de ello son las numerosas ruinas, que son testigos del antiguo esplendor de la civilización. En la zona de estudio existen aproximadamente 525 sitios arqueológicos, entre los más importantes se encuentran Calakmul, Xpujil, Hormiguero, Becán, Chicaná, Balam Ku, Nadzaca’an, Kohunlich, Dzibanche, Alacranes y Río Bec, (García Gil, 2003). El potencial turístico es amplio; sin embargo, aún no se ha desarrollado completamente, lo que ha permitido que los recursos no estén tan presionados.

El uso de suelo en el municipio de Calakmul está ocupado en su mayoría por la selva, en la Figura 4.1, se presenta la superficie del uso del suelo en km²

4.3.10 Diagnóstico.

De acuerdo con García Gil (2003), las amenazas que enfrenta la zona son la carencia de una adecuada planeación regional con una visión a largo plazo que permita resolver, entre otros problemas, las demandas sociales de tierras para la subsistencia por parte de los familias de los colonos ya establecidos como de nuevos. El proceso de colonización humana anárquico y la transformación del espacio en grandes con distinto uso al natural, resulta irremediablemente en la fragmentación y reducción de la selva con la consecuente pérdida de biodiversidad. A pesar de la existencia de un

plan de manejo y de que es una de las áreas protegidas más importantes del país, no está exenta de un futuro problemática y con tendencia a la fragmentación debido a constantes presiones provenientes de actores con intereses comerciales no locales, además de la mayor demanda de recursos por parte de los habitantes locales.

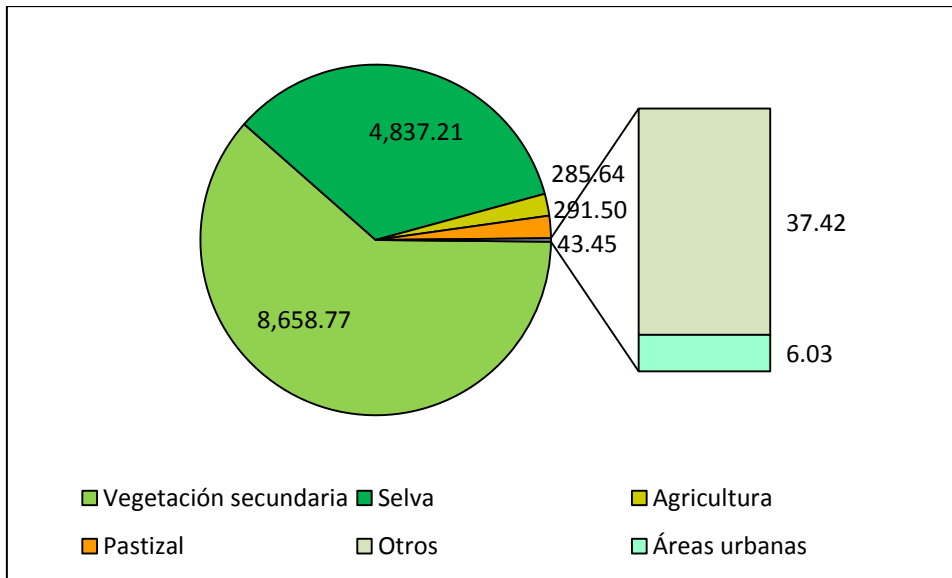


Figura 4.1 Usos de suelo del municipio de Calakmul (elaborada sobre la base de INEGI, 2005).

Los efectos del cambio climático global son diferentes en cada lugar, pero lo que se puede esperar son cambios en el régimen de precipitación, lo que conlleva a alteraciones en la distribución de las especies o la invasión de ellas a localidades humanas donde corren peligro de ser cazadas; cambios en la migración de las especies, cambios en la fenología de las especies, entre otros efectos.

Por otra parte, la SECOL-Campeche (2009) reporta invasiones y migraciones de colonos en la porción oeste de Balam Ku, que colinda con Candelaria y Escárcega, siendo los migrantes en su mayoría indígenas y campesinos que tienen como modo de subsistencia la agricultura.

De acuerdo a la investigación llevada a cabo por Pronatura *et al.* (2005), el desarrollo y mantenimiento de carreteras o infraestructura para servicios y la conversión a agricultura/ganadería, desarrollo de prácticas forestales y extracción selectiva de flora y fauna han sido las amenazas que mayor daño han ocasionado a nivel especies y comunidad-ecosistema. La presencia de la carretera federal No. 186,

que divide a las ANP's en dos, lleva consigo fragmentación de los ecosistemas, que en un futuro podría provocar la división de la RBC y la ZSCE Balam Ku en dos partes.

A pesar de estas problemáticas y de un futuro poco alentador, la RBC y las ZSCE Balam Ku y Balam Kin son uno de los últimos santuarios de la naturaleza, manteniendo aún relativamente amplias extensiones de selva conservada, por lo que se convierte en una de las últimas oportunidades para el manejo sustentable y sostenible de la biodiversidad. Es fundamental que el geógrafo esté involucrado en las investigaciones y divulgación de esta compleja interacción.

Capítulo V. Materiales y método.

5.1 Materiales.

Para la elaboración de esta tesis se utilizaron como insumos imágenes satelitales, cartas topográficas y cartografía temática realizada en trabajos previos. En el caso de las imágenes satelitales es importante señalar que el estudio estaba contemplado para realizarse completamente con imágenes SPOT del 2005 y 2012, diversas causas impidieron que se realizase con estos insumos. Entre estas causas está el incompleto cubrimiento de las imágenes disponibles para la fecha requerida, lo que obligó a extender la búsqueda a otras fechas, específicamente para 2004 y sobre todo para 2003, año en el que se encontraron imágenes adecuadas en cuanto a escasa presencia de nubosidad. Esta mezcla de imágenes tuvo como consecuencia que se tuvieran varias fechas para el análisis. A pesar de esto, se contemplaban y se procedió al protocolo de solicitud a la Secretaría de Marina (SEMAR). Tras la espera oficial, la solicitud llegó incompleta ya que no se contaba con que la relación entre SEMAR y SPOT es posterior al 2004, con lo que el pedido de las imágenes de 2003 quedaba anulado, además de que algunas de las imágenes presentaban problemas de nubosidad, a pesar de que la búsqueda estuvo restringida a máximo 10% de nubosidad. Tras esto, se decidió utilizar imágenes Landsat, por lo que se prosiguió a su búsqueda en las fechas requeridas. El sensor Landsat ETM+ lleva captando imágenes con errores debido a la presencia de bandas negras por toda la escena, tras descartarse algún método de corrección de estas líneas negras se decidió ampliar la búsqueda al sensor Landsat TM. Tras la revisión, las imágenes que más se aproximaron a cumplir con los requerimientos de fecha y nubosidad fueron las siguientes:

Sensor	Resolución (m)	Path	Row	Fecha de toma	Azimet Sol	Elevación Sol
TM	30	20	47	22/03/2001	117.166	54.866
TM	30	20	48	22/03/2001	115.108	55.297
TM	30	20	47	26/01/2010	140.533	42.655
TM	30	20	48	26/01/2010	139.437	43.610

Las imágenes SPOT obtenidas fueron utilizadas para actualizar las coberturas de los resultados obtenidos con Landsat y como insumo para verificar las clasificaciones.

Las imágenes SPOT que fueron solicitadas fueron las siguientes, en cursiva se muestran las imágenes del 2003 que no llegaron:

Satélite	Resolución (m)	Modo Espectral	K	J	Fecha de toma
<i>SPOT 4</i>	<i>20</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>608</i>	<i>312</i>	<i>04/03/2003</i>
<i>SPOT 4</i>	<i>20</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>609</i>	<i>313</i>	<i>04/03/2003</i>
<i>SPOT 4</i>	<i>20</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>608</i>	<i>314</i>	<i>25/04/2003</i>
<i>SPOT 4</i>	<i>20</i>	<i>Multiespectral</i>	<i>608</i>	<i>313</i>	<i>25/04/2003</i>
SPOT 2	20	Multiespectral	607	312	11/01/2004
SPOT 2	20	Multiespectral	607	313	19/04/2004
SPOT 2	20	Multiespectral	607	314	04/01/2005
SPOT 5	10	Multiespectral	608	312	29/03/2011
SPOT 5	10	Multiespectral	608	314	25/05/2011
SPOT 5	10	Multiespectral	608	313	25/05/2011
SPOT 4	20	Multiespectral	607	312	25/03/2012
SPOT 4	20	Multiespectral	607	314	25/03/2012
SPOT 4	20	Multiespectral	609	314	20/04/2012

Las cartas topográficas digitales 1:50000 de INEGI utilizadas fueron: E16A41, E16A42, E16A51, E16A52, E16A53, E16A61, E16A62, E15B79, E16A71, E16A72, E15B89, E16A81, E16A82, E15D19, E16C11, E16C12 Y E16C13.

También se utilizaron como guía las coberturas de INEGI escala 1: 1 000 000, de red de caminos, localidades rurales, límites estatales y uso de suelo y vegetación, descargadas desde su página de internet. Además, los polígonos de las áreas protegidas y de la zonificación de la RBC fueron obtenidas de la página de la CONANP. Las zonificaciones de la ZSCE Balam Kú y Balam Kin fueron obtenidas y digitalizadas del plan de manejo de cada una de ellas de la SECOL de Campeche. La mayoría de los caminos que no incluidos en el archivo de INEGI fueron obtenidos a través del aporte de Gerardo García Contreras así como de la actualización realizada en este trabajo. También se utilizó cartografía elaborada por Gerardo García Gil (2003) y Gerardo García Contreras (2005) para ayudar a identificar las zonas de entrenamiento.

Los procesos de este trabajo se realizaron con los software *Arc Gis 9.3*, *ENVI 4.7* y *Quantum Gis 1.8*

5.2 Método.

Los métodos utilizados en esta tesis pueden dividirse en seis partes: la primera referida al método utilizado para completar el archivo digital de caminos necesario para el análisis de cambio de cobertura forestal. La segunda abarca el pre-procesamiento de las imágenes, que incluye las técnicas para preparar estos insumos antes de la clasificación digital. La tercera trata los procesos en las imágenes antes señalados, es decir la selección de las regiones de interés y la aplicación de clasificación supervisada usando diferentes criterios. La cuarta parte incluye la verificación de los resultados del procesamiento de imágenes. La quinta parte del método trata lo relativo a la adquisición de la información de especies que cruzan caminos o que son atropelladas en ellos, lo que requiere trabajo de campo. La sexta y última parte del método se refiere a la interpretación visual de las imágenes SPOT para actualizar las coberturas a 2012 y el análisis de los resultados para la obtención de los productos finales

5.2.1 Obtención de la red de caminos de la zona de estudio.

La red de caminos actualizada es necesaria para el análisis del cambio de cobertura forestal asociado a los caminos. Para obtener este insumo, se dispuso de varios *shape files* elaborados por García Contreras *et al.* Al tener estos archivos como base se procedió a su actualización mediante el uso de imágenes de *Google, Bing y Yahoo*, y su digitalización en el *software Quantum Gis 1.8*. Debido a la baja resolución de estas imágenes, con esta técnica es imposible detectar caminos cuya área es demasiado pequeña, por lo que brechas y veredas son difíciles de visualizarse y agregarse al archivo de caminos. Al tomar en cuenta esto, se procedió a utilizar el complemento de *Quantum Gis* llamado *Open Layers Plugin*, desde el cual se agregan las capas de imágenes de *Google, Bing y Yahoo*. Esta metodología fue proporcionada por Gerardo García Contreras. La identificación del tipo de camino se realizó interpretando la forma de éste, el ambiente en el que se encontraba y los caminos encontrados alrededor.

5.2.2 Pre-procesamiento de las imágenes.

Para el pre-procesamiento de las imágenes Landsat se aplicaron correcciones radiométricas y atmosféricas. La corrección geométrica no se realizó en Landsat puesto

que estas modifican los valores originales de la imagen, además de que al comparar las imágenes multitemporales se comprobó que no muestran desplazamiento, por lo que no es necesario aplicar esta corrección a ninguna de las imágenes Landsat. Únicamente las imágenes SPOT requirieron corrección geométrica. La corrección radiométrica implica la transformación de los ND de la imagen a valores de radiancia y reflectancia, por lo que para ello se utilizó el *software ENVI 4.7*, el cual incluye técnicas para realizar este proceso. La corrección atmosférica utilizada se basó en el método *Dark Substract*, el cual también viene incluido en el *software ENVI 4.7*. Por su parte, las imágenes SPOT fueron corregidas geométricamente (véase Figura 5.1) para que tuvieran una adecuada sobreposición con las imágenes Landsat y con los resultados.

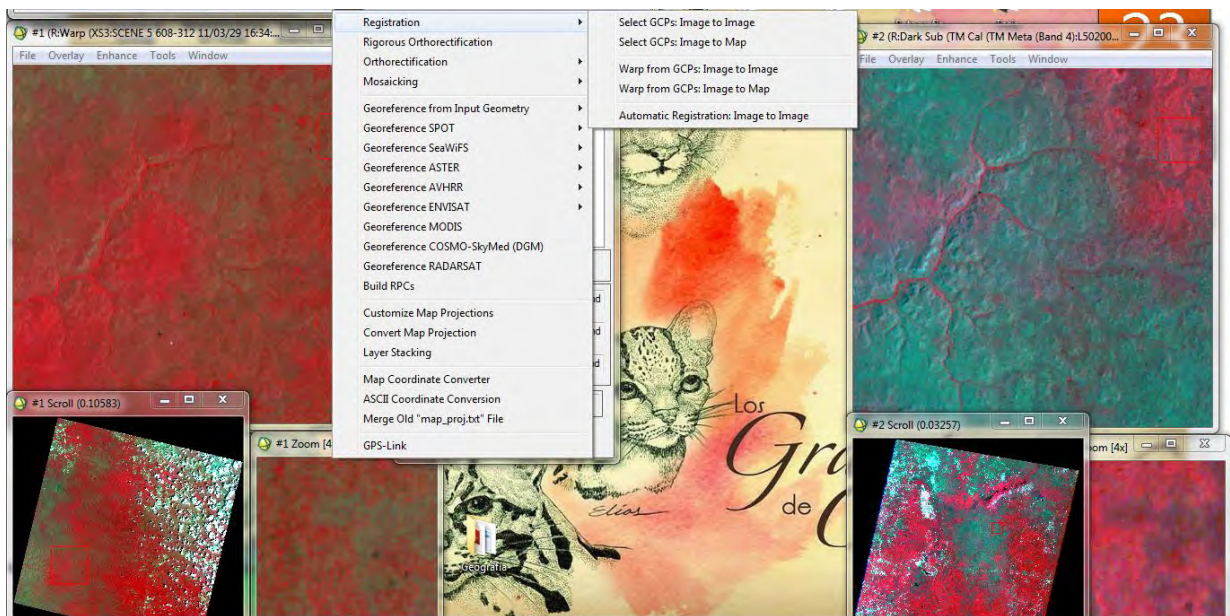


Figura 5.1 Ortorectificación de SPOT en ENVI 4.7, usando imagen Landsat como base. Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Procesamiento de imágenes.

Los métodos seleccionados para el procesamiento de las imágenes fueron: clasificaciones supervisadas utilizando el criterio de máxima verosimilitud y redes neuronales, estos métodos fueron aplicados a imágenes de diferente fecha, con precaución de que la leyenda fuera la misma y utilizando las mismas áreas de entrenamiento entre cada método pero diferentes entre cada fecha (véase Figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5)

Se decidió utilizar el método de máxima verosimilitud debido a que es el método estadístico de mayor rigor en sus cálculos y el más utilizado en teledetección ofreciendo buenos resultados; sin embargo, tiene la desventaja de que considera los valores de los pixeles con una distribución normal. Por otra parte, las redes neuronales fueron elegidas debido a que no son dependientes de las distribuciones y han ofrecido buenos resultados en otros trabajos. Las clasificaciones se realizaron a las imágenes de diferente fecha, cuidando que la leyenda utilizada en las regiones de entrenamiento fuera la misma, ya que de lo contrario se estarían encontrando cambios en zonas donde no las hay.

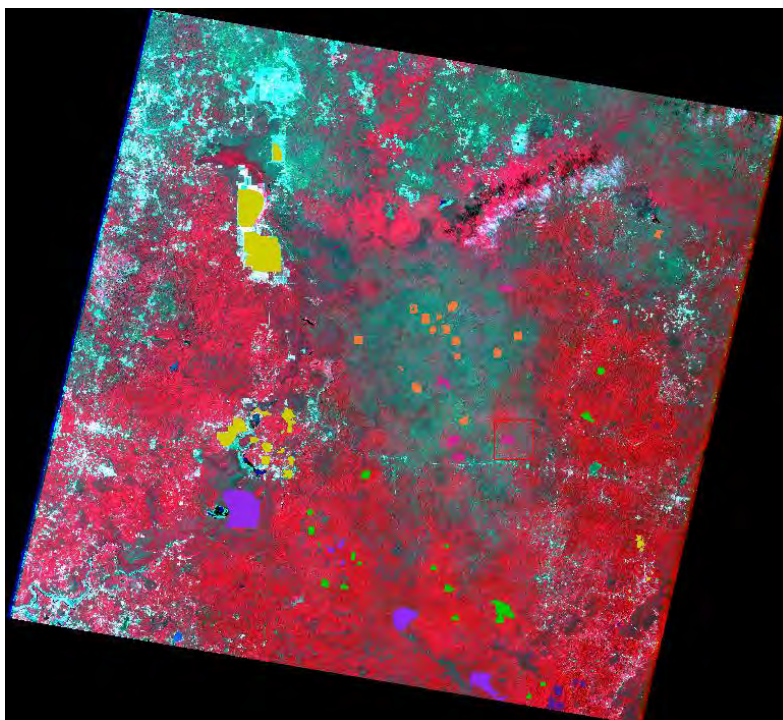


Figura 5.2 Áreas de entrenamiento 2001. Áreas que fueron utilizadas como entrenamiento para Máxima Verosimilitud y Redes Neuronales en Landsat 20/47 2001. Fuente: propia

ROI Name	Color	Pixels	Polygons
Selva alta perennifolia y subperennifolia	Purple3	33,016	11/33,016
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	Green2	86,401	19/86,401
Selva baja subperennifolia	Purple 1	195,531	6/195,531
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia	Sienna1	82,675	15/82,675
Selva baja caducifolia	Maroon2	44,156	6/44,156
Vegetación acuática y subacuática	Cyan1	9,254	10/9,254
Cuerpo de agua	Blue1	5,546	10/5,546
Asentamiento humano	Thistle2	5,490	8/5,490
Zonas agropecuarias	Yellow2	314,655	19/314,655

Figura 5.3 Leyenda áreas de entrenamiento 2001. Se utilizaron las nueve coberturas para realizar la clasificación mediante los dos métodos.

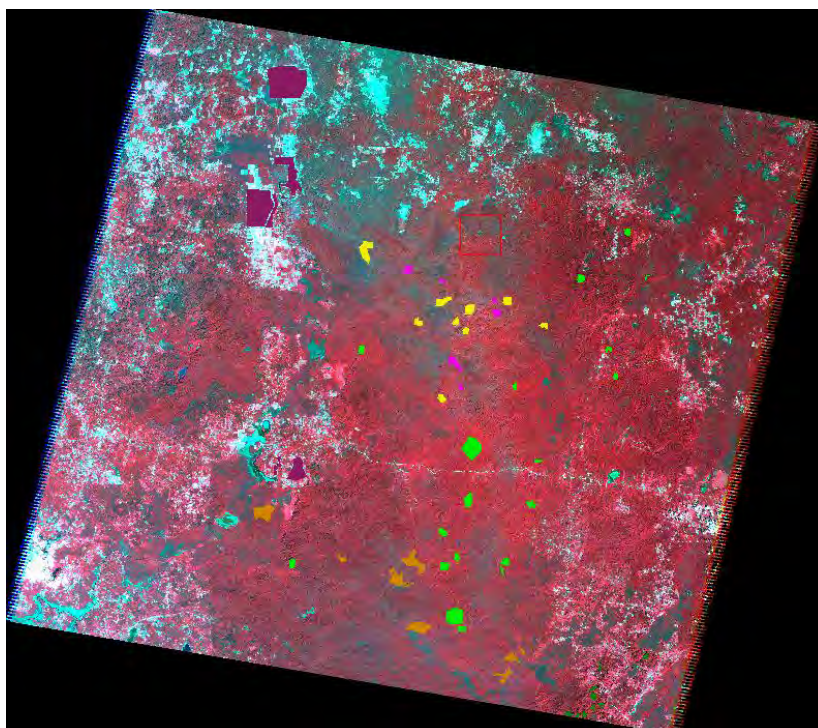


Figura 5.4 Áreas de entrenamiento 2010. Áreas que fueron utilizadas para Máxima Verosimilitud y Redes Neuronales en Landsat 20/47 2010. Fuente: propia.

ROI Name	Color	Pixels	Polygons
Selva alta perennifolia y subperennifolia	Green3	16,944	9/16,944
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	Green1	119,698	19/119,698
Selva baja subperennifolia	Orange3	104,976	9/104,976
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia	Yellow1	58,824	9/58,824
Selva baja caducifolia	Magenta1	24,093	6/24,093
Cuerpo de agua	Cyan1	7,988	4/7,988
Vegetación acuática y subacuática	Sea Green	5,954	2/5,954
Agricultura	Maroon3	271,214	14/271,214
Asentamiento humano	Sienna3	4,053	10/4,053

Figura 5.5 Leyenda áreas de entrenamiento 2010. Fuente: elaboración propia.

Tras realizar los procesos bajo el criterio de redes neuronales, se obtuvieron los siguientes errores medios cuadráticos (RMS training) (véase Figura 5.6 y 5.7), los cuales muestran ligeras oscilaciones, lo que indica que se realizaron adecuadamente.

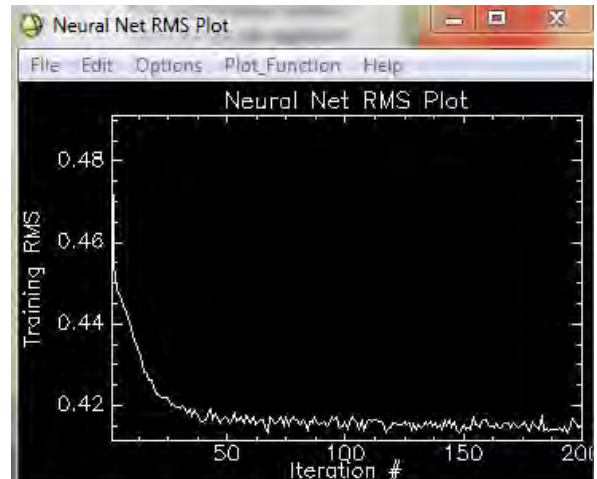
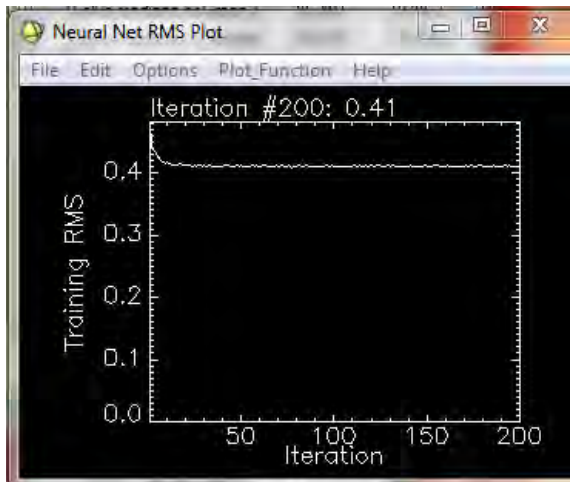


Figura 5.6 RMS Training 2001 20/47 y 20/48 Fuente: elaboración a partir de procesamientos

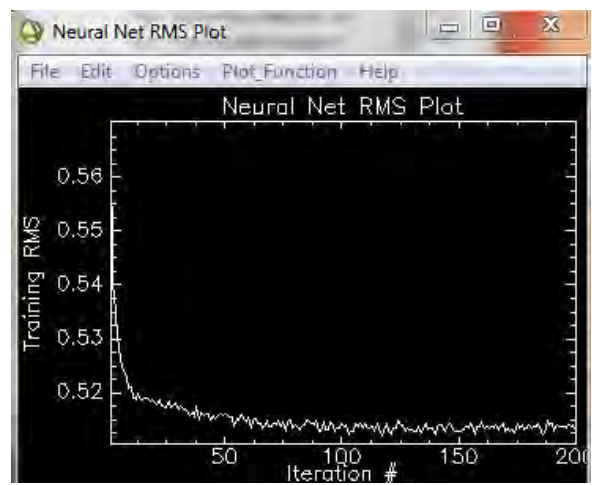
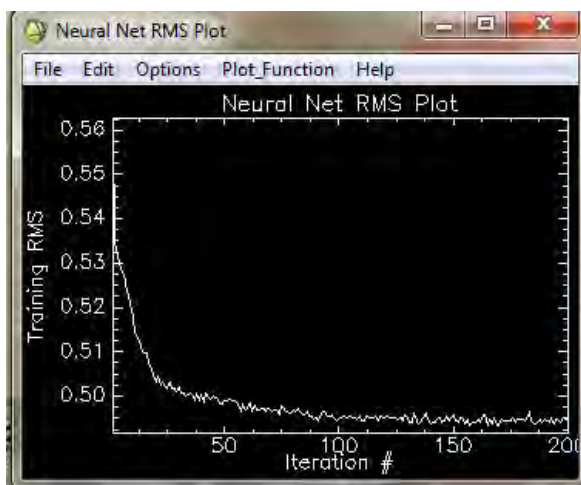


Figura 5.7 RMS Training 2010 20/47 y 20/48. Fuente: elaboración a partir de procesamientos

5.2.4 Verificación de resultados.

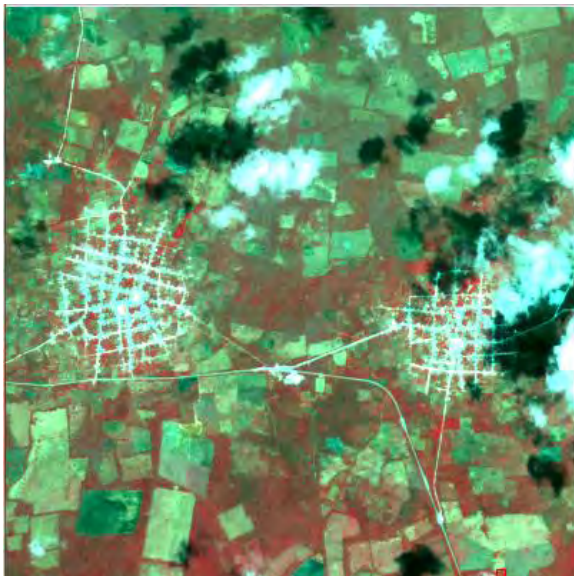
La evaluación de la fiabilidad de los resultados se realiza al comparar la información resultante de las clasificaciones con información confiable, para ello se puede hacer uso de ortofotos, imágenes satelitales de mejor resolución, cartografía temática confiable y verificación en campo. Para este trabajo se decidió utilizar las imágenes SPOT, de mejor resolución que las Landsat (véase Figura 5.8); cartografía temática realizada anteriormente y cartografía de INEGI, para con ello realizar nuevas Regiones de Interés (ROI) para realizar las matrices de confusión.

La evaluación se realiza utilizando la matriz de confusión, la cual brinda la información de la precisión total de la clasificación, así como el estadístico Kappa, el cual mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que habría que esperar por azar, permite evaluar que la clasificación ha discriminado las categorías de

interés con exactitud significativamente mayor a la que se hubiera obtenido de una asignación aleatoria. Además brinda información de los errores de omisión y comisión, así como de la precisión del productor y del usuario.



Resolución espacial en imagen Landsat TM



Resolución espacial en imagen SPOT 5

Figura 5.8 Diferencia de resolución espacial entre Landsat y SPOT. Fuente: Elaboración propia

5.2.5 Generalización cartográfica

Tras haber corrido las clasificaciones supervisadas es necesario que los resultados se generalicen de acuerdo a la escala propuesta. Chuvieco (2008) recomienda que para las imágenes Landsat TM, la escala útil más grande recomendada es 1: 100 000, por lo

que esta escala se usa para este trabajo. Se tiene por regla que el área mínima cartografiable no debe ser menor a 2 mm medidos en el mapa, lo que equivale a 200 m, por lo que para la escala propuesta el área mínima es de 40 000 m². El procedimiento de la generalización se llevó a cabo mediante el software *Arc Gis 9.3*, aplicando la herramienta *Majority Filter* por seis ocasiones para obtener una mejor generalización. Posteriormente se aplicó la herramienta *Boundary Clean* para suavizar los bordes de las coberturas del mapa. Evidentemente, la aplicación de estas herramientas no es suficiente para cumplir el área mínima cartografiable, por lo que el siguiente paso fue la aplicación de la herramienta *Focal Statistics*. Esta herramienta tiene la facilidad de que acepta el número de celdas que generalizará, por lo que para este caso fueron siete celdas las que se utilizaron (también fue aplicado con catorce celdas, lo que implica un área mínima cartografiable de 4mm, con lo que varias zonas agropecuarias y asentamientos humanos quedarían eliminados, lo que no resulta apropiado). Esta generalización se realizó a todas las coberturas, en cada uno de los mapas resultantes de las imágenes del 2001 y del 2010.

5.2.6 Obtención del cambio de cobertura forestal.

Obtenidos los mapas de uso de suelo y vegetación de 2001 y 2010, se procedió a obtener la cobertura total de cada capa. Dado que sólo se consiguió la imagen Landsat del 2010 y no de una fecha más actual, se procedió a actualizar la cobertura de uso de suelo y vegetación con las imágenes SPOT del 2011 y 2012. Esta se realizó con el mapa de coberturas obtenido sobreponiéndolo con las imágenes SPOT, para que de manera manual y mediante interpretación visual fueran actualizadas las coberturas de asentamiento humano y zonas agropecuarias, es decir en este caso no se utilizó clasificación digital.

Teniendo esta información, se calcula la tasa de deforestación mediante el método propuesto por la FAO (1996), cuya fórmula es:

$$t = \left[1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1$$

Donde:

t = tasa de cambio.

S_1 = superficie en la fecha uno.

S_2 = superficie en la fecha dos.

N = número de años entre las dos fechas

Como se sabe, la resolución espacial de las imágenes Landsat es inferior a las imágenes SPOT (véase Figura 5.8), lo que implica diferencia de escalas, sin embargo debido al interés de esta investigación de saber el cambio de cobertura forestal, es importante contar con la mayor cantidad de polígonos de asentamientos humanos y zonas agropecuarias posibles.

5.2.7 Obtención del cambio de cobertura forestal asociado a caminos.

Se toma como efecto de caminos la deforestación provocada a partir de ellos. Para esto se podría tomar como referencia el Cuadro 3.1 Riesgo de deforestación según distancias desde el camino, sin embargo, por el grado de conservación del área de estudio se considera que estas medidas son demasiado extensas para ser ocupadas, por lo que se decidió utilizar una medida más conservadora. Para determinar esta distancia se observó a grandes rasgos el mapa de cobertura de la vegetación generado para a partir de ahí definir dichas distancias. Los caminos no tienen los mismos efectos, las carreteras producen mayor deforestación por su tamaño, por la degradación que provoca el tráfico o por los asentamientos que se generan alrededor de ellos; por estas razones deben tener una mayor zona de influencia, y esta debe decrecer dependiendo del tipo de camino. En el Cuadro 5.1 se presentan las distancias utilizadas para identificar los riesgos de deforestación provocados por los diferentes caminos de la zona. Para representar esta influencia se debe sobreponer el mapa de cobertura vegetal elaborada con el archivo de caminos, y considerar la distancia Euclidiana y buffer según las características del camino.

Tipo de camino	Distancia (m)	Riesgo de deforestación
Carretera	0-500	Severo
	500-1000	Alto
	1000-1500	Moderado
	1500-2000	Bajo
Terracería	0-250	Alto
	250-500	Moderado
	500-1000	Bajo
Vereda	100	Alto
Brecha	100	Alto

Cuadro 5.1 Distancias de caminos y riesgos de deforestación e impactos. Elaboración a partir de Jiménez (2006).

5.2.8 Consideración del atropello de fauna en los distintos caminos

Otro de los efectos de los caminos a considerar es el atropello de especies dentro de las Áreas Protegidas, por lo que para dicho objetivo se pretende hacer uso de información obtenida en campo mediante entrevistas con la población local y recorridos por los caminos a diferente hora y por varios días para averiguar cuál es la zona más peligrosa para el tránsito de las especies.

Es necesario que el horario de los recorridos sea mixto debido a que no todas las especies tienen los mismos hábitos, y no en todos los caminos existe el mismo flujo de automóviles y personas, por lo que las horas seleccionadas para realizar los recorridos son al amanecer (alrededor de entre 6:00-9:00 am), puesto que a esa hora algunos reptiles salen a tomar el Sol y algunos mamíferos tienen hábitos diurnos; al atardecer (alrededor de entre 16:00-19:00 pm), ya que algunas especies de mamíferos entran en acción a esa hora y algunos reptiles vuelven a salir de sus madrigueras; y por la noche (alrededor de entre 22:00-00:00 am), puesto que algunas especies son de hábitos nocturnos. Se sabe que las carreteras son el camino que representa mayor peligro para las especies debido a la cantidad de vehículos que las transitan y por la velocidad que alcanzan, por lo que los recorridos en ella se realizan en un vehículo a baja velocidad para intentar captar la fauna. Las carreteras consideradas son la carretera federal No. 186, la cual parte en dos mitades a la RBC y a la ZSCE Balam Kú, así como la carretera estatal que corre de Dzibalchen hacia Arroyo Negro, y la carretera que lleva al sitio arqueológico de Calakmul. En el caso de las terracerías, es también necesario el uso de un vehículo. Las terracerías que se han

seleccionado para recorrer son las ubicadas en las cercanías de los ejidos, debido a la disponibilidad de guías locales para recorrerlas y abordarlos con entrevistas. Para las veredas y brechas los recorridos se hacen a pie, se realizaran en los caminos internos de las zonas arqueológicas Becán y Calakmul, así como en brechas al interior de la RBC. El norte de la zona de estudio no es considerado para recorridos por razones de seguridad, debido a la probable presencia del narcotráfico.

Capítulo VI Caminos y cambios de cobertura forestal.

6.1 Los caminos de la RBC y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin.

De acuerdo con García Gil *et al* (2003) el patrón de colonización que se presenta a partir de las principales carreteras se denomina como de “peine” o “hueso de pescado” y es resultado de la fragmentación de la selva, lo que reduce su capacidad de mantener la biodiversidad, proveer servicios ambientales y aumenta la vulnerabilidad a presiones antrópicas. Es este patrón el presente en el área de estudio, en las siguientes líneas se muestran las características de los caminos.

Los programas de manejo de cada una de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) incluidas en esta tesis cuentan con una breve descripción de sus caminos. De acuerdo al programa de manejo de la RBC (INE-SEMARNAT, 2000), esta reserva es atravesada por dos ejes carreteros, el primero formado por la carretera federal No. 186 que va de Escárcega a Chetumal y que al atravesar la zona de amortiguamiento central divide a la Reserva en dos fracciones; el segundo eje carretero está conformado por la carretera estatal que corre de norte a sur, de Dzibalchen hacia Arroyo Negro. Esta carretera atraviesa la zona núcleo y de amortiguamiento de la parte norte de la Reserva, y bordea la parte sur de ella.

La ZSCE Balam Kú, según la SECOL-Campeche (2009), es atravesada de igual manera por la carretera federal Escárcega-Chetumal. Las vías de acceso más fáciles se encuentran sobre los kilómetros 60 y 70, tramo donde se desprenden caminos rurales y brechas que conducen a pequeñas comunidades, rancherías, áreas de trabajo y antiguos caminos madereros, mientras las vías de acceso a la ZSCE Balam Kin están constituidas por brechas utilizadas durante los periodos de aprovechamiento forestal. Entre los accesos de mayor uso destaca el que conduce a la sabana Chakah al ingresar por el campo menonita Las Flores. Otro es el que lleva a la Rigueña; uno más va por la comunidad de Chilam Balam, todos ellos conducen al noroeste de la ZSCE. Por el lado este es posible llegar por una brecha que parte del ejido El Refugio (SECOL Campeche, 2009).

6.1.1 Longitud de caminos en el área de estudio.

Se obtuvo que la longitud total de caminos para la zona de estudio es de 5 671 km (tomando en cuenta también los caminos de Laguna Ik y los que se encuentran fuera de las ANP pero dentro del área de estudio) (véase Mapa 6.1). En la Cuadro 6.1 Total de caminos por tipo en el área de estudio se muestra el largo total de cada tipo de camino en el área de estudio, siendo las brechas las más abundantes con 3 301 km de largo, seguidas de las terracerías, las veredas y por último las carreteras. La mayor abundancia de las brechas (Fig. 6.1) se debe a que su construcción es sencilla y son utilizadas por la población local para llegar a sus milpas, por cazadores, chicleros, taladores, saqueadores de flora y fauna y por el personal de vigilancia de la Reserva para realizar monitoreos; tienen un ancho de alrededor de 2 ó 3 metros. Las veredas (Fig. 6.2) son exclusivas para tránsito humano a pie o con animales, teniendo un grosor aproximado de 2 metros. Las terracerías (Fig. 6.3) conectan las localidades rurales entre sí y se conectan a las carreteras, permiten el tránsito con diferentes vehículos y tienen un ancho aproximado de 5 metros. Las carreteras (Fig. 6.4) permiten conectar localidades urbanas, ciudades, trasladar mercancía, permiten el tránsito de vehículos pesados y que vayan a una mayor velocidad, están revestidas de concreto o asfalto y tienen aproximadamente 10 metros de ancho.

Debido a la escasa resolución espacial de los insumos utilizados para completar el archivo de caminos es necesario aclarar que es probable que existan algunas brechas y veredas que no se consideran en este trabajo, sin embargo la escasa presencia de localidades en zonas donde no existen aparentemente caminos, hacen probable que no existan tales.

Total caminos por tipo en Área de estudio en km.					
	Carretera	Terracería	Brecha	Vereda	Total
	353	1542	3301	389	5671

Cuadro 6.1 Total de caminos por tipo en el área de estudio.

6.1.2 Longitud de caminos en las Áreas Naturales Protegidas.

De las áreas protegidas incluidas en esta investigación, la RBC es la que mayor longitud de caminos tiene debido a que ocupa una mayor superficie y existen una mayor

cantidad de localidades dentro de ella y a su alrededor, seguida de la ZSCE Balam Kú y posteriormente la ZSCE Balam Kin. El número de localidades presentes dentro de la RBC y en un área de influencia de 5 km es de 114, lo que muestra el grado de presión en el que se encuentra la selva. En la ZSCE Balam Ku y en un área de influencia de 5 km existen 74 localidades, mientras que en la ZSCE Balam Kin, usando los mismos parámetros, se obtuvieron tan sólo 4 localidades. En la Cuadro 6.2 Total de caminos en cada ANP de la zona de estudio se muestra la longitud total de caminos cada ANP.

Total caminos en cada ANP (km)	
RBC	3699
ZSCE Balam Kú	1187
ZSCE Balam Kin	27.7

Cuadro 6.2 Total de caminos en cada ANP de la zona de estudio.

El tipo de camino más abundante en toda el área de estudio son las brechas, con 2 967 km, por mucho la mayor longitud de un tipo de camino en las tres ANP (véase Cuadro 6.3 Total de caminos por tipo en cada ANP). Sin embargo, es necesario volver a considerar que es probable que existan más brechas y veredas en la red de caminos de las ZSCE Balam Ku y Balam Kin. Para la RBC se observa que las brechas exceden las longitudes de los demás caminos, distribuyéndose por toda la reserva, existiendo un aparente vacío en la porción este de la sección norte de la reserva, zona donde no existen localidades. Las terracerías tienen importante presencia sobre todo en los límites de toda el área y de manera perpendicular a las carreteras federal y estatal, además existen al interior de la zona sur, encontrándose cercanas a las antiguas centrales chicleras que fueron utilizadas durante la época de oro de la extracción del chicle y maderas preciosas. Las carreteras tienen una importante presencia dentro de la RBC y sus alrededores; la carretera federal No. 186 divide la reserva en dos grandes porciones, la norte y la sur, y aunque la divide en su porción más estrecha (una cintura de avispa de acuerdo con Galindo-Leal, 1998), la presencia de esta carretera parte completamente la reserva, obstruyendo la continuidad entre la zona norte y la sur, lo que se traduce en un elemento nocivo para la conservación de la misma. La distribución de las veredas está muy restringida en la RBC, encontrándose tan sólo algunas pequeñas porciones en la parte sur y otras en los alrededores, además de las zonas arqueológicas. Las calles tienen una distribución aún más restringida debido a

que se trata de un área natural protegida en su categoría de Reserva de la Biósfera, sin embargo se encuentran debido a la presencia de varias localidades dentro y en los alrededores de la reserva.

En la ZSCE Balam Kú, el tipo de camino con mayor longitud que se obtuvo fueron las terracerías, con 590 km. Se encuentran ampliamente en la porción central, parten de manera perpendicular desde la carretera federal y desde la carretera que va a Calakmul, comunican a la población de las localidades que se encuentran en los límites de la ZSCE con las zonas de cultivo dentro de ella, a donde pueden acceder con vehículos, además conectan a las localidades entre sí, penetrando el camino a la ZSCE. Las veredas se encuentran al norte y al centro de la ZSCE, son utilizadas por los pobladores para ir a sus hogares y para conducir a sitios turísticos como la Cueva de los Murciélagos, partiendo desde la carretera federal. Las brechas tienen una distribución al sur de la ZSCE, aunque es probable que existan más brechas en esta zona. La carretera federal No. 186 divide, al igual que en la RBC, en dos porciones, provocando que se corte la continuidad en la ZSCE, la carretera que va hacia Calakmul cruza un tramo de la ZSCE, desde donde también parten otros caminos como terracerías y veredas. Las calles se localizan en las localidades a lo largo de poblados cercanos a la carretera federal.

Los caminos encontrados en la ZSCE Balam Kin son escasos, las pocas localidades encontradas dentro y en una zona de 5 km alrededor no muestran caminos más allá de algunos tramos de terracerías y veredas. La terracería presente al este de la ZSCE parte a esta de norte a sur, comunica las escasas poblaciones ubicadas en esta zona, mientras que una vereda de 15 km se encuentra en la porción central. A diferencia de las otras dos ANP de este estudio, la ZSCE no es cruzada por una carretera federal ni estatal. No se encontraron brechas, aunque es probable la existencia de algunas para llevar a cabo actividades como monitoreo, tala, extracción de flora y fauna y cacería.

El área conocida como Laguna Ik cuenta con varias terracerías que dan un largo de 61 km, varios caminos llegan a la laguna, además de otra que va de norte a sur al oeste de la zona. En este lugar existen reportes de llegada de población proveniente de Chiapas, además de que se le ha vinculado al narcotráfico.

Total caminos por tipo en cada ANP			
	RBC	ZSCE Balam Kú	ZSCE Balam Kin
Brecha	2966.9	198.4	-
Calle	8.4	42.2	-
Carretera	108.9	100.3	-
Terracería	564.7	590.6	11.8
Vereda	50.4	255.5	15.8

Cuadro 6.3 Total caminos por tipo en cada ANP.

En la Cuadro 6.4 Total de caminos por tipo en cada zonificación de ANP se encuentran las longitudes de caminos en cada zona de ANP, tomando en cuenta que cada una de ellas tiene un programa de manejo y una zonificación acorde a este programa y a su estado de conservación. Debido a su forma con una cintura muy estrecha (aproximadamente 3.5 km) y a que es partida por la carretera federal No. 186, el área de amortiguamiento de la RBC se puede considerar que tiene dos secciones, la norte y la sur. El área de amortiguamiento norte presenta una completa red, exceptuando la parte oeste. La carretera estatal que va hacia Hopelchén divide el amortiguamiento norte en dos fracciones, desde ella parten de manera perpendicular brechas y terracerías. El área de amortiguamiento sur es más amplia que la norte; sin embargo, en su porción este, carece de una adecuada área al formar una franja estrechísima e irregular, limitando con una gran cantidad de localidades rurales que cuentan con terracerías para comunicarse y brechas para llegar a las zonas de cultivo o lugares donde suelen cazar. También existen veredas, en esta área se encuentra el sitio arqueológico Calakmul, además de más brechas y terracerías que fueron utilizadas durante la explotación de chicle y madera. La carretera estatal que va hacia Arroyo Negro se encuentra entre 1 y 2 km del amortiguamiento de la RBC, por lo que se encuentra en su zona de influencia. La RBC cuenta con dos áreas núcleo, la norte y sur, no se encuentran conectadas debido a la presencia de la carretera federal y de varias localidades. El área norte está fraccionada por la carretera estatal que va hacia Hopelchén, además tiene un área considerada de asentamientos humanos, donde existen varias localidades que cuentan con varios tramos de terracerías y brechas, exceptuando su porción suroeste, aparentemente carente de caminos. La zona núcleo sur muestra una distribución homogénea de brechas, además de algunos tramos de terracerías en el norte que conectan los asentamientos que se encuentran dentro y

fuera de la RBC, y otros en el sur que permitían el tránsito a las antiguas centrales chicleras. De manera extraña y peligrosa para la conservación, esta zona se encuentra expuesta a la frontera agropecuaria al prácticamente no existir zona de amortiguamiento, además de que la carretera estatal que va hacia Arroyo Negro se encuentra a tan sólo 3 ó 4 kilómetros aproximadamente.

La zonificación de la ZSCE Balam Kú muestra dos áreas de amortiguamiento, una norte y una sur, con una distribución similar de zonas núcleo, mientras que en su porción central se encuentra la zona de uso. Los caminos presentes en la zona de uso muestran una amplia red de terracerías que conectan las localidades fuera del área, además de veredas utilizadas para llegar a los hogares. La carretera federal No. 186 es el límite entre la zona de uso y la zona de amortiguamiento y zona núcleo norte. La zona de amortiguamiento norte muestra una amplia red de terracerías debido a la presencia de varios poblados distribuidos paralelamente a la carretera federal. La zona núcleo norte no presenta caminos a excepción de una vereda de 45 km en el norte y un par de terracerías perpendiculares a la carretera federal. Las terracerías presentes en la zona de uso continúan hacia la zona de amortiguamiento sur, además de que existen algunas otras al sur de esta zona que coinciden con la presencia de varias localidades. La zona núcleo sur muestra en su parte norte un tramo de terracería complementado por varias brechas que continúan por la RBC.

La ZSCE Balam Kin cuenta con una estrecha área de amortiguamiento que rodea casi en su totalidad el área de protección, exceptuando el oeste y suroeste, donde se encuentra la continuación de la RBC y la zona de restauración respectivamente. Los escasos caminos presentes en la ZSCE Balam Kin se encuentran situados al este de la zona, la terracería cruza el área de amortiguamiento y la zona de protección, de igual manera que



Figura 6.1 Brecha en tiempo de lluvias. Foto: Gerardo Rodríguez Mosqueda 2012

una vereda de 21 km que cruza por el centro
dichas zonas.



Figura 6.2 Vereda. Foto: Gerardo Rodríguez Mosqueda 2012



Figura 6.4 Carretera. Foto: Gerardo Rodríguez Mosqueda 2012



Figura 6.3 Terracería. Foto: Gerardo Rodríguez Mosqueda 2012

Total de caminos por tipo en cada zonificación de ANP							
	RBC		ZSCE Balam Kú			ZSCE Balam Kin	
	Núcleo	Amortiguamiento	Núcleo	Amortiguamiento	Uso	Protección	Amortiguamiento
Brecha	1163	1803.8	142.2	22.2	34.5	-	-
Calle	1.8	6.6	-	30.1	12	-	-
Carretera	14	94.9	4.6	38.6	56.8	-	-
Terracería	213.1	351.6	79.7	230.5	281	7.4	4.5
Vereda	6.2	44.2	59.9	57.8	137.6	14.6	1.3

Cuadro 6.4 Total de caminos por tipo en cada zonificación de ANP.

6.1.3 Superficie ocupada por caminos en Área de estudio.

Para calcular el área ocupada por los caminos se utilizaron las medidas de la Cuadro 6.5 Ancho promedio de caminos.

Camino	Área (m)
Brecha	2.5
Calle	4
Carretera	10
Terracería	5
Vereda	2

Cuadro 6.5 Ancho promedio de caminos (aproximaciones según visitas en campo).

El área total de caminos obtenida para el área de estudio, incluyendo Laguna Ik y las zonas fuera de las ANP es de 20.614 km² (2061 ha), de este total el 40% (8.2 km²) corresponde a brechas, 37.4% (7.7 km²) son terracerías, 17.1% (3.53 km²) son carreteras, 3.8% (0.7 km²) corresponde a veredas, y el 1.7% (0.3 km²) a calles (véase Cuadro 6.6 Superficie total de caminos por tipo en área de estudio.

Superficie total caminos por tipo en Área de estudio (tomando en cuenta Laguna Ik y zonas fuera de las ANP)					
Calle	Carretera	Terracería	Brecha	Vereda	Total
0.344	3.53	7.71	8.2525	0.778	20.6145

Cuadro 6.6 Superficie total de caminos por tipo en área de estudio (en km²).

6.1.4 Superficie de caminos en las ANP

Para la RBC se obtuvo un área de 11.4 km² de caminos, lo que equivale a 0.16% del total de la reserva. El área de los caminos está distribuida de la siguiente manera: las brechas ocupan la mayor área al tener 64.7% del área total de caminos (7.4 km²), las terracerías se extienden en 24.6% (2.8 km²), mientras que las carreteras 9.5% (1 km²). Las calles y veredas tienen una extensión menor a un km². Dentro del área de amortiguamiento norte y sur se distribuyen 7.3 km² de caminos, equivalentes a 0.15% de su superficie, el más extendido son las brechas, con 4.5 km². En las zonas núcleo existen 4.1 km², es decir el 0.16% de las zonas, las más amplias son nuevamente las brechas, con 2.9 km².

En la ZSCE Balam Kú, el área ocupada por caminos es de 5.1 km², lo que equivale a 0.12% del área total de la ZSCE. El área de caminos está distribuida de la siguiente

manera: la terracería es el camino que mayor área ocupa según los resultados, con 57.5% del total (2.9 km²), el 19.5% (1 km²) está ocupado por carreteras, mientras que las veredas ocupan 10% (0.5 km²), las brechas 9.7% (0.5 km²), y por último las calles, con 3.3% (0.2 km²). En la zona de uso los caminos se extienden por 2.4 km², siendo las más abundantes las terracerías, mientras que en la zonas de amortiguamiento se obtuvieron 1.8 km², nuevamente las terracerías son las más abundantes; en la zona núcleo existen 0.9 km², terracerías y brechas tienen un área similar.

En la ZSCE Balam Kin se calculó un área de terracería de 59 000 m², mientras que de veredas fue de 31 600 m², lo que da un total de 90 600 m² de camino. En la zona de amortiguamiento se obtuvo un área de 25 100 m², mientras que en la zona de protección un área de 66 200 m². Para Laguna Ik se obtuvo un área de 311 800 m² de caminos, de los cuales 305 000 m² corresponden a terracería y 6 800 m² a veredas.

En las Cuadros 6.7 y 6.8, se pueden observar los datos de superficie de los caminos para cada tipo de camino en cada ANP de estudio, así como la superficie en cada una de las zonas de cada zonificación de ANP.

Área total caminos en cada ANP por tipo			
	RBC	ZSCE Balam Kú	ZSCE Balam Kin
Brecha	7.41725	0.496	-
Calle	0.0336	0.1688	-
Carretera	1.089	1.003	-
Terracería	2.8235	2.953	0.059
Vereda	0.1008	0.511	0.0316
Total	11.4642	5.1318	0.0906

Cuadro 6.7 Superficie total de caminos y por tipo de camino en cada ANP

Superficie total de caminos por tipo por zonificación de ANP							
	RBC		ZSCE Balam Kú			ZSCE Balam Kin	
	Núcleo	Amortiguamiento	Núcleo	Amortiguamiento	Uso	Protección	Amortiguamiento
Brecha	2.9075	4.5095	0.3555	0.0555	0.08625	-	-
Calle	0.0045	0.0264	-	0.1204	0.048	-	-
Carretera	0.14	0.949	0.046	0.386	0.568	-	-
Terracería	1.0655	1.758	0.3985	1.1525	1.405	0.037	0.0225
Vereda	0.0124	0.0884	0.1198	0.1156	0.2752	0.0292	0.0026
Total	4.1299	7.3313	0.9198	1.83	2.38245	0.0662	0.0251

Cuadro 6.8 Superficie total de caminos por tipo por zonificación de ANP

MAPA 6.1 Red de caminos en el área de estudio

6.2 Clasificaciones supervisadas.

Las clasificaciones bajo el criterio de máxima verosimilitud y redes neuronales arrojan los resultados mostrados en Figura 6.5 Máxima verosimilitud 2001-2010, y Figura 6.6 Redes Neuronales 2001-2010. Fueron utilizadas las imágenes Landsat TM con Path/Row 20/47 y 20/48, esta última ocupa parte el territorio de Guatemala. Las zonas de entrenamiento se limitaron al área de estudio y zonas cercanas, es por ello que la parte inferior de la imagen 20/48 muestra algunos vacíos. La imagen Landsat de 2001, con fecha 22 de marzo y *Path/Row* 20/47, muestra intensidad en la vegetación en ciertas zonas, lo que podría deberse a que los últimos meses del 2000 y principios de 2001, se presentaron fuertes precipitaciones; el mes de octubre de 2000 registró un máximo de 244 mm, duplicando la media de ese mes de 103.4 mm; sin embargo, es evidente que estas precipitaciones no son homogéneas, por lo que la vegetación no muestra dicha vigorosidad en toda el área, diferenciándose en distintos tipos de vegetación. Estos niveles contrastan con los presentados en los últimos meses del 2009 y principios de 2010, que presentaron poca precipitación. A pesar de esto, la imagen Landsat del 26 de enero de 2010 muestra mayor presencia de tonos rojos, incluyendo zonas agrícolas y pecuarias, debido a que es una fecha más cercana a la época de lluvias.

La imagen Landsat TM con *Path/Row* 20/48 fue utilizada para una porción sur del área de estudio que no era cubierta por la imagen con *Path/Row* 20/47, donde se encuentra el límite entre el estado de Campeche y Guatemala. Observando desde una escala regional, la selva guatemalteca presente en esta imagen es más lluviosa que Campeche, la cual únicamente en su porción sur alcanza niveles altos de precipitación, lo que genera que la vegetación del sur del área de estudio tenga una mayor vigorosidad que en el norte. Estas características hacen que existan ciertas diferencias en la distribución de la vegetación que dio como resultado tras las clasificaciones. Un ejemplo evidente es la distribución de la selva mediana perennifolia y subperennifolia, la cual muestra una distribución coincidente bajo ambas clasificaciones en el año 2001, no así para 2010, donde muestra una mayor distribución, resultado de las diferencias entre los niveles de precipitación presentes en 2001 y 2010. También es notorio que errores en la toma de la imagen de 2010 provocaron errores en las clasificaciones.

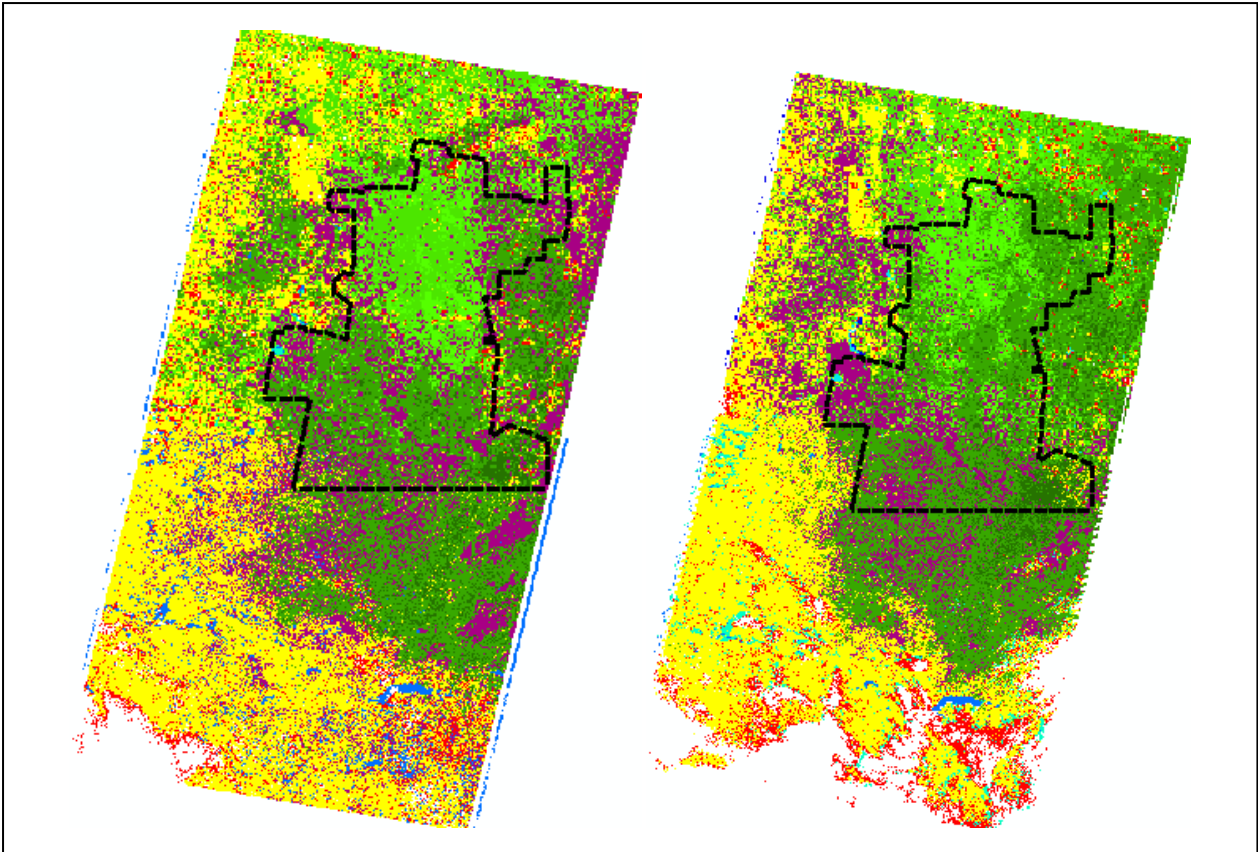


Figura 6.5 Máxima verosimilitud en 2001 (izquierda) y 2010 (derecha).

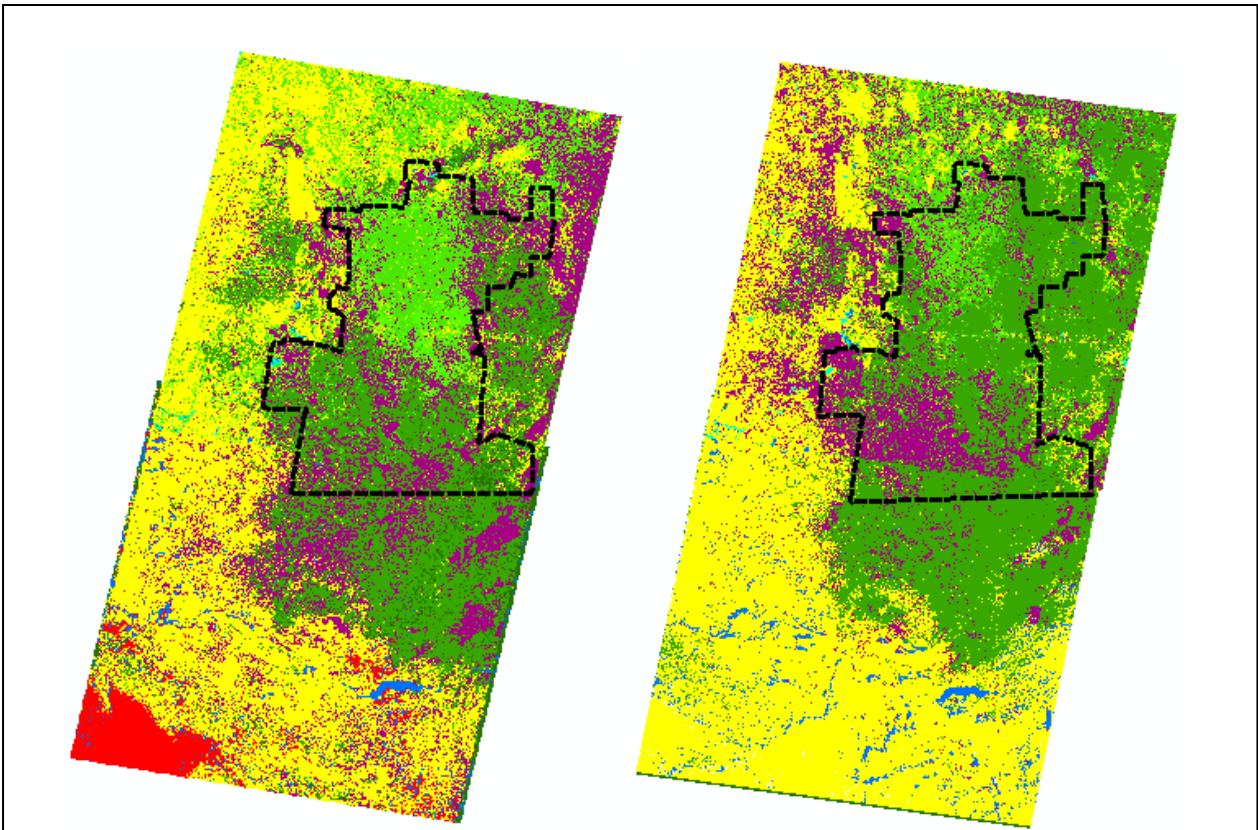


Figura 6.6 Redes neuronales en 2001 (izquierda) y 2010 (derecha).

6.2.1 Verificación de resultados

Para realizar la verificación de los resultados obtenidos en las clasificaciones se utilizaron matrices de confusión generadas a partir de nuevas regiones de interés (ROI) las cuales se tiene certeza del tipo de uso de suelo y vegetación que hay en dicho lugar. La matriz de confusión fue aplicada a cada uno de los procesos del año 2001 y del 2010, con ello se obtuvieron los siguientes resultados:

6.2.1.1 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud de la imagen Landsat 20/47 2001.

La precisión total de la clasificación de la Máxima Verosimilitud en la imagen Landsat 20/47 del 22 de marzo de 2001 es de 80.3%, mientras que el Índice Kappa da como resultado 0.7531, lo que significa que la clasificación es mejor en 75% que lo esperado por azar (véase Figura 6.7 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2001).

En términos de porcentaje, la selva mediana caducifolia y subcaducifolia fue la que obtuvo mejor resultado al tener 97% de confianza, seguida de la selva baja caducifolia, mientras que las coberturas menos certeras fueron la selva mediana perennifolia y subperennifolia y la vegetación acuática y subacuática con 69.1% y 71.39% respectivamente. La cobertura asentamientos humanos tuvo un porcentaje de confianza de 83.27%, mientras que la zona agropecuaria alcanzó 80.17%.

Tomando en cuenta la precisión del usuario, se obtuvieron en general buenos resultados, exceptuando tres coberturas: asentamientos humanos, selva alta perennifolia y selva baja caducifolia, las cuales cuentan con una precisión de usuario de 21.75%, 27.77% y 38.86% respectivamente. Esto se debe a que el porcentaje de errores de comisión en cada una de estas coberturas es alto, lo que implica que se sobreestimó la superficie de cada uno de ellos, para mayor detalle véase Figura 6.7 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2001.

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2001\20-4

Overall Accuracy = (412755/513575) 80.3690%
 Kappa Coefficient = 0.7531

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Selva baja su	Selva mediana	Selva mediana	Selva baja ca	Cuerpo de agu
Unclassified	0	0	0	0	3
Selva baja su	81866	1090	391	1034	0
Selva mediana	7343	63796	0	21	0
Selva mediana	3334	0	81856	74	0
Selva baja ca	15516	528	1747	13194	0
Cuerpo de agu	0	0	0	0	2512
Asentamiento	60	33	83	29	0
Selva alta pe	22	26797	0	0	0
Vegetación ac	0	0	1	0	225
Agricultura [	266	30	305	65	0
Total	108407	92274	84383	14417	3540

Class	Ground Truth (Pixels)				Total
	Asentamiento	Selva alta pe	Vegetación ac	Zona agropecu	
Unclassified	82	2	30	2734	2851
Selva baja su	5	45	3	1491	8525
Selva mediana	0	2024	0	4006	77190
Selva mediana	20	0	433	5870	91587
Selva baja ca	13	5	2	2951	33556
Cuerpo de agu	0	0	2	0	2514
Asentamiento	5525	5	158	19505	25398
Selva alta pe	0	10568	0	673	38060
Vegetación ac	0	0	2353	48	3027
Agricultura [	990	11	315	150685	152667
Total	6635	12660	3296	187963	513575

Class	Ground Truth (Percent)				
	Selva baja su	Selva mediana	Selva mediana	Selva baja ca	Cuerpo de agu
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Selva baja su	75.52	1.18	0.46	7.17	0.00
Selva mediana	6.77	69.14	0.00	0.15	0.00
Selva mediana	3.08	0.00	97.01	0.51	0.00
Selva baja ca	14.31	0.57	2.07	91.52	0.00
Cuerpo de agu	0.00	0.00	0.00	0.00	82.26
Asentamiento	0.06	0.04	0.10	0.20	0.00
Selva alta pe	0.02	29.04	0.00	0.00	0.00
Vegetación ac	0.00	0.00	0.00	0.00	17.66
Agricultura [	0.25	0.03	0.36	0.45	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)				
	Asentamiento	Selva alta pe	Vegetación ac	Zona agropecu	Total
Unclassified	1.24	0.02	0.91	1.45	0.56
Selva baja su	0.08	0.36	0.09	0.79	16.73
Selva mediana	0.00	15.99	0.00	2.13	15.03
Selva mediana	0.30	0.00	13.14	3.12	17.83
Selva baja ca	0.20	0.04	0.06	1.57	6.61
Cuerpo de agu	0.00	0.00	0.06	0.00	0.57
Asentamiento	83.27	0.04	4.79	10.38	4.95
Selva alta pe	0.00	83.48	0.00	0.36	7.41
Vegetación ac	0.00	0.00	71.39	0.03	0.59
Agricultura [	14.92	0.09	9.56	80.17	29.73
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva baja su	4.72	24.48	4059/85925	26541/108407
Selva mediana	17.35	30.86	13394/77190	28478/92274
Selva mediana	10.62	2.99	9731/91587	2527/84383
Selva baja ca	61.14	8.48	20762/33956	1223/14417
Cuerpo de agu	0.07	17.74	2/2914	628/3540
Asentamiento	78.25	16.73	19873/25398	1110/6635
Selva alta pe	72.23	16.52	27492/38060	2092/12660
Vegetación ac	22.27	28.61	674/3027	943/3296
Agricultura [	1.30	19.83	1982/152667	37278/187963

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva baja su	75.52	95.28	81866/108407	81866/85925
Selva mediana	69.14	82.65	63796/92274	63796/77190
Selva mediana	97.01	89.38	81856/84383	81856/91587
Selva baja ca	91.52	38.86	13194/14417	13194/33956
Cuerpo de agu	82.26	99.93	2912/3540	2912/2914
Asentamiento	83.27	21.75	5525/6635	5525/25398
Selva alta pe	83.48	27.77	10568/12660	10568/38060
Vegetación ac	71.39	77.73	2353/3296	2353/3027
Agricultura [	80.17	98.70	150685/187963	150685/152667

Figura 6.7 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2001.

6.2.1.2 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud de la imagen Landsat 20/48 2001

Aunque solamente fue utilizada una pequeña porción de la imagen Landsat 20/48 del 22 de marzo de 2001, también se realizó matriz de confusión, mostrando una precisión total de 86%, con un índice Kappa de 81%, y siendo la cobertura selva baja subperennifolia la que presentó mejores resultados con 98.3%, mientras que la que tuvo menor confianza fue la vegetación acuática y subacuática con 49.81% (véase Figura 6.8 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2001).

En referencia a la precisión del usuario se obtuvo que los mejores resultados están en cuerpo de agua y agricultura, con 99% y 98.12% respectivamente. Sin embargo la cobertura asentamiento humano obtuvo una precisión de 8%, lo que muestra un gran porcentaje de errores de comisión, como se observa en la Figura 6.8 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/48 2001) (véase para más detalles).

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2001\20-

Overall Accuracy = (133296/154891) 86.0579%
Kappa Coefficient = 0.8194

		Ground Truth (Pixels)				
Class	Cuerpo de agua	Asentamiento	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	
Unclassified	1440	39	0	0	0	
Cuerpo de agua	33969	0	0	0	0	
Asentamiento	0	536	0	0	20	
Selva Alta Pe	0	0	3663	7599	4	
Selva Mediana	0	0	2155	12560	192	
Selva Baja Su	0	0	6	114	38305	
Vegetación ac	109	2	0	0	380	
Agricultura [	0	441	0	2	31	
Total	35518	1018	5824	20275	38932	

		Ground Truth (Pixels)		Total
Class	Vegetacion ac	Zona agropecu		
Unclassified	0	43		1522
Cuerpo de agua	0	2		33971
Asentamiento	122	5489		6167
Selva Alta Pe	0	164		11430
Selva Mediana	0	550		15457
Selva Baja Su	33	1151		39609
Vegetación ac	517	1141		2149
Agricultura [	366	43746		44586
Total	1038	52286		154891

		Ground Truth (Percent)				
Class	Cuerpo de agua	Asentamiento	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	
Unclassified	4.05	3.83	0.00	0.00	0.00	
Cuerpo de agua	95.64	0.00	0.00	0.00	0.00	
Asentamiento	0.00	52.65	0.00	0.00	0.05	
Selva Alta Pe	0.00	0.00	62.89	37.48	0.01	
Selva Mediana	0.00	0.00	37.00	61.95	0.49	
Selva Baja Su	0.00	0.00	0.10	0.56	98.39	
Vegetación ac	0.31	0.20	0.00	0.00	0.98	
Agricultura [	0.00	43.32	0.00	0.01	0.08	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

		Ground Truth (Percent)		Total
Class	Vegetacion ac	Zona agropecu		
Unclassified	0.00	0.08		0.98
Cuerpo de agua	0.00	0.00		21.93
Asentamiento	11.75	10.50		3.98
Selva Alta Pe	0.00	0.31		7.38
Selva Mediana	0.00	1.05		9.98

Selva Baja Su	3.18	2.20	25.57	
Vegetación ac	49.81	2.18	1.39	
Agricultura [	35.26	83.67	28.79	
Total	100.00	100.00	100.00	
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Cuerpo de agu	0.01	4.36	2/33971	1549/35518
Asentamiento	91.31	47.35	5631/6167	482/1018
Selva Alta Pe	67.95	37.11	7767/11430	2161/5824
Selva Mediana	18.74	38.05	2897/15457	7715/20275
Selva Baja Su	3.29	1.61	1304/39609	627/38932
Vegetación ac	75.94	50.19	1632/2149	521/1038
Agricultura [	1.88	16.33	840/44586	8540/52286
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Cuerpo de agu	95.64	99.99	33969/35518	33969/33971
Asentamiento	52.65	8.69	536/1018	536/6167
Selva Alta Pe	62.89	32.05	3663/5824	3663/11430
Selva Mediana	61.95	81.26	12560/20275	12560/15457
Selva Baja Su	98.39	96.71	38305/39609	38305/39609
Vegetación ac	49.81	24.06	517/1038	517/2149
Agricultura [	83.67	98.12	43746/52286	43746/44586

Figura 6.8 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/48 2001

6.2.1.3 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud de la imagen Landsat 20/47 2010

Los resultados de la Máxima Verosimilitud en la imagen Landsat 20/47 del 26 de enero de 2010 arrojan tener una precisión total de 66.15%, con índice Kappa de 0.5783, lo que significa que la clasificación es 57.8% mejor que una realizada por azar. La cobertura con mejores resultados fue la selva baja subperennifolia con 83.40% de confianza, mientras que la de menor certeza fue la vegetación acuática y subacuática con 29.24%.

Referente a la precisión del usuario, se obtuvo que la cobertura con mayor certidumbre fueron los cuerpos de agua y las zonas agropecuarias, con 99.25% y 97.88% respectivamente, no así la vegetación acuática y subacuática y la selva alta perennifolia, que obtuvieron 19.62% y 24% respectivamente (para mayores detalles véase Figura 6.9 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2010).

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2010\20_47_max_class_2010

Overall Accuracy = (335929/507774) 66.1572%
 Kappa Coefficient = 0.5783

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Cuerpo de agua	Asentamiento	S alta perenn	S mediana per	S baja subper
Unclassified	2296	53	0	0	1
Cuerpo de agua	4227	0	0	0	0
Asentamiento	2	4588	2	17	13
Selva alta pe	0	1	6261	14588	37
Selva mediana	0	1	3249	58586	648
Selva baja su	0	3	19	6283	53693
Selva mediana	0	182	86	988	6002
Selva baja ca	0	37	13	3823	3718
Vegetación ac	1113	19	1	0	50
Agricultura [	0	783	3	78	218
Total	7638	5667	9634	84363	64380

Class	Ground Truth (Pixels)				Total
	S mediana cad	S baja caduci	V acuatica y	Zona agropecu	
Unclassified	0	0	10	667	3027
Cuerpo de agua	0	0	0	32	4259
Asentamiento	172	53	6	10792	15645
Selva alta pe	3505	60	0	1572	26024
Selva mediana	21404	327	0	3794	88009
Selva baja su	4605	2732	0	2042	69377
Selva mediana	41656	5971	13	17464	72362
Selva baja ca	42746	21305	0	6196	77838
Vegetación ac	0	0	605	1296	3084
Agricultura [	507	117	1435	145008	148149
Total	114595	30565	2069	188863	507774

Class	Ground Truth (Percent)				
	Cuerpo de agua	Asentamiento	S alta perenn	S mediana per	S baja subper
Unclassified	30.06	0.94	0.00	0.00	0.00
Cuerpo de agua	55.34	0.00	0.00	0.00	0.00
Asentamiento	0.03	80.96	0.02	0.02	0.02
Selva alta pe	0.00	0.02	64.99	17.29	0.06
Selva mediana	0.00	0.02	33.72	69.45	1.01
Selva baja su	0.00	0.05	0.20	7.45	83.40
Selva mediana	0.00	3.21	0.89	1.17	9.32
Selva baja ca	0.00	0.65	0.13	4.53	5.78
Vegetación ac	14.57	0.34	0.01	0.00	0.08
Agricultura [	0.00	13.82	0.03	0.09	0.34
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)				Total
	S mediana cad	S baja caduci	V acuatica y	Zona agropecu	
Unclassified	0.00	0.00	0.48	0.35	0.60
Cuerpo de agua	0.00	0.00	0.00	0.02	0.84
Asentamiento	0.15	0.17	0.29	5.71	3.08
Selva alta pe	3.06	0.20	0.00	0.83	5.13
Selva mediana	18.68	1.07	0.00	2.01	17.33
Selva baja su	4.02	8.94	0.00	1.08	13.66
Selva mediana	36.35	19.54	0.63	9.25	14.25
Selva baja ca	37.30	69.70	0.00	3.28	15.33
Vegetación ac	0.00	0.00	29.24	0.69	0.61
Agricultura [	0.44	0.38	69.36	76.78	29.18
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Cuerpo de agua	0.75	44.66	32/4259	3411/7638
Asentamiento	70.67	19.04	11057/15645	1079/5667
Selva alta pe	75.94	35.01	19763/26024	3373/9634
Selva mediana	33.43	30.55	29423/88009	25777/84363
Selva baja su	22.61	16.60	15684/69377	10687/64380
Selva mediana	42.43	63.65	30706/72362	72939/114595
Selva baja ca	72.63	30.30	56533/77838	9260/30565
Vegetación ac	80.38	70.76	2479/3084	1464/2069
Agricultura [	2.12	23.22	3141/148149	43855/188863

Class	Prod. Acc		User Acc	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Cuerpo de agua	55.34	99.25	4227/7638	4227/4259
Asentamiento	80.96	29.33	4588/5667	4588/15645
Selva alta pe	64.99	24.06	6261/9634	6261/26024
Selva mediana	69.45	66.57	58586/84363	58586/88009
Selva baja su	83.40	77.39	53693/64380	53693/69377
Selva mediana	36.35	57.57	41656/114595	41656/72362
Selva baja ca	69.70	27.37	21305/30565	21305/77838
Vegetación ac	29.24	19.62	605/2069	605/3084
Agricultura [	76.78	97.88	145008/188863	145008/148149

Figura 6.9 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2010.

6.2.1.4 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud de la imagen Landsat 20/48 2010

Para esta imagen se obtuvo una precisión total de 78.2%, con índice Kappa de 0.7030, que significa que la clasificación 70% mejor que si se hubiera realizado al azar. La cobertura con mayor confianza fue zona agropecuaria/deforestada/alterada con 91.85%, mientras que la de menor confianza fue la vegetación acuática y subacuática con 58.99%. En cuanto a la precisión del usuario, los valores más certeros se encuentran en cuerpo de agua y zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas, con 100% y 97.11% respectivamente (para mayores detalles véase Figura 6.10 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/47 2010)

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2010\20_48

Overall Accuracy = (181422/231980) 78.2059%
Kappa Coefficient = 0.7030

Ground Truth (Pixels)					
Class	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	Cuerpo de agua	Asentamiento
Unclassified	0	1	0	0	10
Selva alta pe	5573	21967	118	0	0
Selva mediana	568	61768	7568	0	0
Selva baja su	63	12564	49983	0	1
Cuerpo de agua	0	0	0	3412	0
Asentamiento	0	3	6	0	2058
Vegetación ac	2	0	254	521	14
Agricultura [	9	131	278	2	619
Total	6215	96434	58207	3935	2702

Ground Truth (Pixels)			
Class	Vegetacion ac	Zona agropecu	Total
Unclassified	0	20	31
Selva alta pe	0	488	28146
Selva mediana	6	153	70063
Selva baja su	2	40	62653
Cuerpo de agua	0	0	3412
Asentamiento	71	3280	5418
Vegetación ac	1086	1123	3000
Agricultura [	676	57542	59257
Total	1841	62646	231980

Ground Truth (Percent)					
Class	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	Cuerpo de agua	Asentamiento
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37
Selva alta pe	89.67	22.78	0.20	0.00	0.00
Selva mediana	9.14	64.05	13.00	0.00	0.00
Selva baja su	1.01	13.03	85.87	0.00	0.04
Cuerpo de agua	0.00	0.00	0.00	86.71	0.00
Asentamiento	0.00	0.00	0.01	0.00	76.17
Vegetación ac	0.03	0.00	0.44	13.24	0.52
Agricultura [	0.14	0.14	0.48	0.05	22.91
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)		Total
	Vegetacion	Zona agropecu	
Unclassified	0.00	0.03	0.01
Selva alta pe	0.00	0.78	12.13
Selva mediana	0.33	0.24	30.20
Selva baja su	0.11	0.06	27.01
Cuerpo de agu	0.00	0.00	1.47
Asentamiento	3.86	5.24	2.34
Vegetación ac	58.99	1.79	1.29
Agricultura [	36.72	91.85	25.54
Total	100.00	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva alta pe	80.20	10.33	22573/28146	642/6215
Selva mediana	11.84	35.95	8295/70063	34666/96434
Selva baja su	20.22	14.13	12670/62653	8224/58207
Cuerpo de agu	0.00	13.29	0/3412	523/3935
Asentamiento	62.02	23.83	3360/5418	644/2702
Vegetación ac	63.80	41.01	1914/3000	755/1841
Agricultura [	2.89	8.15	1715/59257	5104/62646

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva alta pe	89.67	19.80	5573/6215	5573/28146
Selva mediana	64.05	88.16	61768/96434	61768/70063
Selva baja su	85.87	79.78	49983/58207	49983/62653
Cuerpo de agu	86.71	100.00	3412/3935	3412/3412
Asentamiento	76.17	37.98	2058/2702	2058/5418
Vegetación ac	58.99	36.20	1086/1841	1086/3000
Agricultura [	91.85	97.11	57542/62646	57542/59257

Figura 6.10 Matriz de confusión en Máxima Verosimilitud Landsat 20/48 2010.

6.2.1.5 Matriz de confusión en Redes Neuronales de la imagen Landsat 20/47 2001

Con el método Redes Neuronales aplicado en la imagen Landsat 20/47 con fecha 22 de marzo de 2001 se obtuvo una precisión total de 86.7%, con índice Kappa de 0.8267, es decir que los resultados son 82% mejores en comparación con el azar. La cobertura con mayor confianza resultó la selva mediana caducifolia y subcaducifolia, mientras que los asentamientos humanos no pudieron ser discriminados por este método, por lo que el valor de confianza es nulo.

Tomando en cuenta la precisión del usuario, se observa en la Figura 6.11 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2001 que las coberturas con mayor precisión son cuerpo de agua con 99.3% y zonas agropecurias/deforestadas/alteradas con 94.3%, mientras que la precisión más baja se encontró en los asentamientos humanos, con nula superficie asignada (para mayor detalle véase Figura 6.11 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2001)

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2001\20

Overall Accuracy = (445411/513575) 86.7275%
 Kappa Coefficient = 0.8267

Class	Ground Truth (Pixels)				
	Selva baja su	Selva mediana	Selva mediana	Selva baja ca	Cuerpo de agu
Unclassified	0	0	0	0	0
Selva baja su	85416	1666	1239	1220	0
Selva mediana	6409	80800	0	21	0
Selva mediana	2382	0	80455	36	0
Selva baja ca	12627	381	1263	12440	0
Cuerpo de agu	0	0	0	0	1882
Asentamiento	0	0	0	0	0
Selva alta pe	3	9279	0	0	0
Vegetación ac	3	1	0	0	1658
Agricultura [	1567	147	1426	700	0
Total	108407	92274	84383	14417	3540

Class	Ground Truth (Pixels)				Total
	Asentamiento	Selva alta pe	Vegetación ac	Zona agropecu	
Unclassified	0	0	0	0	0
Selva baja su	5	59	263	1664	91532
Selva mediana	3	4849	0	3398	95480
Selva mediana	181	0	901	5012	88967
Selva baja ca	33	3	1	2834	29582
Cuerpo de agu	0	0	9	3	1894
Asentamiento	0	0	0	0	0
Selva alta pe	0	7731	0	100	17113
Vegetación ac	0	8	1857	122	3649
Agricultura [	6413	10	265	174830	185358
Total	6635	12660	3296	187963	513575

Class	Ground Truth (Percent)				
	Selva baja su	Selva mediana	Selva mediana	Selva baja ca	Cuerpo de agu
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva baja su	78.79	1.81	1.47	8.46	0.00
Selva mediana	5.91	87.57	0.00	0.15	0.00
Selva mediana	2.20	0.00	95.35	0.25	0.00
Selva baja ca	11.65	0.41	1.50	86.29	0.00
Cuerpo de agu	0.00	0.00	0.00	0.00	53.16
Asentamiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva alta pe	0.00	10.06	0.00	0.00	0.00
Vegetación ac	0.00	0.00	0.00	0.00	46.84
Agricultura [	1.45	0.16	1.69	4.86	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)				Total
	Asentamiento	Selva alta pe	Vegetación ac	Zona agropecu	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva baja su	0.08	0.47	7.98	0.89	17.82
Selva mediana	0.05	38.30	0.00	1.81	18.59
Selva mediana	2.73	0.00	27.34	2.67	17.32
Selva baja ca	0.50	0.02	0.03	1.51	5.76
Cuerpo de agu	0.00	0.00	0.27	0.00	0.37
Asentamiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva alta pe	0.00	61.07	0.00	0.05	3.33
Vegetación ac	0.00	0.06	56.34	0.06	0.71
Agricultura [	96.65	0.00	0.04	99.01	36.09
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva baja su	6.68	21.21	6116/91532	22991/108407
Selva mediana	15.37	12.43	14680/95480	11474/92274
Selva mediana	9.57	4.65	8512/88967	3928/84383
Selva baja ca	57.95	10.71	17142/29502	1077/14417
Cuerpo de agu	0.63	46.84	12/1894	1658/3540
Asentamiento	0.00	100.00	0/0	6635/6635
Selva alta pe	54.82	38.93	9382/17113	4929/12660
Vegetación ac	49.11	43.66	1792/3649	1439/3296
Agricultura [	5.00	0.99	10520/105350	13133/107963

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva baja su	70.79	90.32	05416/100407	05416/91532
Selva mediana	87.57	84.63	80800/92274	80800/95480
Selva mediana	95.35	90.43	80455/84383	80455/88967
Selva baja ca	86.29	42.05	12440/14417	12440/29582
Cuerpo de agu	53.16	99.37	1882/3540	1882/1894
Asentamiento	0.00	0.00	0/6635	0/0
Selva alta pe	61.07	45.18	7731/12660	7731/17113
Vegetación ac	56.34	50.89	1857/3296	1857/3649
Agricultura [	93.01	94.32	174830/187963	174830/185358

Figura 6.11 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2001

6.2.1.6 Matriz de confusión en Redes Nueronales de la imagen Landsat 20/48 2001

Para esta imagen se logró una precisión total de 92.2%, con índice Kappa de 0.8958, lo cual quiere decir que el resultado de la clasificación es 89% mejor que una clasificación realizada al azar. Las coberturas con mayores niveles de confianza fueron cuerpo de agua, con 99.9% y selva baja subperennifolia, con 97.7%, mientras que el nivel de confianza más bajo estuvo en la vegetación acuática y subacuática, que no pudo ser discriminada por el proceso.

En cuanto a la precisión del usuario, se obtuvo que el cuerpo de agua fue la cobertura más precisa con 99.6%, así como la zona agropecuaria/deforestada/alterada, con 96.3%. Por el contrario, el nivel de precisión más bajo fue en vegetación acuática y subacuática, con nula representación (para mayor detalle véase Figura 6.12 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/48 2001).

Overall Accuracy = (148755/161300) 92.2226%
Kappa Coefficient = 0.8958

		Ground Truth (Pixels)				
Class	Cuerpo de agua	Asentamiento	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Cuerpo de agua	35497	1	5	1	20	
Asentamiento	4	413	0	0	2	
Selva Alta Pe	0	0	2559	3612	0	
Selva Mediana	0	1	3297	17249	240	
Selva Baja Su	0	1	6	136	38150	
Vegetación ac	15	0	0	0	0	
Agricultura [	2	607	6	166	633	
Total	35518	1023	5873	21164	39045	

		Ground Truth (Pixels)		Total
Class	Vegetacion ac	Zona agropecu		
Unclassified	0	0		0
Cuerpo de agua	23	63		35610
Asentamiento	0	118		537
Selva Alta Pe	0	314		6485
Selva Mediana	0	1089		21876
Selva Baja Su	331	1168		39792
Vegetación ac	0	0		15
Agricultura [	684	54887		56985
Total	1038	57639		161300

		Ground Truth (Percent)				
Class	Cuerpo de agua	Asentamiento	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cuerpo de agua	99.94	0.10	0.09	0.00	0.05	
Asentamiento	0.01	40.37	0.00	0.00	0.01	
Selva Alta Pe	0.00	0.00	43.57	17.07	0.00	
Selva Mediana	0.00	0.10	56.14	81.50	0.61	
Selva Baja Su	0.00	0.10	0.10	0.64	97.71	
Vegetación ac	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	
Agricultura [	0.01	59.34	0.10	0.78	1.62	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Class	Ground Truth (Percent)		Total		
	Vegetacion	acZona agropecu		Commission (Percent)	Omission (Pixels)
Unclassified	0.00	0.00	0.00		
Cuerpo de agua	2.22	0.11	22.08	0.32	113/35610
Asentamiento	0.00	0.20	0.33	23.09	124/537
Selva Alta Pe	0.00	0.54	4.02	60.54	3926/6485
Selva Mediana	0.00	1.89	13.56	21.15	4627/21876
Selva Baja Su	31.89	2.03	24.67	4.13	1642/39792
Vegetación ac	0.00	0.00	0.01	100.00	15/15
Agricultura [	65.90	95.23	35.33	3.68	2098/56985
Total	100.00	100.00	100.00		

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Cuerpo de agua	0.32	0.06	113/35610	21/35518
Asentamiento	23.09	59.63	124/537	610/1023
Selva Alta Pe	60.54	56.43	3926/6485	3314/5873
Selva Mediana	21.15	18.50	4627/21876	3915/21164
Selva Baja Su	4.13	2.29	1642/39792	895/39045
Vegetación ac	100.00	100.00	15/15	1038/1038
Agricultura [	3.68	4.77	2098/56985	2752/57639

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Cuerpo de agua	99.94	99.68	35497/35518	35497/35610
Asentamiento	40.37	76.91	413/1023	413/537
Selva Alta Pe	43.57	39.46	2559/5873	2559/6485
Selva Mediana	81.50	78.85	17249/21164	17249/21876
Selva Baja Su	97.71	95.87	38150/39045	38150/39792
Vegetación ac	0.00	0.00	0/1038	0/15
Agricultura [	95.23	96.32	54887/57639	54887/56985

Figura 6.12 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/48 2001

6.2.1.7 Matriz de confusión en Redes Neuronales de la imagen Landsat 20/47 2010

La matriz de confusión para estos resultados obtuvo un nivel de precisión total de 74.7%, con índice Kappa de 0.6664, lo cual significa que los resultados son mejores 66% más que una clasificación realizada al azar. Las coberturas con mejor nivel de precisión fueron la selva baja subperennifolia con 95.2% y la selva mediana perennifolia y subperennifolia con 92.2%, mientras que las más bajas estuvieron en asentamientos humanos y vegetación acuática y subacuática, con nivel de confianza nula y casi nula respectivamente.

Si se toma en cuenta la precisión del usuario, los mejores resultados se encuentran en cuerpo de agua, con 99.5%, además de en la zona agropecuaria/deforestada/alterada con 92.5%, mientras los más bajos son asentamientos humanos y vegetación acuática y subacuática (para mayor detalle véase Figura 6.13 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2010)

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2010\20

Overall Accuracy = (379320/507774) 74.7025%
 Kappa Coefficient = 0.6664

Class	Ground Truth (Pixels)					
	Cuerpo de agu	Asentamiento	S alta perenn	S mediana per	S baja subper	
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Cuerpo de agu	6837	0	5	0	0	0
Asentamiento	0	0	0	0	0	0
Selva alta pe	92	0	1781	94	0	0
Selva mediana	0	4	7764	77793	1154	0
Selva baja su	2	6	14	5194	61294	0
Selva mediana	0	197	29	1134	1480	0
Selva baja ca	0	0	0	13	68	0
Vegetación ac	697	987	0	0	46	0
Agricultura [	10	4473	41	135	338	0
Total	7638	5667	9634	84363	64380	0

Class	Ground Truth (Pixels)					Total
	S mediana cad	S baja cad	ciV acuatica y	Zona agropecu		
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Cuerpo de agu	3	0	0	21	6866	0
Asentamiento	0	0	0	0	0	0
Selva alta pe	59	3	0	4	2033	0
Selva mediana	37489	689	0	4067	128960	0
Selva baja su	11070	6100	0	2272	85952	0
Selva mediana	59513	21561	5	9800	93719	0
Selva baja ca	1224	505	0	33	1843	0
Vegetación ac	1	0	137	1206	3074	0
Agricultura [	5236	1707	1927	171460	185327	0
Total	114595	30565	2069	188863	507774	0

Class	Ground Truth (Percent)					
	Cuerpo de agu	Asentamiento	S alta perenn	S mediana per	S baja subper	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cuerpo de agu	89.51	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
Asentamiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva alta pe	1.20	0.00	18.49	0.11	0.00	0.00
Selva mediana	0.00	0.07	80.59	92.21	1.79	0.00
Selva baja su	0.03	0.11	0.15	6.16	95.21	0.00
Selva mediana	0.00	3.48	0.30	1.34	2.30	0.00
Selva baja ca	0.00	0.00	0.00	0.02	0.11	0.00
Vegetación ac	9.13	17.42	0.00	0.00	0.07	0.00
Agricultura [	0.13	78.93	0.43	0.16	0.53	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)					Total
	S mediana cad	S baja cad	ciV acuatica y	Zona agropecu		
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cuerpo de agu	0.00	0.00	0.00	0.01	1.35	0.00
Asentamiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva alta pe	0.05	0.01	0.00	0.00	0.40	0.00
Selva mediana	32.71	2.25	0.00	2.15	25.40	0.00
Selva baja su	9.66	19.96	0.00	1.20	16.93	0.00
Selva mediana	51.93	70.54	0.24	5.19	18.46	0.00
Selva baja ca	1.07	1.65	0.00	0.02	0.36	0.00
Vegetación ac	0.00	0.00	6.62	0.64	0.61	0.00
Agricultura [	4.57	5.58	93.14	90.79	36.50	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)		Omission (Percent)	
	Cuerpo de agu	0.42	10.49	29/6866	801/7638
Asentamiento	0.00	100.00	0/0	5667/5667
Selva alta pe	12.40	81.51	252/2033	7853/9634
Selva mediana	39.68	7.79	51167/128960	6570/84363
Selva baja su	28.69	4.79	24658/85952	3086/64380
Selva mediana	36.50	48.07	34206/93719	55082/114595
Selva baja ca	72.60	98.35	1338/1843	30060/30565
Vegetación ac	95.54	93.38	2937/3074	1932/2069
Agricultura [	7.48	9.21	13867/185327	17403/188863

Class	Prod. Acc. (Percent)		User Acc. (Percent)	
	Cuerpo de agu	89.51	99.58	6837/7638	6837/6866
Asentamiento	0.00	0.00	0/5667	0/0
Selva alta pe	18.49	87.60	1781/9634	1781/2033
Selva mediana	92.21	60.32	77793/84363	77793/128960
Selva baja su	95.21	71.31	61294/64380	61294/85952
Selva mediana	51.93	63.50	59513/114595	59513/93719
Selva baja ca	1.65	27.40	505/30565	505/1843
Vegetación ac	6.62	4.46	137/2069	137/3074
Agricultura [	90.79	92.52	171460/188863	171460/185327

Figura 6.13 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/47 2010

6.2.1.8 Matriz de confusión en Redes Neuronales de la imagen Landsat 20/48 2010

Los resultados de esta clasificación tuvieron una precisión total de 86.6%, con índice Kappa de 0.7995, es decir que los resultados son 79.9% mejores que una clasificación al azar. La cobertura con mejores resultados fue cuerpo de agua, con 99.7% de confianza, seguida de las zona agropecuaria/deforestada/alterada. El nivel de confianza más bajo se obtuvo en asentamientos humanos y vegetación acuática y subacuática, con nula confianza.

El nivel de precisión del usuario tuvo los mejores resultados en las coberturas cuerpo de agua y selva baja subperennifolia, con 94% y 93% respectivamente, mientras que nuevamente los asentamientos humanos y la vegetación acuática y subacuática obtuvieron los peores resultados al no poder ser discriminados por este proceso (para mayor detalle véase Figura 6.14 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/48 2010)

Confusion Matrix: C:\Users\user\Desktop\Tesis\Imágenes LANDSAT\Procesos\2010\20

Overall Accuracy = (200993/231980) 86.6424%
Kappa Coefficient = 0.7995

Class	Ground Truth (Pixels)					
	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	Cuerpo de agua	Asentamiento	
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Selva alta pe	435	151	2	0	0	0
Selva mediana	5583	93292	16494	0	0	0
Selva baja su	2	2470	41172	7	1	
Cuerpo de agua	0	1	10	3926	0	
Asentamiento	0	0	0	0	0	
Vegetación ac	0	0	0	0	0	
Agricultura [	195	520	529	2	2701	
Total	6215	96434	58207	3935	2702	

Class	Ground Truth (Pixels)		Total
	Vegetacion ac	Zona agropecu	
Unclassified	0	0	0
Selva alta pe	0	10	598
Selva mediana	4	241	115614
Selva baja su	333	69	44054
Cuerpo de agua	76	156	4169
Asentamiento	0	2	2
Vegetación ac	0	0	0
Agricultura [	1428	62168	67543
Total	1841	62646	231980

Class	Ground Truth (Percent)					
	Selva alta pe	Selva mediana	Selva baja su	Cuerpo de agua	Asentamiento	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva alta pe	7.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Selva mediana	89.83	96.74	28.34	0.00	0.00	0.00
Selva baja su	0.03	2.56	70.73	0.18	0.04	
Cuerpo de agua	0.00	0.00	0.02	99.77	0.00	
Asentamiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Vegetación ac	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Agricultura [	3.14	0.54	0.91	0.05	99.96	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Class	Ground Truth (Percent)		Total
	Vegetacion ac	Zona agropecu	
Unclassified	0.00	0.00	0.00
Selva alta pe	0.00	0.02	0.26
Selva mediana	0.22	0.38	49.84
Selva baja su	18.09	0.11	18.99
Cuerpo de agu	4.13	0.25	1.80
Asentamiento	0.00	0.00	0.00
Vegetación ac	0.00	0.00	0.00
Agricultura [	77.57	99.24	29.12
Total	100.00	100.00	100.00

Class	Commission		Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva alta pe	27.26	93.00	163/598	5780/6215
Selva mediana	19.31	3.26	22322/115614	3142/96434
Selva baja su	6.54	29.27	2882/44054	17035/58207
Cuerpo de agu	5.83	0.23	243/4169	9/3935
Asentamiento	100.00	100.00	2/2	2702/2702
Vegetación ac	0.00	100.00	0/0	1841/1841
Agricultura [	7.96	0.76	5375/67543	478/62646

Class	Prod. Acc.		User Acc.	
	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
Selva alta pe	7.00	72.74	435/6215	435/598
Selva mediana	96.74	80.69	93292/96434	93292/115614
Selva baja su	70.73	93.46	41172/58207	41172/44054
Cuerpo de agu	99.77	94.17	3926/3935	3926/4169
Asentamiento	0.00	0.00	0/2702	0/2
Vegetación ac	0.00	0.00	0/1841	0/0
Agricultura [	99.24	92.04	62168/62646	62168/67543

Figura 6.14 Matriz de confusión en Redes Neuronales Landsat 20/48 2010

Como se puede apreciar, los resultados en Redes Neuronales tienen mejores niveles de precisión que en Máxima Verosimilitud, sin embargo, las coberturas de mayor interés para los objetivos de este trabajo -asentamientos humanos y zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas- tienen mejores resultados en la Máxima Verosimilitud que en Redes Neuronales, debido a que este último método no fue capaz de identificar los asentamientos humanos y los confundió con zona agropecuaria/deforestada/alterada. En ambas clasificaciones se puede observar que el año 2010 tuvo peores resultados que el 2001, debido a que existieron errores de comisión más grandes en más coberturas.

Tras saber esto, se decidió corregir una de las clasificaciones manualmente y con interpretación visual, mientras que el otro no fue corregido, para así demostrar las diferencias en la precisión de ambos. El método que se decidió corregir fue el de Máxima Verosimilitud, mientras Redes Neuronales permaneció tal como se obtuvieron después del procesamiento.

A continuación se muestra una breve descripción de los resultados obtenidos en cada uno de los métodos, tomando en cuenta que los resultados de la Máxima Verosimilitud fueron corregidos con interpretación visual.

6.2.2 Redes neuronales.

Los resultados de la clasificación bajo el criterio de Redes Neuronales para el año 2001 fueron:

- Selva alta perennifolia y subperennifolia. Se obtuvo una extensión de 17 636.04 ha (176.4 km²). Muestra una distribución únicamente al sureste del área de estudio. Se identificaron algunos otros polígonos de pequeño tamaño asignados incorrectamente debido a que corresponden a zonas de vegetación riparia o sombras. No fueron corregidas.

- Selva mediana perennifolia y subperennifolia. Los resultados arrojan una extensión de 485 477.38 ha (4 854.8 km²), distribuidos por toda el área de estudio con excepción del noroeste. Es el tipo de vegetación dominante del área de estudio, aunque las zonas cercanas a los asentamientos humanos se encuentran en estado de sucesión secundaria.

- Selva baja subperennifolia. Se distribuye por 359 825.32 ha (3598.2 km²), por toda el área de estudio. Muestra una asignación correcta.

- Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia. Primeramente se había considerado la selva baja caducifolia independiente de la selva mediana caducifolia y subcaducifolia, sin embargo se decidió juntarlas debido a que presentan una distribución paralela. Ambas ocupan un total de 422 359.675 ha (4233.6 km²), distribuidas al norte del área de estudio. Se presentaron algunos errores en polígonos que deberían pertenecer a la categoría selva mediana perennifolia y subperennifolia. No se corrigieron estos errores.

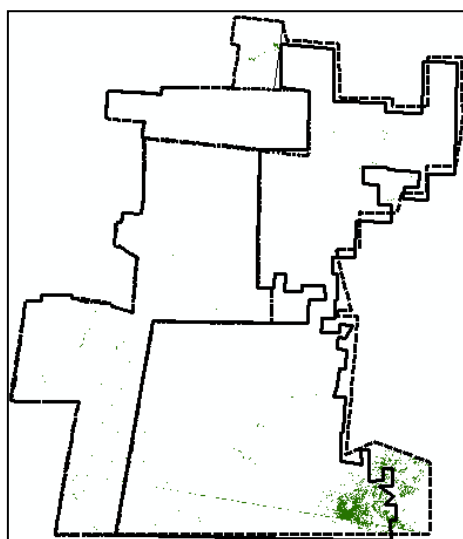
- Vegetación acuática, subacuática. Se obtuvo una superficie de 2 641.18 ha (26.4 km²), con una distribución bastante restringida, aunque existen algunos errores de omisión los cuales no fueron corregidos.

- Cuerpo de agua. Aunque son escasos en el área de estudio, el sur muestra una mayor distribución. Es probable la presencia de más polígonos que no pudieron ser discriminados debido a la resolución de la imagen. Se distribuyen por 763.79 ha (7.6 km²).

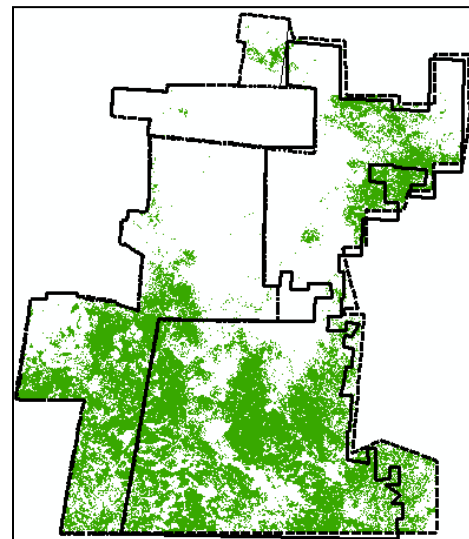
- Zona agropecuaria, deforestada o alterada. En principio se consideraba solamente la categoría “zona agropecuaria”, sin embargo se decidió agregar los adjetivos deforestada o alterada debido a que es posible que se estén incluyendo polígonos que no tienen un uso agropecuario pero que han sido deforestados o alterados. Se obtuvo una distribución de 70 555.6 ha (705.6 km²), distribuidos principalmente cercanos a caminos. Se presentaron algunos errores de comisión, los cuales no fueron corregidos. El software no fue capaz de reconocer los asentamientos humanos de la imagen *Path/Row 20/47*, y confundió todos los asentamientos con zonas agropecuarias. Por otra parte, una nube al norte del área de estudio produjo error al asignar estos polígonos a zonas agropecuarias. Estos errores no fueron corregidos.

- Asentamientos humanos. Así como en la imagen *Path/Row 20/47*, el proceso en la imagen 20/48 tuvo problemas para identificar esta cobertura, al confundir la mayoría de los polígonos con zonas agropecuarias, exceptuando unos polígonos de escasa superficie que fueron confundidos con cuerpos de agua. La totalidad de esta cobertura es errónea, al existir un error de omisión del 100%

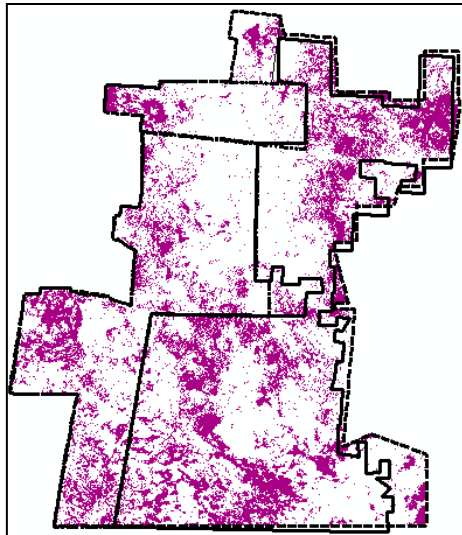
En la Figura 6.15 Tipos de vegetación 2001 bajo el criterio Redes Neuronales se observan los distintos tipos de vegetación que dieron como resultado tras la aplicación del criterio Redes Neuronales en las imágenes Landsat del 22 de marzo del 2001.



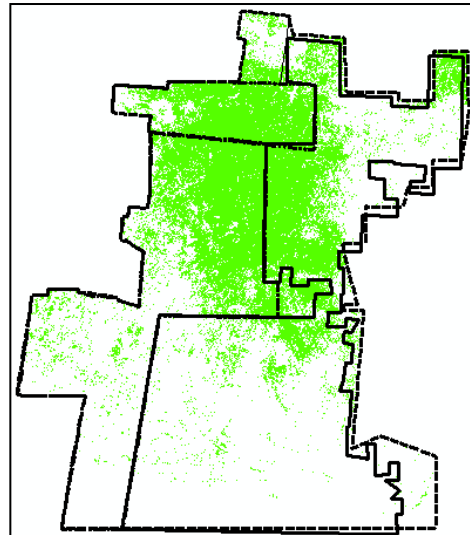
Selva alta perennifolia y subperennifolia



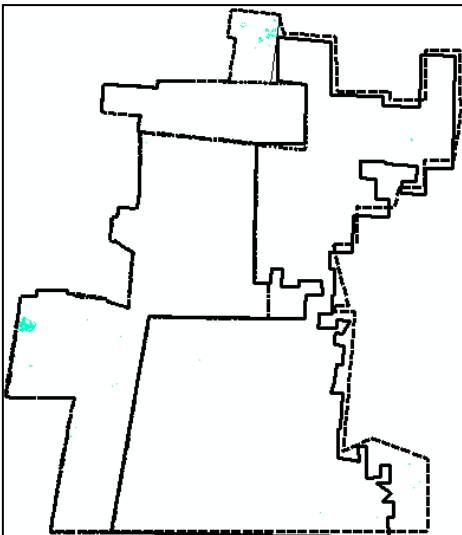
Selva mediana perennifolia y subperennifolia



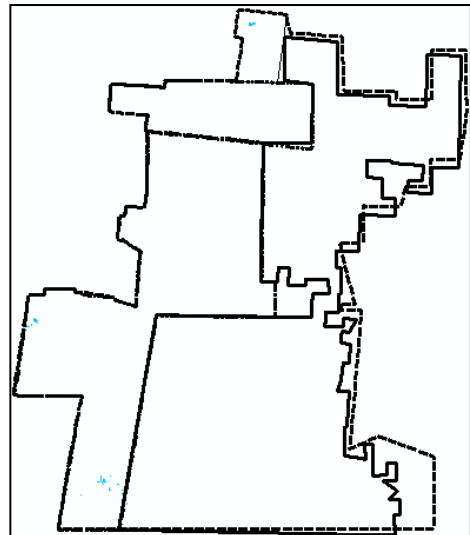
Selva baja subperennifolia



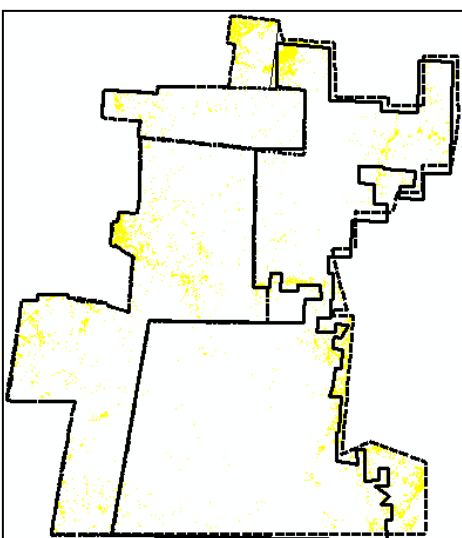
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia



Vegetación acuática y subacuática



Cuerpo de agua



Zona agropecuaria, deforestada o alterada

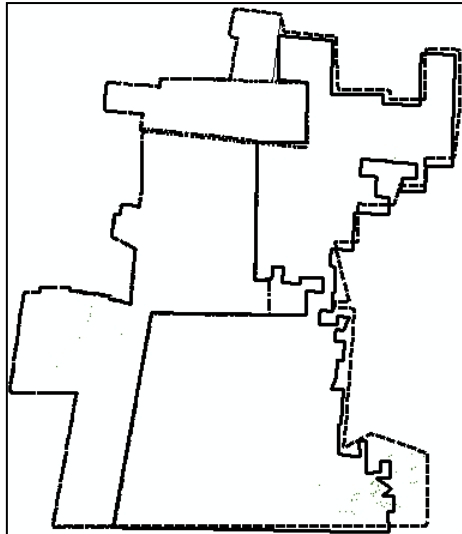
Figura 6.15 Tipos de vegetación 2001 bajo el criterio Redes Neuronales

Los resultados de la clasificación bajo el criterio de Redes Neuronales para 2010 son:

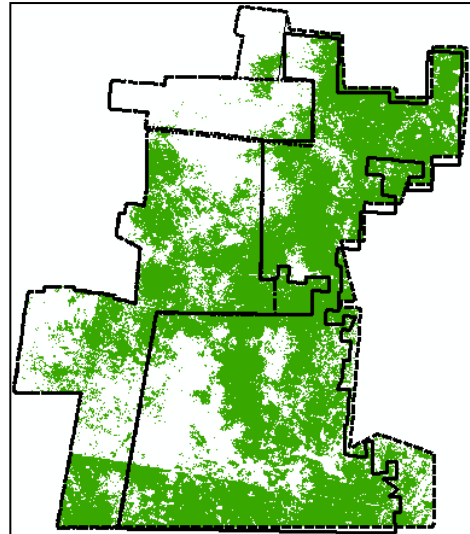
- Selva alta perennifolia y subperennifolia. Los resultados arrojan una superficie de 912.95 ha (9.1 km²). Los polígonos asignados se encuentran en su mayoría al sureste del área de estudio, en las sombras generadas por los árboles.
- Selva mediana perennifolia y subperennifolia. El tipo de vegetación dominante, con una superficie de 776 790.25 ha (7 767.9 km²), distribuidos por toda el área de estudio, aunque parte de ella se encuentra en estado de sucesión secundaria.
- Selva baja subperennifolia. Por las condiciones de la imagen ya explicadas anteriormente, este tipo de vegetación resultó sobreestimado en el suroeste, al ser confundido con selva mediana perennifolia y subperennifolia. Se obtuvo una superficie total de 355 297.45 ha (3552 km²). Estos errores no fueron corregidos.
- Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia. Se decidió unir el tipo de vegetación selva mediana caducifolia y subcaducifolia con selva baja caducifolia. Se obtuvo como resultado una superficie total de 177 90138 ha (1 779 km²), distribuidas en el norte del área de estudio, con menor precipitación que en el sur.
- Vegetación acuática y subacuática. Se obtuvieron 3 214.77 ha (32.1 km²), con una distribución bastante restringida, aunque es probable la existencia de más polígonos que no fueron identificados debido a la resolución de la imagen.
- Cuerpo de agua. La superficie obtenida fue de 1 468.5 ha (14.7 km²), aunque existieron algunos polígonos que fueron confundidos con la cobertura Zona agropecuaria, deforestada o alterada y con Selva baja subperennifolia. Estos errores de omisión no fueron corregidos.
- Zona agropecuaria/deforestada/alterada. Se decidió agregar los adjetivos deforestada y alterada para incluir polígonos que no tienen un uso agropecuario pero es evidente que no son vegetación sana. Se obtuvo una superficie de 47 572.42 ha (475.7 km²), sin embargo está altamente sobreestimada al confundir asentamientos humanos y cuerpos de agua con esta cobertura. Por otra parte, también existieron errores de omisión al no incluir algunos polígonos al sureste del área de estudio. Estos errores no fueron corregidos.

- Asentamiento humano. No fueron reconocidos por el método de Redes Neuronales, por lo que no existe superficie alguna. La totalidad de la superficie fue confundida con Zona agropecuaria, deforestada o alterada. Error de omisión del 100%

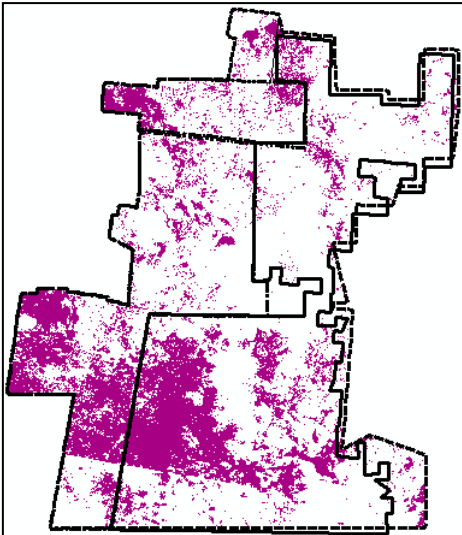
En la Figura 6.16 Tipos de vegetación 2010 bajo el criterio de Redes Neuronales se muestran los tipos de vegetación resultado de la clasificación bajo el criterio de Redes Neuronales para el 2001.



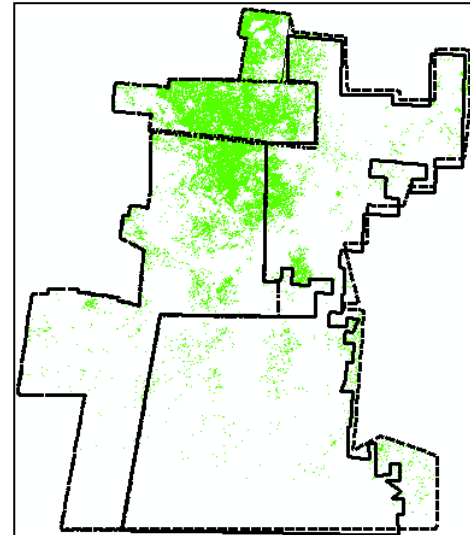
Selva alta perennifolia y subperennifolia



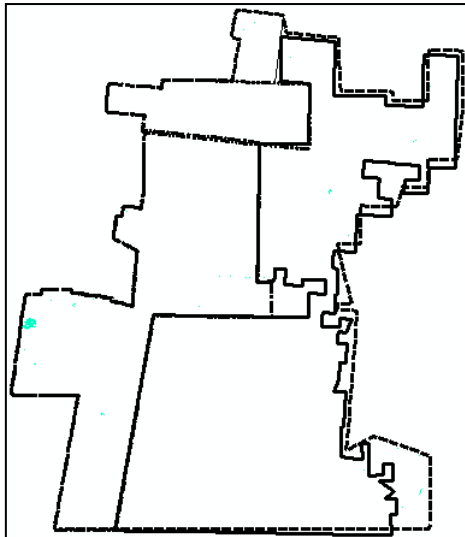
Selva mediana perennifolia y subperennifolia



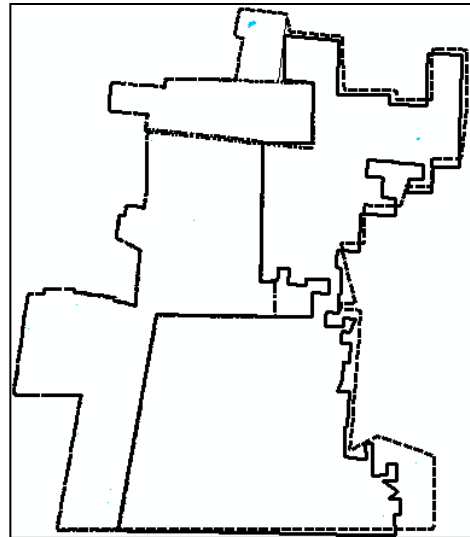
Selva baja subperennifolia



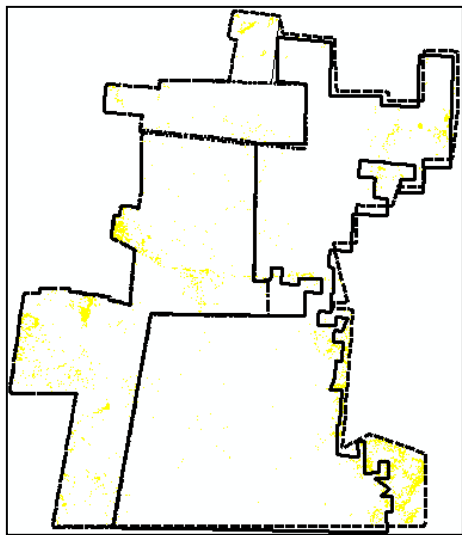
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia



Vegetación acuática y subacuática



Cuerpo de agua



Zona agropecuaria, deforestada o alterada

Figura 6.16 Tipos de vegetación 2010 bajo el criterio de Redes Neuronales

6.2.3 Máxima verosimilitud.

Los resultados de la clasificación bajo el criterio de Máxima Verosimilitud para el año 2001 realizando correcciones en los polígonos fueron los siguientes:

- Selva alta perennifolia y subperennifolia. Tiene una distribución de 31 379.71 ha (313.8 km²), se encuentra restringida al sureste de la RBC, y algunos manchones fuera de ella. Los resultados arrojaron cierta confusión en pequeñas áreas que corresponden a la selva mediana subperennifolia en el centro-sur del área de estudio, además del NE de la RBC, por lo que se procedió a su corrección. En algunas partes se confundió con pequeñas superficies que pertenecen a vegetación riparia.

- Selva mediana perennifolia y subperennifolia. Es el tipo de vegetación más extenso del área de estudio con 481 167.88 ha (4 811.7 km²). Los resultados muestran una adecuada asignación; sin embargo, se tuvieron algunos errores en polígonos identificados como selva alta perennifolia y subperennifolia. Los polígonos cercanos a los poblados se encuentran en un estado de sucesión secundario.

- Selva baja subperennifolia. Su distribución en el área de estudio es de 344 803.75 ha (3 448 km²). Se encuentra en las zonas inundables alrededor de toda el área de estudio. Muestra una distribución correcta.

- Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia. De manera similar al método Redes Neuronales, se había considerado de manera independiente la selva baja caducifolia y la selva mediana caducifolia y subcaducifolia, sin embargo se decidió juntarlas debido a que presentan una distribución paralela. Ocupan un total de 422 506.036 ha (4225 km²) en el área de estudio. Debido a las características de la imagen *Path/Row 20/48*, presenta algunos errores en pequeños manchones correspondientes a zonas de selva baja subperennifolia, los cuales fueron corregidos.

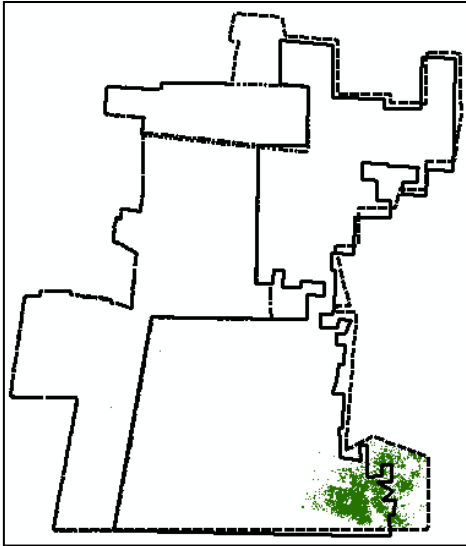
- Vegetación acuática, subacuática y riparia. En principio, se consideraban únicamente vegetación acuática y subacuática; sin embargo, al percatarse que existía cierta confusión entre la selva alta perennifolia y subperennifolia con la vegetación riparia (la cual no estaba considerada en principio en los tipos de vegetación considerados), se decidió agregar este tipo a la vegetación acuática y subacuática. Tiene una distribución total de 3 214.77 ha (32.1 km²) en el área de estudio. Al sur del área se encontraron polígonos identificados como “sin dato” por el programa y que corresponden a este tipo de vegetación, por lo que se les incluyó en la presente cobertura. Este tipo de vegetación está estrechamente relacionado con los cuerpos de agua.

- Cuerpo de agua. Los cuerpos de agua son escasos en el área de estudio. Se obtuvo una distribución total de 1 468.51 ha² (14.7 km²), aunque es probable la existencia de otros tantos de pequeño tamaño que no fueron reconocidos por el programa debido a que la resolución de las imágenes no lo permitió. Se muestra que los cuerpos de agua del sur son más abundantes en esta época del año que en el norte, donde está

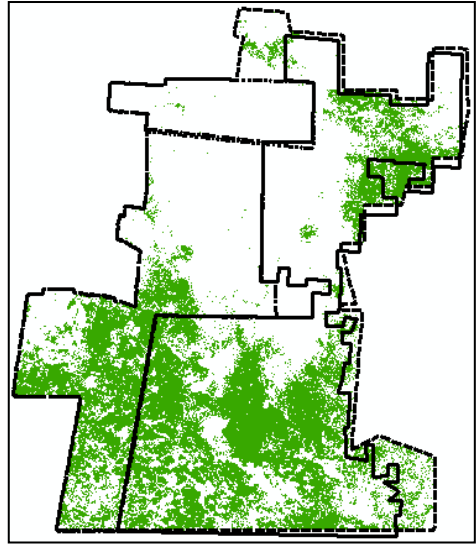
demostrada su existencia pero se secan en la época de estiaje, por lo que no fueron reconocidos por el programa.

- Zona agropecuaria alterada o deforestada. Primeramente se había considerado nombrar esta categoría como zona agropecuaria, sin embargo se decidió agregar los calificativos alterada y deforestada para incluir ciertos polígonos que no habían sido incluidos en el procesamiento, lo que implicó que se tuvieran errores de omisión en esta categoría. Además existieron errores de comisión al confundir ciertos polígonos de selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia con zona agropecuaria, los cuales fueron corregidos. El procesamiento arrojó una superficie total del área de estudio de 53 969.6592 ha (539.6 km²), con una distribución cercana a los caminos, especialmente carreteras y terracerías. Esta superficie se obtuvo tras agregar los polígonos que habían sido ignorados, así como de la corrección de aquellos que no entraban en esta cobertura.

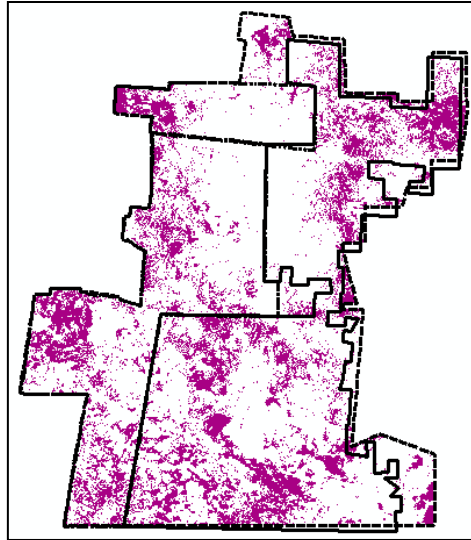
- Asentamiento humano: Los asentamientos humanos se encuentran distribuidos en la zona periférica del área de estudio y cercanos a los caminos, encontrándose sobre todo en la porción este. La distribución total de esta categoría resultó de 7 691.5712 ha (76.9 km²). Una nube presente en el norte de la RBC y Laguna Ik provocó que se sobreestimara la superficie de asentamientos humanos; sin embargo, fue eliminada, quedando con ello la superficie antes mencionada. En la Figura 6.17 Tipos de vegetación 2001 con Máxima Verosimilitud se observan los distintos tipos de vegetación que dieron como resultado tras la aplicación de la Máxima Verosimilitud en las imágenes Landsat del 22 de marzo del 2001.



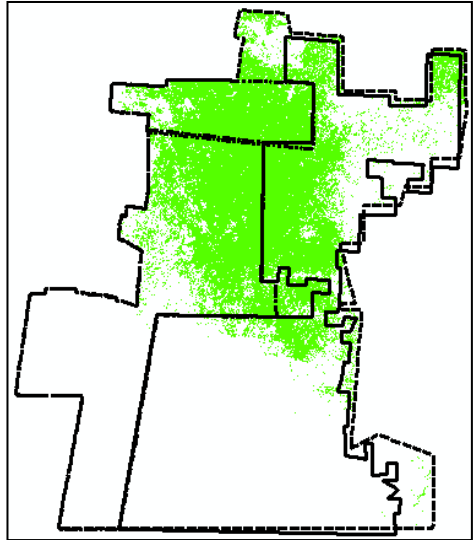
Selva alta perennifolia y subperennifolia



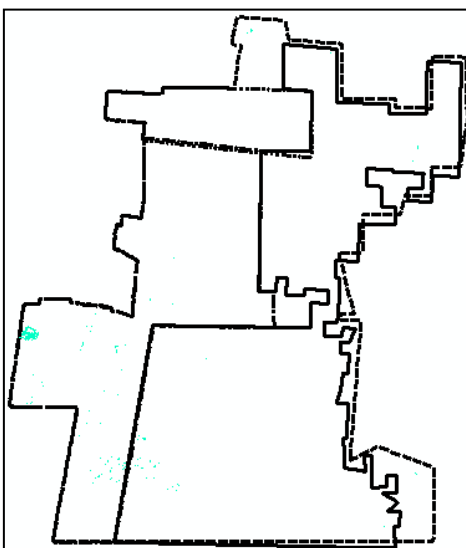
Selva mediana perennifolia y subperennifolia



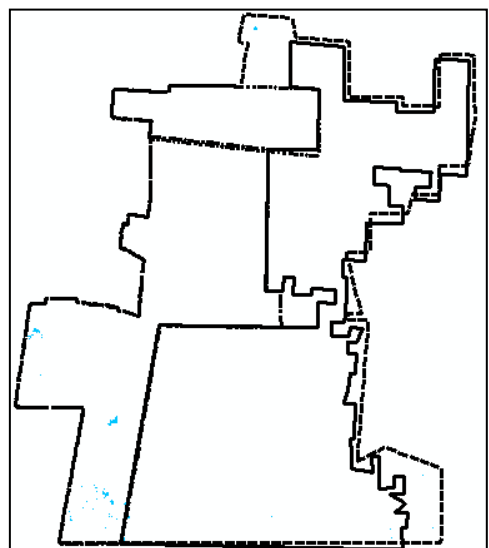
Selva baja subperennifolia



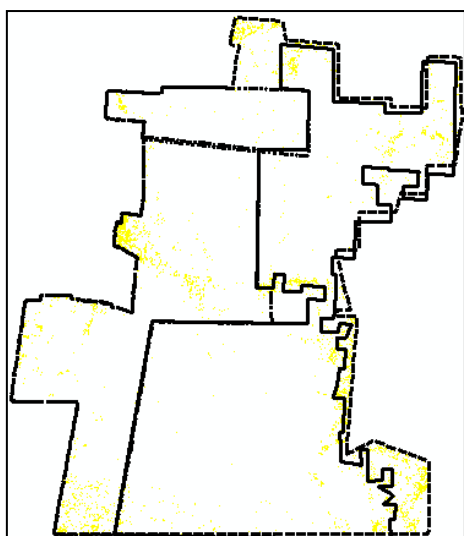
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia



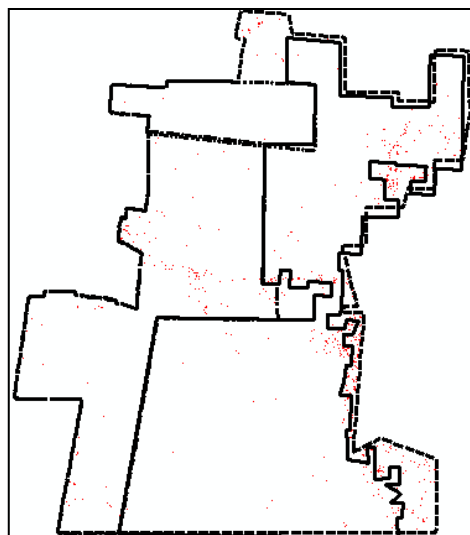
Vegetación acuática, subacuática y riparia



Cuerpo de agua



Zona agropecuaria, deforestada o alterada



Asentamientos humanos.

Figura 6.17 Tipos de vegetación 2001 con Máxima Verosimilitud

Los resultados de la clasificación bajo el criterio de Máxima Verosimilitud para 2010 fueron los siguientes:

- Selva alta perennifolia y subperennifolia. Los resultados arrojan una superficie de 32 693.47 ha (326.9 km²), mostrando ciertas confusiones con sombras, cuyos polígonos fueron corregidos.

- Selva mediana perennifolia y subperennifolia. La superficie obtenida fue de 666 683.87 ha (6 666.8 km²), siendo el tipo de vegetación dominante del área de estudio, sin embargo las zonas cercanas a asentamientos humanos y agropecuarias se encuentran en un estado de sucesión secundario.

- Selva baja subperennifolia. Se obtuvo que la distribución en el área de estudio es de 218 729.95 ha (2 187.3 km²). Para este caso hay que considerar que la respuesta espectral de la imagen con *Path/Row* 20/47 tuvo el problema que presentó en tonos más claros algunas partes de selva mediana perennifolia y subperennifolia, por lo que el procedimiento confundió estos polígonos con selva baja subperennifolia. Estos polígonos fueron corregidos.

- Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia. Así como en los resultados de 2001, los tipos de vegetación selva baja caducifolia y selva mediana caducifolia y

subcaducifolia fueron unidos. De esta manera, se obtuvo una superficie total para el área de estudio de 350 282.57 ha (3 502.8 km²).

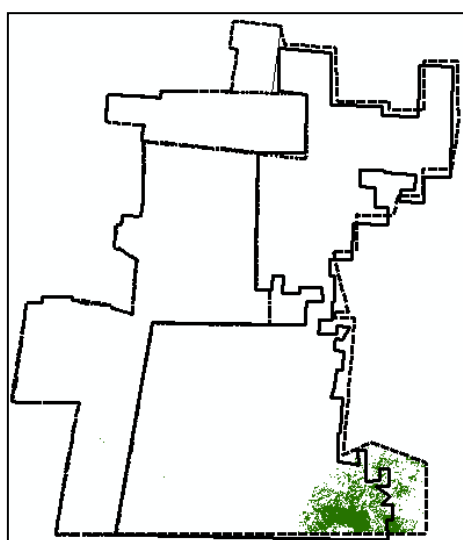
- Vegetación acuática, subacuática y riparia. Este tipo de vegetación obtuvo una cobertura de 2 470 ha (24.7 km²).

- Cuerpo de agua. La distribución de los cuerpos de agua, en la fecha de toma de la imagen, muestra una escasa presencia en el norte del área de estudio. La superficie total es de 1 569 ha (15.7 km²).

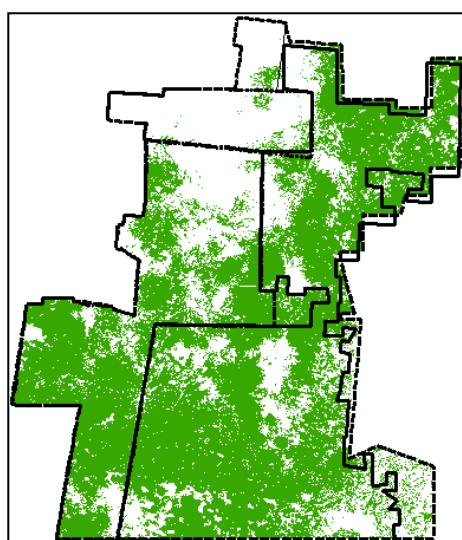
- Zona agropecuaria alterada o deforestada. Para esta cobertura se obtuvieron 60 681.9956 ha (606.8 km²), cifra mayor a la que se obtuvo con 2001. En principio se habían obtenido 207.8 km², una cifra mucho menor, sin embargo fueron corregidos, esta situación se debe a que el procesamiento para 2010 incluyó algunos errores de omisión, por lo que varios polígonos no fueron incluidos.

- Asentamiento humano: Se obtuvieron 11 641.9707 ha (116.4 km²), cifra mayor a la obtenida para 2001. Los resultados muestran una adecuada asignación de polígonos a esta cobertura.

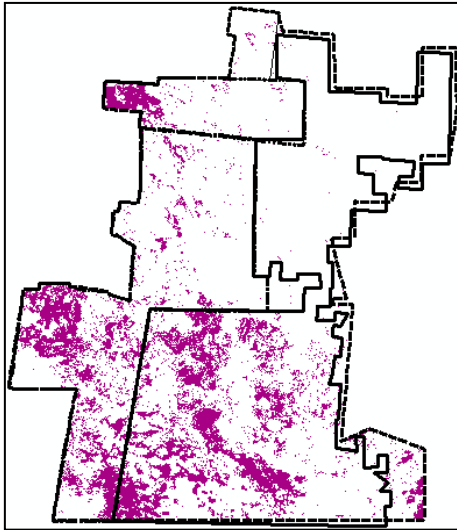
En la Figura 6.18 Tipos de vegetación 2010 con Máxima Verosimilitud se observan los distintos tipos de vegetación que dieron como resultado tras la aplicación de la máxima verosimilitud en las imágenes Landsat del 26 de enero de 2010.



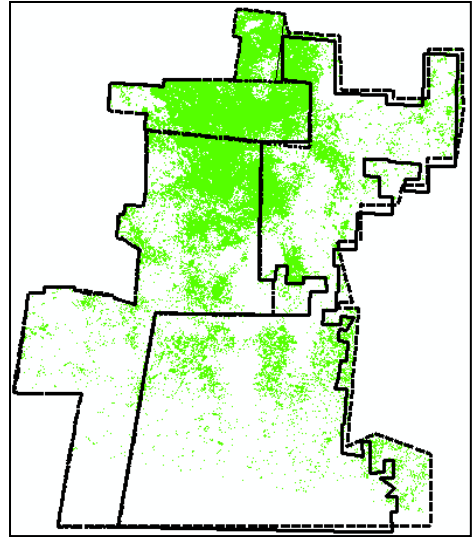
Selva alta perennifolia y subperennifolia



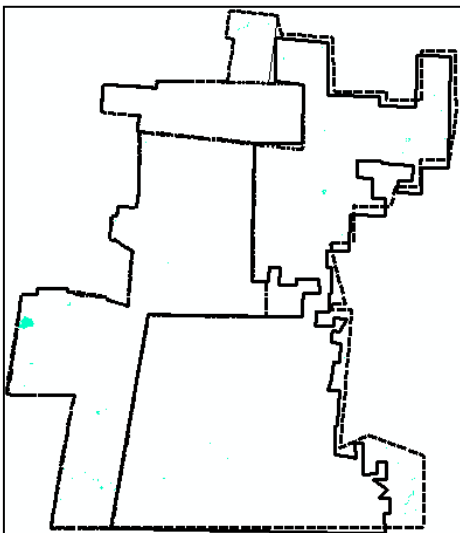
Selva mediana perennifolia y subperennifolia



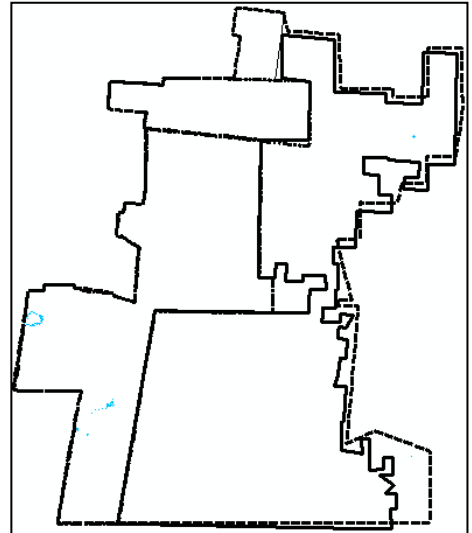
Selva baja subperennifolia



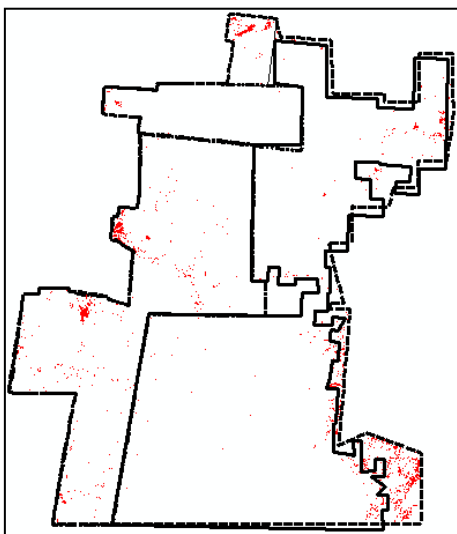
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia



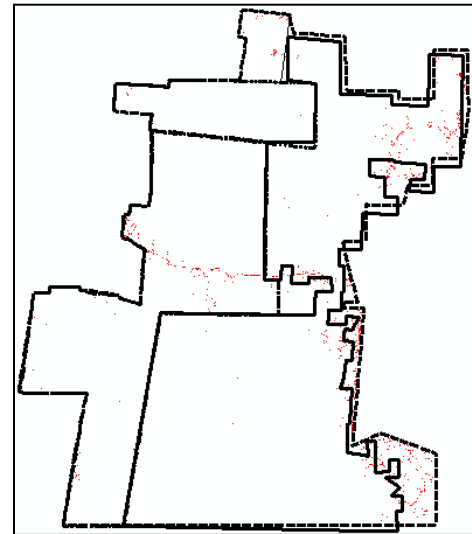
Vegetación acuática, subacuática y riparia



Cuerpo de agua



Zona agropecuaria, deforestada o alterada



Asentamiento humano

Figura 6.18 Tipos de vegetación 2010 con Máxima Verosimilitud

En la Cuadro 6.9 Resultados de las clasificaciones supervisadas, se muestran las superficies (km²) de cada una las coberturas utilizadas bajo cada uno de los criterios utilizados en 2001 y 2010. Es necesario aclarar que en principio los resultados arrojaron que la superficie de la Zona agropecuaria/deforestada/alterada de 2001 era mayor que la de 2010; y que existe una diferencia de 327.9 km² usando la Máxima Verosimilitud, y de 259.8 km² con Redes Neuronales. La razón de esto se encuentra en que la época del año en que se tomó la imagen del 2001 (22 de marzo) es más seca en comparación con la época en que se tomó la imagen del 2010 (26 de enero), por lo que los cultivos de temporal del 2001 fueron más distinguibles que los del 2010, mientras que para este último año, el sensor captó una escena con mayor homogeneidad en la vegetación debido a condiciones menos áridas en la fecha de toma. Se rechaza la idea de que ha existido una recuperación de la vegetación de más de 300 km². Por otra parte, los resultados del método Máxima Verosimilitud fueron corregidos con interpretación visual, lo que dio como resultado las estadísticas presentes en la Cuadro 6.9 Resultados de las clasificaciones supervisadas. Gracias a estas correcciones, la cobertura de asentamientos humanos y zona agropecuaria/deforestada/alterada en Máxima Verosimilitud del 2010 muestra una superficie más adecuada a la realidad, no así en el método Redes Neuronales de 2010, que muestra el error comentado anteriormente. Para determinar la deforestación de 2001 a 2010 se utilizaron los polígonos de 2010 que no se encontraban en 2001. El resultado que se obtuvo fue de 10 662.7359 ha (106.6 km²), es decir la deforestación abarcó más de 100 km² en un periodo de nueve años.

COBERTURA/MÉTODO	MV 2001	MV 2010	RN 2001	RN 2010
<i>Selva alta perennifolia y subperennifolia</i>	313.8	326.9	176.4	9.1
<i>Selva mediana perennifolia y subperennifolia</i>	4811.7	6666.8	4854.8	7767.9
<i>Selva baja subperennifolia</i>	3448	2187.3	3598.2	3553
<i>Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia</i>	4225	3502.8	4223.5	1779
<i>Vegetación acuática, subacuática y riparia</i>	32.1	24.7	26.4	16.4
<i>Cuerpo de agua</i>	14.7	15.7	7.6	6
<i>Zona agropecuaria/deforestada/alterada</i>	539.6	606.8	705.6	445.8
<i>Asentamientos humanos</i>	76.9	116.4	0.4	0

Cuadro 6.9 Resultados de las clasificaciones supervisadas (en km²). MV 2001 (Máxima verosimilitud 2001), MV 2010 (Máxima Verosimilitud 2010), RN 2001 (Redes Neuronales 2001), RN 2010 (Redes Neuronales 2010)

6.3 Análisis de cambio de cobertura forestal 2001-2012.

Hasta el momento se tiene únicamente la cobertura forestal del 2001 y del 2010, así como la deforestación que ocurrió en ese periodo. Los alcances de este trabajo incluyen una actualización de los cambios de cobertura forestal hacia 2011-2012, años de los que se obtuvieron imágenes SPOT con un cubrimiento casi total del área de estudio; sin embargo, con una gran presencia de nubes. Para obtener estos cambios se procedió a la digitalización de los polígonos mediante interpretación visual de las imágenes, con ello se obtuvo que los cambios en la cobertura por deforestación de 2010 a 2012 fueron de 934.9 ha (9.34 km²). Para obtener la cobertura actualizada se utilizaron los resultados de 2001 y 2010, ya que como se explicó anteriormente y como se muestra en su matriz de confusión, los resultados de 2010 no fueron satisfactorios, por lo que se utilizó como base los resultados de 2001 y 2010, y sobre esta se actualizó la cobertura a 2011 y 2012, es decir no solamente los resultados de 2010 fueron utilizados como sería de suponerse. Al cambio de cobertura forestal presente de 2001 a 2010, que es de 10 662.7359 ha (106.6 km²) se le agregó el encontrado en 2011 y 2012, que es de 934.9 ha (9.34 km²), lo cual dio como resultado que el cambio de cobertura forestal en la zona de estudio de 2001 a 2012 ha sido de 11 597.63 ha (116 km²). El total de cobertura de asentamientos humanos y zona agropecuaria/deforestada/alterada para los primeros meses de 2012 en el área de estudio es de 73 330 ha (733 km²).

Las superficies finales obtenidas para 2001 y 2012 corresponden a los valores presentados en la Cuadro 6.10 Superficies por cobertura de 2001 y 2012 (en km²).

Cobertura	2001	2012
<i>Selva alta perennifolia y subperennifolia</i>	313.8	326.7
<i>Selva mediana perennifolia y subperennifolia</i>	4811.7	6661.3
<i>Selva baja subperennifolia</i>	3448	2187.3
<i>Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia</i>	4225	3498.8

<i>Vegetación acuática y subacuática</i>	32.1	24.7
<i>Cuerpo de agua</i>	14.7	15.7
<i>Zona agropecuaria/deforestada/alterada</i>	539.6	616
<i>Asentamiento humano</i>	76.9	116.5

Cuadro 6.10 Superficies por cobertura de 2001 a 2012 (en km²).

Con los resultados de la máxima verosimilitud se obtuvieron las coberturas de las áreas protegidas del área. De esta manera, en la Cuadro 6.11 Uso de suelo y vegetación 2012 en áreas protegidas se presentan las coberturas totales de la Reserva de la Biósfera Calakmul, y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin.

Uso suelo y vegetación 2012 en Áreas Protegidas			
Cobertura/Área Protegida	RBC	ZSCE Balam Kú	ZSCE Balam Kin
Selva alta perennifolia y subperennifolia	27566.2	1653.1	0.3
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	312163.2	131988.7	533.4
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	182466.5	159365.6	81774.9
Selva baja subperennifolia	177944.5	94665.3	16429.3
Vegetación acuática y subacuática y riparia	74.7	1424.7	0.0
Cuerpo de agua	215.6	1169.5	0.0
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	16713.5	16385.0	992.0
Asentamiento humano	3457.8	1936.7	50.7
Total	720602.1	408588.5	99780.6

Cuadro 6.11 Uso de suelo y vegetación 2012 en áreas protegidas

En el Mapa 6.2 se identifican los polígonos que perdieron su cobertura forestal de 2001 a 2012 para pasar a ser asentamientos humanos o zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas, mientras que en el Mapa 6.3 se detalla el cambio de cobertura por ANP.

Todos los tipos de cobertura sufrieron algún cambio de 2001 a 2012. La superficie con mayor cambio ha sido la selva alta perennifolia y subperennifolia, con 2.1 % de su superficie total perdida por deforestación, divididas en 485.1 ha transformadas en zona agropecuaria/deforestada/alterada, y 182 ha convertidas en asentamientos humanos. Los cuerpos de agua tuvieron cambios equivalentes a 1.8 % de su superficie, distribuidos en 3.7 ha que se convirtieron en zona agropecuaria/deforestada/alterada,

y 21.5 ha que cambiaron a asentamientos humanos. La selva mediana perennifolia y subperennifolia tuvo cambios en 0.7 % de su superficie, siendo que 2 406.1 ha pasaron a tener uso agropecuario o han sido alteradas, mientras que 795.7 ha pasaron a ser asentamientos humanos, en su conjunto representan una pérdida de 2.1 % de su superficie total. La selva baja subperennifolia tuvo una disminución de 0.7 % en su cobertura, correspondiendo 2 174.2 ha que se convirtieron en zona agropecuaria/deforestada/alterada, mientras que 512.8 ha dieron paso a asentamientos humanos. Las selvas baja y mediana caducifolia y subcaducifolia fueron deforestadas en 0.4% para dar paso a 1 451 ha de zona agropecuaria/deforestada/alterada, mientras que 521.3 ha se convirtieron en asentamientos humanos. La vegetación acuática, subacuática y riparia también alcanzó 0.4 % de su superficie perdida por cambios de cobertura, los cuales 3.5 ha pasaron a ser zona agropecuaria/deforestada/alterada, y 9.9 ha se convirtieron en asentamientos humanos (para mayor detalle véase Cuadro 6.12 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 y Cuadro 6.13 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en los tipos de cobertura).

Cobertura	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano
Selva alta perennifolia y subperennifolia	485.1	182.0
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	2406.1	795.7
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	1451.0	521.3
Selva baja subperennifolia	2174.2	512.8
Vegetación acuática y subacuática	3.5	9.9
Cuerpo de agua	3.7	21.5
Nube	39.8	17.3
Sombra	116.3	18.0

Cuadro 6.12 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 (en hectáreas)

Porcentajes	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	1.5	0.6	2.1
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	0.5	0.2	0.7
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	0.3	0.1	0.4
Selva baja subperennifolia	0.6	0.1	0.7
Vegetación acuática y subacuática	0.1	0.3	0.4
Cuerpo de agua	0.2	1.5	1.7

Cuadro 6.13 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura

La información presentada en los párrafos anteriores corresponde al área de estudio total, recordemos que está conformada por la RBC, las ZSCE Balam Kú y Balam Kin, Laguna Ik y por unas superficies al sureste de la RBC que no están decretadas como ANP, pero que sirven para percatarse del avance de la frontera agropecuaria en

detrimento de las ANP. En los siguientes párrafos se describen los cambios de cobertura forestal en cada una de las ANP, tanto federal como estatal, es decir la RBC y las ZSCE Balam Kú y Balam Kin.

La RBC tuvo cambios de cobertura forestal de 2001 a 2012 de 2 564.9 ha (25.6 km²), divididos en 2 113 ha (21.1 km²) en su zona de amortiguamiento, y 455.9 ha (4.5 km²) en su zona núcleo. La cobertura que mayor disminución tuvo en su superficie fue la selva alta perennifolia y subperennifolia, con 158 ha, lo que representó el 0.57 % de su superficie total. La mayor parte de estos cambios se debieron para permitir el paso a la zona agropecuaria/deforestada/alterada, con 115.4 ha (11.5 km²), mientras que 42.6 ha (0.4 km²) pasaron a ser asentamientos humanos.

Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en la RBC (ha)			
Cobertura original/Cambio de cobertura	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	115.4	42.6	158.0
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	780.4	322.7	1103.1
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	509.9	198.8	708.8
Selva baja subperennifolia	348.5	245.7	594.2
Vegetación acuática y subacuática	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Cuerpo de agua	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Total	1754.3	809.8	2564.1

Cuadro 6.14 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en RBC (en hectáreas)

Porcentaje	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	0.42	0.15	0.57
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	0.25	0.10	0.35
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	0.28	0.11	0.39
Selva baja subperennifolia	0.20	0.14	0.33
Vegetación acuática y subacuática	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Cuerpo de agua	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Total	0.24	0.11	0.36

Cuadro 6.15 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en RBC

Los cambios de cobertura por zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas representaron 0.24% de los cambios totales, mientras que cambios por asentamientos humanos representaron el 0.11%, lo que dio que en las selvas de la RBC haya existido una pérdida de su vegetación en 0.36%, de 2001 a 2012. Las únicas coberturas que aparentemente no disminuyeron su superficie en la RBC por deforestación fueron los cuerpos de agua y la vegetación acuática, subacuática y riparia (para mayor detalle véase Cuadro 6.14 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en la RBC y Cuadro 6.15 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en RBC).

Enfocándose en la delimitación de la ZSCE Balam Kú, los cambios de cobertura forestal fueron de 2 177.8 ha (21.7 km²), lo que representa que las selvas de Balam Kú perdieron 0.53% de su superficie de 2001 a 2012. Tomando en cuenta la zonificación de esta área protegida, la distribución de la deforestación fue mayor en la zona de uso, donde alcanzó pérdidas de 1 916.8 ha (19.1 km²), le siguió la zona de amortiguamiento, sin embargo existieron grandes diferencias en el amortiguamiento I (norte) y en el amortiguamiento II (sur), puesto que en el norte sólo hubo deforestación por 60.2 ha (0.6 km²), mientras que en el sur alcanzó 128.7 ha (1.2 km²). La zona núcleo no se encuentra sin impactos por deforestación, de hecho la zona núcleo II (sur) alcanzó niveles de deforestación mayores que la zona de amortiguamiento I (norte), puesto que perdió su cobertura forestal en 72.2 ha (0.7 km²), mientras que la zona núcleo I (norte) parece no haber sufrido deforestación de 2001 a 2012.

A diferencia de la RBC, todas las coberturas presentes en la ZSCE Balam Kú tuvieron algún daño por deforestación, únicamente la selva alta perennifolia y subperennifolia no tiene distribución en esta área protegida, por lo tanto no tuvo impactos. La cobertura que mayor daño tuvo fueron los cuerpos de agua, que perdieron el 2.15% de su superficie. En cuanto a coberturas forestales, la selva baja subperennifolia fue la que mayor pérdidas tuvo, ya que perdió el 1.3% de su superficie, la cual se convirtió en 1 217.7 ha (12.1 km²) de zona agropecuaria/deforestada/alterada, y en 16.7 ha (0.1 km²) de asentamientos humanos (para mayor detalle véase Cuadro 6.16 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en ZSCE Balam Kú y Cuadro 6.17 Porcentajes de deforestación en cada tipo de cobertura en ZSCE Balam Kú).

Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en la ZSCE Balam Kú (ha)			
Cobertura (ha)	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	No es su distribución	No es su distribución	-
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	421.9	48.9	470.8
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	322.4	111.6	434.1
Selva baja subperennifolia	1217.7	16.7	1234.4
Vegetación acuática y subacuática	3.5	9.9	13.4
Cuerpo de agua	3.7	21.5	25.2
Total	1969.2	208.6	2177.8

Cuadro 6.16 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en ZSCE Balam Kú (ha)

Porcentaje	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	No es su distribución	No es su distribución	-
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	0.32	0.04	0.36
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	0.20	0.07	0.27
Selva baja subperennifolia	1.29	0.02	1.30
Vegetación acuática y subacuática	0.25	0.69	0.94
Cuerpo de agua	0.32	1.84	2.15
Total	0.48	0.05	0.53

Cuadro 6.17 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en ZSCE Balam Kú

Ahora, refiriéndose a la ZSCE Balam Kin, los cambios de cobertura forestal 2001-2012 fueron de 218.7 ha (2.1 km²), lo que representa que Balam Kin perdió el 0.2% de su cubierta forestal. En cuanto a su zonificación la zona de amortiguamiento ha sido la más afectada, con 174.9 ha (17.4 km²), mientras que la zona de protección tuvo 43.7 ha (0.4 km²) perdidas. La zona de restauración no tiene aparentemente pérdidas de cobertura forestal. Las pérdidas de cobertura forestal que se lograron distinguir dieron paso a zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas, ningún polígono correspondió a asentamientos humanos (para mayor detalle véase Cuadro 6.18 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en ZSCE Balam Kin y Cuadro 6.19 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en ZSCE Balam Kin).

Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en la ZSCE Balam Kin (ha)			
Cobertura (ha)	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	17.3	No hubo cambio	17.3
Selva baja subperennifolia	201.4	No hubo cambio	201.4
Vegetación acuática y subacuática	No es su distribución	No es su distribución	-
Cuerpo de agua	No es su distribución	No es su distribución	-
Total	218.7	-	218.7

Cuadro 6.18 Matriz de cambios de cobertura forestal 2001-2012 en ZSCE Balam Kin (ha)

Porcentaje	Zona agropecuaria/deforestada/alterada	Asentamiento Humano	Total
Selva alta perennifolia y subperennifolia	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	No hubo cambio	No hubo cambio	-
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	0.02	No hubo cambio	0.02
Selva baja subperennifolia	1.23	No hubo cambio	1.23
Vegetación acuática y subacuática	No es su distribución	No es su distribución	-
Cuerpo de agua	No es su distribución	No es su distribución	-
Total	0.22	-	0.22

Cuadro 6.19 Porcentajes de deforestación 2001-2012 en cada tipo de cobertura en ZSCE Balam Kin

Mapa 6.2 Cambios de cobertura forestal 2001-2012

Mapa 6.3 Cambios de cobertura forestal 2001-2012 por ANP

6.4 Cobertura forestal, fauna y caminos.

6.4.1 Superficie en riesgo de deforestación e impactos.

Los caminos presentes en el área de estudio cruzan diferentes tipos de vegetación y uso de suelo. Los buffers realizados a cada tipo de camino sirvieron para determinar la superficie de tipos de vegetación que se encuentra en cada grado de riesgo de deforestación e impactos de acuerdo a las distancias del Cuadro 5.1 Distancias de caminos y riesgos de deforestación e impactos (véase Mapa 6.4 Red de caminos y su zona de influencia).

Los caminos en el área de estudio (carreteras, terracerías, veredas y brechas) generan impactos de diferente grado en todos los tipos de vegetación y uso de suelo, es decir no hay alguna cobertura que no esté impactada o que no esté en riesgo de ser impactada, y no hay camino que no genera algún impacto o implique algún riesgo de deforestación. Para determinar los impactos también se consideraron especies de animales observadas a lo largo de los caminos durante transectos realizados en campo, ya sea especies que estén cruzando o que hayan sido arrolladas por el flujo vehicular. A continuación se presentan las superficies en riesgo por tipo de camino, así como fauna afectada por los caminos:

Carreteras.

Como se muestra en la Cuadro 6.20 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de carreteras, los valores de zona agropecuaria/deforestada/alterada y asentamiento humano van decreciendo entre más lejano se encuentre el camino, es clara la influencia que generan las actividades humanas sobre los distintos tipos de vegetación y uso de suelo alrededor de la carretera. La selva mediana perennifolia y subperennifolia es la cobertura con mayor daño, mientras que cuerpos de agua son los menos dañados debido a que su presencia es escasa y no se encuentran cercanos a las carreteras. Respecto a la fauna encontrada, fue posible observar especies atropelladas y otras que cruzaban. En los recorridos realizados en la carretera federal, se localizó rumbo a Conhuas un venado atropellado, más adelante, alrededor del mediodía, se observó el cruce de una zorra gris, además de varios de perros sin dueño, sobre todo

MAPA 6.4 Red de caminos y su zona de influencia.

cercanos a la cabecera municipal Xpujil, los perros son fauna nociva que afecta a las especies nativas. En el tramo norte de la carretera estatal que corre de Xpujil a Dzibalchen fueron encontradas aves conocidas como tapacaminos, así como un tlacuache por la noche. En el tramo sur de la carretera estatal, que va de Xpujil hacia Arroyo Negro, únicamente fueron localizados una víbora de cascabel arrollada, así como varios perros. En los sondeos realizados a la población local de las comunidades que viven a lo largo de la carretera estatal, se encontró que la mayor cantidad de avistamientos y atropellos de especies se realiza durante la época de secas, tiempo en el que salen de la Reserva para buscar cuerpos de agua. La población local cuenta que en los años recientes e incluso en la época seca del año pasado fue posible observar jaguares, panteras (jaguares negros) y venados cruzando durante la sequía, incluso han existido problemas entre los dueños de borregos y los jaguares, los cuales al salir de la Reserva, o incluso dentro de ella, han cazado borregos, generando molestia en sus dueños. Parece ser que la abundancia del puma es menor que la del jaguar, puesto que la población local afirma no haberla visto en años o en algunos casos siquiera conocer esta especie. La mayor concordancia entre la población se encuentra en que la zorra gris y el tlacuache son las especies que más frecuentemente cruzan las carreteras y son también las más afectadas por atropellamiento. También fueron mencionados como frecuentes de cruzar el guaqueque y diferentes especies de reptiles al tomar el Sol cerca de los caminos.

En Balam Kú es posible observar la aparición de millones de murciélagos que salen a alimentarse cuando se mete el Sol (Figura 6.19); sin embargo, la cercanía de la carretera federal a tan sólo unos cuantos metros provoca que cientos de ejemplares sean arrollados diariamente por el tráfico.

En la carretera que parte de Conhuas y que va al sitio arqueológico de Calakmul se pudo observar fauna cruzando durante los recorridos. Al mediodía se observó un grupo de pecaríes que estaban desplazándose y que rápidamente huyeron al escuchar el motor de la camioneta. También se observó un par de ejemplares de venado cola blanca, un adulto y un juvenil. Durante el mismo recorrido se observó un gavilán (especie no distinguida) volando bajo cercano a la carretera. Por la tarde, se observó un guaqueque desplazándose a un costado de la carretera.

Los trabajadores del sitio arqueológico, los cuales siempre hacen el mismo recorrido por la carretera, afirman que es común encontrar especies cruzando durante el amanecer y el atardecer. Son comunes los pecaríes, venados, faisanes y pavos ocelados. Al ser una carretera que comunica con un sitio arqueológico destinado al turismo, es frecuente el tránsito de vehículos, en algunos casos a exceso de velocidad, lo que ha generado atropellos de varios ejemplares, los más frecuentes, de acuerdo con los guardaparques, son contra los faisanes y pavos ocelados.

Impacto de carreteras	Severo		Alto		Moderado		Bajo	
	km ²	ha	km ²	ha	km ²	ha	km ²	ha
COBERTURA								
Selva alta perennifolia y subperennifolia	10.9	1088.3	16.5	1649.7	17.1	1709.1	17.3	1731.0
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	129.0	12896.1	151.4	15140.4	158.4	15841.0	161.7	16174.1
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	84.8	8480.5	76.6	7661.5	68.9	6893.0	64.3	6430.3
Selva baja subperennifolia	18.7	1868.6	26.4	2636.8	27.9	2786.4	29.7	2968.4
Vegetación acuática, subacuática y riparia	1.1	106.4	0.8	79.5	0.3	29.3	0.2	24.1
Cuerpo de agua	0.1	14.1	0.0	1.5	0.0	0.1	0.0	0.0
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	93.2	9315.5	63.2	6325.0	53.6	5358.4	43.4	4344.3
Asentamiento humano	41.1	4114.7	12.6	1263.6	9.4	944.0	8.7	874.6
TOTAL	378.8	37884.1	347.6	34758.1	335.6	33561.2	325.5	32546.8
Porcentaje								
COBERTURA								
Selva alta perennifolia y subperennifolia	2.9		4.7		5.1		5.3	
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	34.0		43.6		47.2		49.7	
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	22.4		22.0		20.5		19.8	
Selva baja subperennifolia	4.9		7.6		8.3		9.1	
Vegetación acuática, subacuática y riparia	0.3		0.2		0.1		0.1	
Cuerpo de agua	0.0		0.0		0.0		0.0	
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	24.6		18.2		16.0		13.3	
Asentamiento humano	10.9		3.6		2.8		2.7	
TOTAL	100.0		100.0		100.0		100.0	

Cuadro 6.20 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de carreteras (en km², ha y %)

Terracerías.

Las terracerías, al igual que las carreteras, cruzan y dañan en mayor medida la selva mediana perennifolia y subperennifolia, mientras que se observa que la presencia de zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas y asentamientos humanos es mayor entre más cercano está el camino. Esto es así debido a que las terracerías son utilizadas para conectarse con carreteras, comunicar poblados entre sí y para llegar a las zonas de cultivo de la población, por lo que entre más cerca a la terracería, se encuentran mayor número de asentamientos humanos y zonas

agropecuarias/deforestadas/alteradas (véase Cuadro 6.21 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de carreteras).

En estos caminos también es posible encontrar especies que cruzan, sin embargo son atropelladas en menor medida debido a que el tránsito es local y de menor velocidad que las carreteras. En los recorridos realizados por terracería realizados en el mes de agosto, época de lluvias, se observaron las huellas de un mapache, un tepezcuintle y las de un venado o pecarí. En el mes de enero únicamente se encontró un águila posada en las ramas de un árbol, no se pudo identificar la especie porque se internó en la vegetación. Cuentan los habitantes de la localidad Narciso Mendoza que es común que encuentren fauna atravesando las terracerías, siendo vistos sobre todo el tepezcuintle y el mapache, los cuales salen por la noche a alimentarse atraídos por las milpas sembradas en las cercanías de las terracerías.

Impacto de terracerías	Alto		Moderado		Bajo	
	km ²	ha	km ²	ha	km ²	ha
COBERTURA						
Selva alta perennifolia y subperennifolia	27.1	2709.3	24.3	2429.8	41.2	4118.1
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	419.3	41931.6	402.2	40223.9	732.5	73245.2
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	211.6	21159.0	154.4	15440.1	200.3	20032.2
Selva baja subperennifolia	64.6	6465.0	74.8	7484.7	158.7	15866.7
Vegetación acuática, subacuática y riparia	1.1	106.8	0.8	82.6	0.8	82.5
Cuerpo de agua	0.1	12.5	0.0	3.8	0.1	12.8
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	170.1	17007.3	77.0	7702.2	78.7	7866.1
Asentamiento humano	36.8	3677.6	17.8	1784.5	16.8	1676.3
TOTAL	930.7	93068.9	751.5	75151.6	1229.0	122899.8
Porcentaje						
COBERTURA	%		%		%	
Selva alta perennifolia y subperennifolia	2.9		3.2		3.4	
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	45.1		53.5		59.6	
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	22.7		20.5		16.3	
Selva baja subperennifolia	6.9		10.0		12.9	
Vegetación acuática, subacuática y riparia	0.1		0.1		0.1	
Cuerpo de agua	0.0		0.0		0.0	
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	18.3		10.2		6.4	
Asentamiento humano	4.0		2.4		1.4	
TOTAL	100.0		100.0		100.0	

Cuadro 6.21 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de terracerías.

Veredas

Las veredas generan un impacto y riesgo menor que carreteras y terracerías, sin embargo, también tienen influencia, principalmente en la selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia, mientras que cerca del 20% de la superficie en riesgo o impacto fue zona agropecuaria/deforestada/alterada y cerca del 3% correspondió a asentamientos humanos. La presencia de las veredas es escasa, por lo que los impactos que generan no son comparables a otros caminos, además es probable que no generen un impacto más allá de una distancia de 100 metros (véase Cuadro 6.22 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de veredas).

Los recorridos realizados por veredas correspondieron a los situados en las zonas arqueológicas de Calakmul y Becán. En el mes de agosto, época de lluvias, pudieron ser observados varios ejemplares de rana (especie no identificada) en el sitio de Becán. Para el mes de enero ya no estuvieron presentes en este lugar en tal abundancia. El sitio arqueológico Calakmul no pudo ser visitado en agosto debido al paso del huracán Ernesto. Sin embargo, para enero sí fue posible visitarlo, en sus veredas se pudo apreciar su uso por parte de abundantes pavos ocelados, un hocofaisán, una víbora (especie no identificada), ranas, una familia de coatíes (Figura 6.20), así como varios ejemplares del género *Anolis*. Desde la posición de la vereda es posible observar monos saraguato aullando y monos araña desplazándose de árbol en árbol (Figura 6.21)

Impacto de veredas	Impacto alto	
	km ²	ha
Cobertura		
Selva alta perennifolia y subperennifolia	3.4	338.1
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	25.2	2517.0
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	33.0	3302.2
Selva baja subperennifolia	6.6	661.3
Vegetación acuática, subacuática y riparia	0.2	16.9
Cuerpo de agua	0.0	0.1
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	19.9	1986.9
Asentamiento humano	2.7	268.5
TOTAL	90.9	9091.1

Porcentaje	Impacto alto
Cobertura	%
Selva alta perennifolia y subperennifolia	3.7
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	27.7
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	36.3
Selva baja subperennifolia	7.3
Vegetación acuática, subacuática y riparia	0.2
Cuerpo de agua	0.0
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	21.9
Asentamiento humano	3.0
TOTAL	100.0

Cuadro 6.22 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de veredas

Brechas.

Las brechas tienen un tamaño estrecho; sin embargo, la selva mediana perennifolia y subperennifolia es la cobertura más dañada por brechas. Además, más del 7% de la superficie en la zona de influencia se encuentra ocupada por zona agropecuaria/deforestada/alterada y asentamientos humanos (véase Cuadro 6.23 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de brechas).

Las especies que utilizan estos caminos son vulneradas en menor medida que lo que hacen carreteras y terracerías, debido a que la transportación con automóviles es imposible, por lo que únicamente a pie o en cuatrimoto es posible. En los recorridos realizados en agosto se observó la presencia de un armadillo, así como el sonido de numerosas aves, como la chachalaca, tucán y pájaro carpintero. En los recorridos de enero se observaron una ardilla, una pava cojolita y un pájaro carpintero. Se tienen registros por parte de los habitantes locales, de venado temazate y cola blanca, pecaríes, tepezcuintle, águila, huellas de tapir y jaguar, entre otras.

Impacto de brechas	Impacto alto	
	km ²	ha
Cobertura		
Selva alta perennifolia y subperennifolia	26.5	2649.3
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	472.9	47285.3
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	72.5	7246.3
Selva baja subperennifolia	95.4	9543.6
Vegetación acuática, subacuática y riparia	0.3	29.2
Cuerpo de agua	0.1	5.1
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	46.0	4600.2
Asentamiento humano	12.1	1213.7
TOTAL	725.7	72572.7
Porcentaje	Impacto alto	
Cobertura	%	
Selva alta perennifolia y subperennifolia	3.7	
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	65.2	
Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	10.0	
Selva baja subperennifolia	13.2	
Vegetación acuática, subacuática y riparia	0.0	
Cuerpo de agua	0.0	
Zona agropecuaria/deforestada/alterada	6.3	
Asentamiento humano	1.7	
TOTAL	100.0	

Cuadro 6.23 Superficie en riesgo de deforestación e impactos de brechas

La cobertura con mayor impacto y en mayor riesgo de deforestación por caminos es la selva mediana perennifolia y subperennifolia, debido a que es la cobertura con mayor dominancia en el área de estudio, por lo que es fragmentada con mayor frecuencia por los caminos. Por otra parte, se observa que entre más cercano se encuentre el camino (carreteras y terracerías), más disturbios y zonas sin su cobertura original.

Además, es notorio que en las zonas desprovistas de su vegetación original, como los límites al este de la RBC, la presencia de fauna es menor en comparación con las zonas con vegetación no perturbada, y por el contrario existen especies exóticas nocivas para las locales. Como prueba de esto, están los escasos registros de fauna obtenidos en la carretera estatal que va de norte a sur, que limita a tan sólo 1 ó 2 kilómetros de la Reserva en su porción sureste, pero que la divide en dos partes en su porción norte, ya que en ella tan sólo se registraron un tlacuache, una víbora de

cascabel arrollada, tapacaminos y varios perros ferales, aunque existen reportes de la población local de mayor incidencia en la época de secas. Por el contrario, en la carretera que va al sitio arqueológico, la cual penetra la ZSCE Balam Kú y la RB Calakmul, se encuentra una mayor variedad de fauna debido a que existe la cobertura forestal original, sobre todo en la porción de la RB Calakmul, que se encuentra más alejada de la carretera federal No. 186, ya que en ella se lograron observar en un periodo de tiempo más corto una mayor cantidad de especies, como son pecarí, venado cola blanca, águila, guaqueque, pavo ocelado y hocofaisán.

En las zonas cercanas a los campos de cultivo, es posible encontrar especies con un amplio rango de tolerancia a las actividades humanas, como tepezcuintle, mapache y zorra gris, así lo demuestran las huellas encontradas y los reportes de la población local; especies de mayor tamaño o que no tienen el mismo nivel de adaptación prefieren no cruzar por estos caminos, a menos que sea estrictamente necesario, por ejemplo durante la época de sequía, tiempo en el que cruzan en busca de agua. Adentrándose unos metros a la RBC en su porción este es posible observar variedad de aves como pava cojolita, tucanes, chachalacas, búhos, pájaro carpintero, entre otras, además de algunos pequeños mamíferos como ardillas, tepezcuintles entre otros. Al interior de la RBC, con menor presión antrópica y con menor cantidad de caminos es donde se puede encontrar una mayor variedad de especies y de mayor tamaño, como tapir, venado temazate y cola blanca, pecarí, jaguar, puma, cocodrilos en los cuerpos de agua, entre otros.

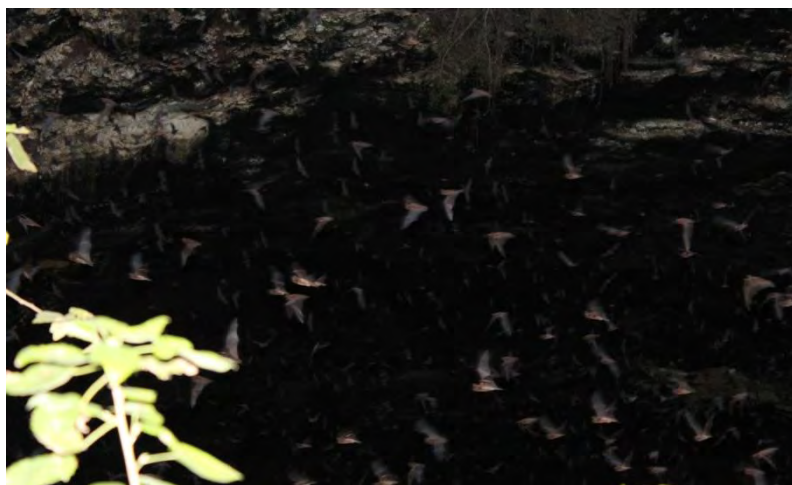


Figura 6.19 Murciélagos saliendo de Balam Kú. Fotografía: Rita García Fortis



Figura 6.20 Coatí (*Nasua narica*) desplazándose por una vereda. Fotografía: Gerardo Rodríguez Mosqueda



Figura 6.21 Vista desde una vereda de un mono araña (*Atteles geoffroyi*) desplazándose por los árboles. Fotografía: Rita García Fortis.



Figura 6.22 Pavo ocelado (*Meleagris ocellata*) cercano a las veredas del sitio arqueológico de Calakmul. Fotografía: Gerardo Rodríguez Mosqueda

6.4.2 Deforestación asociada a caminos

En los párrafos anteriores se describió el riesgo de deforestación por tipo de camino, en las siguientes líneas se trata el tema de la deforestación producida por la cercanía de los caminos, ocurrida en el periodo 2001-2012, en el área de estudio y en las Áreas Protegidas.

Los caminos traen consigo cambios de cobertura forestal, sin embargo los distintos tipos de camino no generan la misma intensidad de efectos. El área de estudio cuenta con una amplia red de caminos, que incluye carreteras, terracerías, brechas y veredas. Los caminos han producido patrones de cambio de cobertura forestal, principalmente al este de la Reserva de la Biósfera Calakmul, que presenta varios kilómetros de caminos y cuyo límite se encuentra con la frontera agropecuaria y ya la ha penetrado. En el sur del área de estudio también se encuentran una gran cantidad de caminos, principalmente brechas y algunas terracerías que fueron usadas durante la explotación del chicle y maderas preciosas. El norte del área de estudio, que corresponde al norte de la RBC, al norte de la ZSCE Balam Kú y a la ZSCE Balam Kin cuenta con pocos caminos, lo que influye en que en esta zona haya pocos cambios de cobertura forestal (véase Mapa 6.5).

Utilizando las distancias del Cuadro 5.1 Distancias de caminos y riesgos de deforestación e impactos, se obtuvo que la deforestación de 2001 a 2012 influida por cercanía de los caminos del área de estudio es de 6 487 ha (64.9 km²). Si tomamos en cuenta que la deforestación total en dicho periodo fue de 11 597.63 ha (116 km²), entonces los caminos han influido por cercanía en 56% de los cambios de cobertura forestal. Las carreteras han influido en la deforestación de 2 824 ha (28.2 km²), lo que representa el 24% de los cambios de cobertura totales; mientras que las terracerías lo han hecho en 2 901.3 ha (29 km²), equivalentes a 25% de los cambios totales. Aunque las carreteras provocan más daños, generan mayor deforestación y de ella parten otros caminos secundarios como las terracerías, estas tienen una longitud mucho mayor que las carreteras (véase Cuadro 6.1 Total de caminos por tipo en el área de estudio). Las brechas son otro tipo de camino ampliamente distribuido, exceptuando el norte del área de estudio, han influido en la deforestación de 591 ha (5.9 km²) correspondientes a 5% de la deforestación total de la zona; mientras que las veredas,

de escasa distribución, lo han hecho sobre 171.2 ha (1.7 km²), equivalentes al 1.4% de los cambios de cobertura forestal totales. La deforestación influenciada por la cercanía de cualquier tipo de camino ha dado paso a asentamientos humanos y principalmente zonas agropecuarias/deforestadas/alteradas, ya que de estos cambios de cobertura, el 71.8% correspondió a este último, mientras que 28.2% se convirtieron en asentamientos humanos (para mayor detalle véase Cuadro 6.24 Deforestación 2001-2012 por caminos en área de estudio).

Deforestación 2001-2012 por caminos en área de estudio (ha)					
COBERTURA/CAMINO	Carreteras	Terracerías	Veredas	Brechas	Total
Asentamiento humano	843.1	806.5	28.1	149.3	1827.0
Zona agropecuaria	1980.9	2094.8	143.1	441.6	4660.4
Total	2824.0	2901.3	171.2	591.0	6487.4

Cuadro 6.24 Deforestación 2001-2012 asociada a caminos en área de estudio.

Ahora bien, tomemos en cuenta la delimitación de las Áreas Protegidas del área de estudio. En la RBC, los cambios de cobertura forestal fueron de 2 564.9 ha (25.6 km²), de las cuales 1924.2 ha (19.2 km²) fueron influenciados por la cercanía de los caminos, y son equivalentes al 75% de la deforestación en la RBC de 2001 a 2012.

En la ZSCE Balam Kú, los cambios de cobertura forestal 2001-2012 fueron de 2 177.8 ha (21.7 km²), los caminos influenciaron por cercanía en la deforestación de 56% de estos cambios, lo que equivale a 1227.68 ha (12.2 km²).

Dentro de la ZSCE Balam Kin, la deforestación del 2001 al 2012 fue de 218.7 ha (2.1 km²); la cercanía de los caminos influyó en la deforestación de 25.1 ha (0.2 km²), equivalentes al 11.5% de los cambios de cobertura de ese periodo.

Deforestación por caminos en Áreas Protegidas (ha)			
Tipo camino	RBC	Balam Kú	Balam Kin
Carreteras	589.1	463.4	-
Terracerías	909.8	660.3	13.2
Brechas	420.8	29.0	-
Veredas	4.5	74.9	11.8
Total	1924.3	1227.7	25.1

Cuadro 6.25 Deforestación 2001-2012 por caminos en cada ANP.

Mapa 6.5 Deforestación asociada a caminos

Como se observa en la Cuadro 6.25 Deforestación 2001-2012 por caminos en cada ANP, las terracerías son el tipo de camino que mayores efectos provoca, esto debido a su extensión y a la superficie de polígonos que han perdido su cobertura forestal. A pesar de su decreto como Áreas Protegidas a nivel federal y estatal, no se garantiza su conservación, ya que los caminos traen consigo efectos en el área donde se encuentren, estando especialmente vulnerables las zonas donde la cobertura vegetal aún se conserva y donde existen aún especies en alguna categoría de amenaza de extinción.

Se observa que existe una estrecha relación entre la deforestación y los caminos, ya que en las zonas donde se encuentran las redes de caminos es donde existe mayor deforestación, esto se ejemplifica claramente con el sureste del área de estudio, limitando con la RBC, lugar donde se presentaron las mayores pérdidas de cobertura forestal. Asimismo, el área atravesada por la carretera federal No. 186 y un área de influencia (incluyendo la influencia que generan otros caminos que de ella parten), cruza y parte en dos a la RBC y a la ZSCE Balam Kú y muestra que a 13 km de distancia ha habido pérdida de vegetación de 2001 a 2012 de 811.7 ha (8.1 km²). Estos cambios de cobertura son impactos negativos para la conservación de la biodiversidad de la zona, sobre todo si se toma en cuenta la forma de la RBC, que se hace estrecha de manera que la carretera federal no la cruza totalmente, sin embargo en las áreas fuera de la RBC la carretera fragmenta manchones de selva, entre ella la correspondiente a la ZSCE Balam Kú, la cual es completamente partida en dos. La biodiversidad no respeta fronteras y no va a dejar de interactuar con el entorno cuando se presente los límites de las áreas protegidas, por lo que los caminos y en especial las carreteras influyen dentro y fuera de la delimitación de las áreas protegidas, teniendo el mismo impacto negativo sea área protegida o no.

Los resultados muestran que la red de caminos ha influido fuertemente en la deforestación del área de estudio y en cada área protegida. Ha avanzado a un ritmo acelerado fuera de la superficie de las áreas protegidas, sobre todo de la RBC, y aunque a un ritmo más lento, ha penetrado la delimitación de las áreas protegidas. Los límites de las áreas protegidas no son muros para evitar la perturbación humana de las selvas, puesto que dentro de ellas se encuentran elementos de la sociedad tan

importantes como las carreteras, terracerías, brechas y veredas. En conjunción con estos disturbios y muy relacionados entre sí, la frontera agropecuaria y de asentamientos avanza al interior de las áreas protegidas, además de generar más caminos y con ello mayores disturbios. En el Mapa 6.6 se observa el uso de suelo y vegetación obtenido para 2012, al este y sureste de la RBC se aprecia la mayor abundancia de polígonos de zona agropecuaria/deforestada/alterada alrededor de la zona de estudio, y que coincide con la presencia de la carretera estatal, lo que comprueba la fragilidad del límite este de la RBC. Sin embargo, es imposible prohibir toda actividad humana dentro de las áreas protegidas, puesto que dentro y próxima a ella se encuentran decenas de localidades con necesidades de recursos y espacio, necesidades de caminos para comunicarse y extraer recursos de su entorno.

Mapa 6.6 Uso de suelo y vegetación 2012

Conclusiones y recomendaciones

Es necesario estar conscientes que la geografía dota de instrumentos para realizar investigaciones objetivas y resolver problemáticas ambientales o de cualquier índole que tengan una manifestación espacial. Dentro de su amplio campo de estudio es posible tomar alguna problemática en particular, en el caso de esta tesis fueron las problemáticas relacionadas con la conservación de la biodiversidad, ocasionados por la relación Humano-Naturaleza. Se pretendió saber cómo un elemento creado por el ser humano, de gran importancia para sus actividades comerciales y de comunicación, como los caminos (carreteras, terracerías, veredas y brechas), han influido en la deforestación de uno de los últimos santuarios de vida silvestre de México, la Reserva de la Biósfera Calakmul (RBC), así como las Zonas Sujetas a Conservación Ecológica Balam Kú y Balam Kin.

Es necesario hacer énfasis en que es urgente realizar investigaciones geográficas aplicadas, es decir que no se queden en cuestiones descriptivas, desde la cuestión ambiental existe un gran campo debido a los innumerables conflictos ocasionados por las actividades del ser humano.

Los límites de la RBC muestran una tendencia a los cambios de cobertura forestal, especialmente al sureste, zona límite de la RBC con la frontera agropecuaria y la República de Guatemala. Los asentamientos humanos y principalmente las zonas agropecuarias han penetrado el límite sureste de la RBC, así como en sus dos zonas núcleo. Esto también ha ocurrido, aunque en menor medida, en las ZSCE Balam Kú y Balam Kin y en Laguna Ik, en prácticamente todas las zonificaciones de las áreas protegidas, exceptuando la zona núcleo norte de la ZSCE Balam Kú y la zona de restauración de la ZSCE Balam Kin, las únicas zonas sin deforestación aparente apreciable de 2001 a 2012.

Referente a las técnicas de percepción remota es necesario apuntar que para realizar investigaciones multitemporales con imágenes satelitales es imprescindible contar con imágenes de fecha similar entre cada año, de lo contrario se vuelve difícil contrastar las dos imágenes, puesto que la respuesta espectral de los elementos del paisaje, sobre todo la vegetación, pueden variar drásticamente de una fecha a otra.

Para esta investigación, por cuestiones de disponibilidad de imágenes, se tuvo que usar para 2001 una imagen del mes de marzo, y para 2010, una imagen del mes de enero, lo que resultó en diferencias de la respuesta espectral de la vegetación entre cada fecha y por lo tanto en los resultados de las clasificaciones de 2001 y 2010.

Las técnicas de la ciencia de la percepción remota, como cualquier otra técnica, generan errores, el grado de ellos depende de la precisión del usuario. Para este caso se demostró que las técnicas usadas tuvieron grado de confianza de aproximadamente 80%, lo que implicó que se tuvieron que corregir ciertos errores en las coberturas zona agropecuaria/deforestada/alterada y asentamiento humano. Se concluye que los métodos de percepción remota deben apoyarse de otras técnicas para poder llegar a mejores resultados, sobre todo en las coberturas que generan confusión al programa. Por ello fue necesario complementar y corregir el método de máxima verosimilitud.

Se demostró que el método de máxima verosimilitud tuvo mejores resultados que redes neuronales debido a que este último método confundió los asentamientos humanos, con lo que se omitieron los polígonos que perdieron su cobertura forestal para convertirse en asentamientos humanos.

Las carreteras son el camino que genera impactos mayores a la cobertura forestal, sin embargo, las terracerías, por su gran abundancia por toda el área de estudio, son las que han provocado mayores cambios de cobertura forestal, principalmente a la selva alta y mediana perennifolia y subperennifolia y cuerpos de agua. Las brechas también generan un gran impacto debido a su distribución, sin embargo gran parte de estos caminos son antiguos, vestigios del pasado de explotación maderera y chiclera, que aunque aún existe, ya no es en las cantidades de antaño.

La forma del polígono de la RBC no es adecuada para garantizar la conservación de la biodiversidad. El cruce de las carreteras federal y estatal, así como la presencia de terracerías que parten de ella, ha generado procesos de deforestación alrededor de estos. La zona núcleo sur realmente no está protegida, está parcialmente rodeada por una franja de alrededor de 2 km de ancho de aprovechamiento intensivo, terminando la superficie de esta franja se encuentran la carretera estatal y varias localidades con

necesidades. La zona núcleo norte es atravesada por esta carretera, por lo que realmente tampoco se encuentra adecuadamente protegida. En la porción central de su polígono, la RBC se vuelve un estrecho de conservación, aunque limita con la ZSCE Balam Kú. Sin embargo, ambas áreas protegidas son fragmentadas por la carretera federal, desde la cual han ocurrido procesos de deforestación. Es necesaria y urgente una nueva zonificación de cada una de las áreas protegidas en cuestión, de manera que puedan cumplir con los objetivos de conservación de la biodiversidad.

Se puede considerar como legítimo el derecho de las poblaciones locales a extraer recursos de la selva y para ello construir y utilizar caminos que tendrán impactos en la conservación de la biodiversidad, puesto que es el entorno en el que viven, y en todo caso, un tesista de la Ciudad de México no es quién para decidir si explotan recursos o no. Sin embargo, dejando de lado si es legítima la explotación, podemos preguntarnos ¿qué futuro puede tener la conservación de la biodiversidad de la zona (realizada por indígenas, geógrafos, biólogos, políticos, campesinos, todos juntos, o quién sea) si existen miles de personas buscando diferentes tipos de recursos como alimentos, agua, económicos, vestido, ocio, turismo, entre otros, ¿qué futuro le espera si fuera e incluso dentro de las áreas protegidas se desarrollan actividades depredadoras? Al menos en cuanto a lo que muestran los caminos, se observa que la deforestación tiene un avance de 2001 a 2012, es decir los mecanismos de conservación no han sido totalmente exitosos, aunque sin duda de no existir las áreas protegidas Reserva de la Biósfera Calakmul, y Zonas Sujetas a Conservación Ecológica Balam Kú y Balam Kin la situación sería mucho peor, ya que se observa que en sus límites los cambios de cobertura forestal son más intensos, es decir, la delimitación de las áreas protegidas ha aminorado el avance de la frontera agropecuaria.

El hecho de que los cambios de cobertura forestal en el área de estudio sean mayores fuera de las áreas protegidas que dentro de ellas puede interpretarse de dos formas. La primera es bajo la consideración de que al haber menor deforestación dentro de las áreas protegidas que fuera, se tomen por buenos los esquemas de conservación y se considere como un éxito las políticas llevadas a cabo por los gobiernos. La otra consideración es tomando en cuenta que las áreas protegidas son “islas” de conservación, y que fuera de ellas y en menor medida dentro, se están

llevando a cabo rápidos cambios y pérdida de biodiversidad, por lo que el papel de las áreas protegidas es un contenedor de la biodiversidad, pero que tarde o temprano será consumido por los cambios de cobertura forestal a partir de las acciones del ser humano.

Los resultados obtenidos en los recorridos realizados por los diferentes caminos no permiten concluir cuáles son exactamente las áreas ideales para ubicar puentes para el paso de fauna. El tiempo que se invirtió en los recorridos no fue suficiente para obtener resultados representativos.

En la medida en que la academia contribuya a desarrollar ecotecnias y esquemas de desarrollo sustentable y sostenible que beneficien a la totalidad de la población se logrará apaciguar la deforestación y pérdida de biodiversidad, aunque para ello se tenga que tomar cierto espacio para llevar a cabo las actividades sustentables. Por otra parte, la población también cuenta con conocimientos tradicionales acerca de su entorno, lo cual es fundamental para llevar a cabo sus actividades, por lo que no se parte de cero a la hora de seleccionar actividades que puedan realizar. Aunque es necesario recordar que la mayoría de la población del lugar es proveniente de otros estados, aunque de similares características, como Tabasco y Veracruz.

La realización de más estudios que profundicen en los efectos ecológicos de los caminos presentes en las selvas debe ser una prioridad para los tomadores de decisiones de las áreas protegidas, con ello se pueden diseñar esquemas de mitigación de impactos a través del manejo de bordes. Con los resultados obtenidos en este estudio se cuenta con la información de cuáles son las zonas que han perdido su vegetación debido los caminos, por lo que es prioritario tomar acciones en dichas zonas que permitan amortiguar los efectos producidos por la deforestación.

Bibliografía

Aguirre, R. (coordinador), 2009. *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. Instituto de Geografía, UNAM. México D.F.

Arcia, M. 1994. *Geografía del medio ambiente. Una alternativa del ordenamiento ecológico*. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), México D.F.

Bocco, G., 2003. *Carl Troll y la ecología del paisaje*. En Gaceta Ecológica, num. 68 SEMARNAT. México D.F.

Bocco, G., Urquijo, P. y Vieyra, A. (coordinadores), 2011. *Geografía y ambiente en América Latina*. CIGA UNAM-INE SEMARNAT. México D.F.

Challenger A., 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México*. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad. México D.F.

CONABIO, 2006. *Capital natural y bienestar social*. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad. México D.F.

Chuvieco, E., 2002. *Teledetección ambiental*. Ariel. Barcelona, España.

Chuvieco, E., 2008. *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel. Barcelona, España.

Daltabuit, M., Valenzuela, E., Cisneros, H., Mejía, J. y Terrón I., 2005. *Sustentabilidad y ecoturismo en Tres Garantías, Quintana Roo*. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM. Cuernavaca, Morelos, México.

Estrada, A., Coates, R., 2003. *Las selvas tropicales húmedas de México*. Fondo de Cultura Económica; México DF.

García-Gil, G., March, I., Castillo, M.A., 2001 *Transformación de la vegetación por cambio de uso de suelo en la Reserva de la Biósfera Calakmul*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México D.F.

García-Gil, Palacio Prieto, J.L., Ortiz Pérez, M.A., 2002. *Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico en Calakmul*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México D.F.

García-Gil, G., 2003. *Colonización humana reciente y formación del paisaje agrario en la Reserva de la Biósfera Calakmul, Campeche, México*. Tesis de doctorado en Geografía, UNAM. México D.F.

Gilabert, M.A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J., 1997. *Acerca de los Índices de Vegetación*. Universidad de Valencia. Valencia, España.

González, I., 2006. *Comparación de diferentes métodos de detección de cambio en imágenes de satélite para el monitoreo de deforestación en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca*. Tesis Licenciatura en Geografía. UNAM. México D.F.

Halffter, G. y Moreno, C., 2005. *Significado biológico de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma*, en *Sobre Diversidad Biológica: El significado de las Diversidades alfa beta y gamma*. CONABIO-Sociedad Entomológica-Aragonesa-Grupo Diversitas-CONACYT. Zaragoza, España.

INE-SEMARNAT, 2000. *Programa de manejo de la Reserva de la Biósfera Calakmul*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México D.F.

Jeffries, M., 2006. *Biodiversity and conservation*. Routledge, Londres, Reino Unido.

Jiménez M., 2006. *La red de caminos en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca y su relación con la perturbación del bosque, 2003*. Tesis licenciatura Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México 2006.

Koleff, P. y Urquiza-Hass, T. (coordinadores), 2011. *Planeación para la conservación de la biodiversidad terrestre en México: retos en un país megadiverso*. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México D.F.

Lira, J., 1995. *Percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. Fondo de Cultura Económica; México DF.

Llorente, B., Morrone, J., 2005. *Regionalización Biogeográfica en Iberoamérica y tópicos afines*. UNAM, México DF.

López-García, J. *Análisis de cambio de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (2006-2007)*. Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). México 2007.

Mather, P., 2004. *Computer processing of remotely-sensed images*. John Wiley and Sons. Ltd, Gran Bretaña.

Miranda, L., 2008. *Análisis espacio-temporal del manglar en el Corredor Turístico Cancún-Tulum, Quintana Roo, utilizando imágenes de satélite*. Tesis Licenciatura Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México DF.

Oyama, K., Castillo, A (coordinadores), 2006. *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México*. Editorial UNAM-Siglo XXI; México D.F.

Primack, R. 2001. *Fundamentos de conservación biológica: perspectivas latinoamericanas*. Fondo de Cultura Económica. México D.F.

Primack, R., 2008. *A primer of conservation biology*. Sinauer Associates; Sunderland, EEUU.

Pronatura y The Nature Conservancy, 2005. *Planeación para la conservación de Calakmul, Balam Kú y Balam Kin*. Impresión Publicitaria. Mérida, Yucatán, México.

Ramírez, C., 2008. *Modelado del cambio de cubierta vegetal en dos zonas cafetaleras del estado de Chiapas*. Tesis Licenciatura Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México D.F.

Reyna-Hurtado, R., O´Farril G., Sima, D., Andrade, M., Padilla, A. y Sosa L., 2010. *Las aguadas de Calakmul: reservorios de vida silvestre y de la riqueza natural de México* en Biodiversitas 93. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad. México D.F.

Rodríguez-Galiano V.F., García-Soldado, M.J., Chica-Olmo, M., Pardo-Igúzquiza, E., Rigol-Sánchez, J.P. y Chica-Rivas, M., 2010. *Análisis de cambios de uso del suelo en la "Vega de Granada": correcciones radiométricas y evaluación del cambio*. *Revista de Teledetección, revista de la Asociación Española de Teledetección* 34.

Sarukhán, J. y Dirzo, R. (compiladores), 1992. *México ante los retos de la biodiversidad*. CONABIO. México D.F.

Saxena, H.M., 1999. *Environmental geography*. Rawat Publications, Jaipur, India.

Seco, R. 2002. *Teledetección aeroespacial*. Varela. La Habana, Cuba.

SECOL Campeche, 2009. *Programa de manejo de la ZSCE Balam Kin*. Secretaría de Ecología del Estado de Campeche. Campeche, México.

SECOL Campeche, 2009. *Programa de manejo de la ZSCE Balam Kú*. Secretaría de Ecología del Estado de Campeche. Campeche, México.

Séiler A. (2001). *Ecological effects of roads*. A review. UPSALA. No. 9

Simonian, L. *La defensa de la tierra del jaguar: historia de la conservación en México*. INE; México, 1996.

Spellerberg, I., 2002. *Ecological Effects of Roads*. Science Publishers. Enfield, Inglaterra.

Toledo, V.M., 1988. *La diversidad biológica de México: criterios para proteger un patrimonio*, en *Ciencia y Desarrollo* 81. México D.F.

Toledo, V.M. (coordinador), 2009. *La biodiversidad de México*. Fondo de Cultura Económica. México D.F.

Turner, B. *Deforestation in the Southern Yucatan Peninsular Region: An integrative Approach*; Forest Ecology and management. EEUU.

Páginas de internet

Landsat. *The Landsat Program*. NASA 2012. (Fecha de consulta: mayo de 2012). Disponible en <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Gobierno del municipio de Calakmul, 2012. (Fecha de consulta: agosto de 2012). Disponible en <http://www.calakmul.gob.mx/>

Satelmac. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio, 2012. (Fecha de consulta: agosto de 2012). Disponible en: www.satelmac.com

SPOT. CNES Programmes. Centre National d'Études Spatiales, 2012. (Fecha de consulta: septiembre de 2012). Disponible en: <http://www.cnes.fr/web/CNES-en/7114-home-cnes.php>

La Cultura Maya, 2012. (Fecha de consulta: octubre de 2012) Disponible en: <http://culturamaya.unblog.fr/>