

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
FACULTAD DE INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



**ANÁLISIS DE DEFORESTACIÓN EN EL ESTADO DE SINALOA,
MÉXICO. APORTACIONES METODOLÓGICAS MEDIANTE EL
PROCESAMIENTO HÍBRIDO DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y
CONSULTA A EXPERTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN, EVALUACIÓN
Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA *HOT SPOT* MÁS CRÍTICA DEL AÑO
1990 AL 2014**

TESIS
**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:
SERGIO ALBERTO MONJARDIN ARMENTA

DIRECTORES DE TESIS:
DR. WENSESLAO PLATA ROCHA
DR. CARLOS EDUARDO PACHECO ANGULO

Culiacán, Sinaloa, Febrero 2015

Dedicatoria

A mi familia

Les doy las gracias a mis padres Guadalupe Armenta y Sergio Monjardin, a mis hermanas Georgina y Karely, por todo el apoyo incondicional que me han brindado, por estar conmigo siempre.

A mi pareja

Carla Karely Villalobos Saucedo, por todo el apoyo, amor, cariño y comprensión, por darme ánimo de seguir adelante en todos los aspectos.

A mis amigos del Posgrado

A todos los amigos y compañeros del posgrado, Sergio Aréchiga, Vilma Sánchez, Efraín Solares, Yunibía López, Omar Gutiérrez, Jesús Duarte, Rosendo Romero, Gabriela Barraza, Carlos Beltrán, Miguel López y los demás compañeros de la maestría.

A los venezolanos

A la señora Ángela, a Carlos, Ana Isabel, a la señora Sonia, a Miguel, a Lalo y a Johnny, su esposa e hijos, por haberme adoptado como parte de su familia, les agradezco de corazón. Sin olvidar a los de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, en especial a Kike Gámez y todos los compañeros del cubículo.

Agradecimientos

Esta Tesis, es producto del esfuerzo de diversas personas e instituciones que de manera directa e indirecta han participado:

- Un agradecimiento especial a mis directores de tesis, el Doctor Wenseslao Plata Rocha y al Doctor Carlos Eduardo Pacheco Angulo, por su apoyo, opiniones, críticas, sugerencias, correcciones, debates, entre muchos aspectos más que se involucraron en este trabajo.
- Al posgrado de Ciencias de la Información de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por brindarme la oportunidad de superarme, así como también a los maestros de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio y de la Facultad de Informática, que nos impartieron clases y nos asesoraron en las diversas temáticas.
- A la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de los Andes, Venezuela.
- A la Dirección General de Vinculación y Relaciones Internacionales de la Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo en modalidad de beca con el número CVU/Becario: 390093 / 273187.

Índice General

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
Índice general.....	4
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.- Introducción.....	9
1.3.- Preguntas de investigación.....	12
1.3.- Objetivos.....	13
1.4.- Estructura de la tesis	14
CAPÍTULO II ANTEDECENTES.....	17
2.1.- Deforestación.....	17
2.2.- Estudios de deforestación a nivel global y regional.....	21
2.3.- Situación y estudios de deforestación en México.....	27
2.4.- Metodologías empleadas en el monitoreo de la deforestación.....	29
2.5.- Técnicas de análisis espectral y clasificación más utilizadas en estudios de deforestación que se apegan a los lineamientos de REDD+.....	35
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	38
3.1.- Tipos de muestreo.....	38
3.2.- Análisis Lineal de Mezclas Espectrales.....	39
3.3.- Interpretación y Clasificación visual.....	43
3.4.- Validación de resultados.....	49
CAPÍTULO IV. MATERIALES Y DATOS.....	53
4.1.- Ubicación geográfica.....	53
4.2.- Mapas de uso de suelo y vegetación.....	55
4.3.- Imágenes de sensores óptico-electrónicos.....	58
4.4.- Programas.....	61
4.5.- Criterios cartográficos.....	63

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA	64
5.1.- Identificación y delimitación de las áreas <i>hot spot</i> de deforestación en el Estado de Sinaloa.....	65
5.2.- Caracterización de las áreas <i>hot spot</i> de deforestación en el Estado de Sinaloa mediante consulta a expertos	66
5.3.- Elaboración de la cartografía de cobertura boscosa del año 0 (1990), año 1 (2014) y la cartografía de deforestación 1990-2014 a través de las imágenes satelitales en el área <i>hot spot</i> identificada como más crítica.....	67
5.4.- Validación de la cartografía mediante métodos estadísticos.....	68
CAPÍTULO VI. RESULTADOS	70
6.1.- Identificación y delimitación de las áreas <i>hot spot</i> de deforestación en el Estado de Sinaloa.....	70
6.2.- Caracterización de las áreas <i>hot spot</i> de deforestación en el Estado de Sinaloa mediante consulta a expertos	76
6.2.1.-Causas principales.....	76
6.2.2.-Causas secundarias.....	79
6.2.3.-Interrelación entre las causas principales y secundarias de la deforestación.....	82
6.3.- Elaboración de la cartografía de cobertura boscosa del año 0 (1990), año 1 (2014) y la cartografía de deforestación 1990-2014 a través de las imágenes satelitales en el área <i>hot spot</i> identificada como más crítica.....	85
6.4.- Validación de la cartografía mediante métodos estadísticos.....	92
CAPÍTULO VII DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	95
ANEXOS	102
8.1.- Encuesta. Proyecto “Análisis de la deforestación en el Estado de Sinaloa mediante Sistema de Información Geográfica y Percepción Remota, periodos 1990-2014”.....	102
Revisión bibliográfica	111

Índice de figuras

Figura 2.1. Causas principales y subyacentes de la deforestación.....	20
Figura 2.2. Esquema metodológico del FSI.....	31
Figura 2.3. Esquema general de la metodología de CLASlite.....	32
Figura 2.4. Esquema de árbol de decisión, empleado por la metodología de la Universidad de Maryland.....	34
Figura 4.1. Localización geográfica del área de estudio.....	54
Figura 4.2. Mapa de Usos de Suelo y Vegetación de 1993.....	56
Figura 4.3. Mapa de Usos de Suelo y Vegetación de 2011.....	57
Figura 4.4. Mapa de los Path/Row.....	60
Figura 4.5. Arquitectura del sistema TerraAmazon.....	61
Figura 4.6. Interface principal del sistema TerraAmazon.....	62
Figura 5.1. Esquema metodológico.....	65
Figura 6.1. Cartografía de Bosques y selvas de los años 1993(a) y 2011(b).....	71
Figura 6.2. Cartografía de pérdida de cobertura de bosques y selvas 1993-2011...	72
Figura 6.3. Áreas <i>hot spot</i> de deforestación.....	75
Figura 6.4. Frecuencias porcentuales de las causas principales de deforestación en el Estado de Sinaloa.....	77
Figura 6.5. Expansión agrícola.....	77
Figura 6.6. Extensión de infraestructura.....	78
Figura 6.7. Extracción de madera.....	78
Figura 6.8. Explotación minera.....	79
Figura 6.9. Desencadenamiento de eventos sociales.....	79
Figura 6.10. Frecuencias porcentuales de las causas secundarias de deforestación en el Estado de Sinaloa.....	80
Figura 6.11. Factores demográficos.....	80
Figura 6.12. Factores económicos.....	81
Figura 6.13. Factores políticos e institucionales.....	81
Figura 6.14. Factores culturales.....	82
Figura 6.15. Factores tecnológicos.....	82

Figura 6.16. Interrelación entre las causas principales y secundarias de deforestación.....	84
Figura 6.17. Composición falso color RGB 453.....	85
Figura 6.18. Imagen fragmento suelo.....	86
Figura 6.19. Imagen fragmento sombra.....	86
Figura 6.20. Imagen fragmento vegetación.....	87
Figura 6.21. Segmentación de la imagen fragmento suelo.....	87
Figura 6.22. Interpretación y clasificación visual.....	88
Figura 6.23. Mapa de cobertura boscosa del año 0 (1990).....	89
Figura 6.24. Mapa de deforestación 1990-2014.....	90
Figura 6.25. Mapa de cobertura boscosa del año 1 (2014).....	91
Figura 7.1. Imagen Landsat del año 1993 (A), cartografía oficial de bosques y selvas del año 1993 (B), imagen Landsat del año 1990 (C), cartografía de bosques y selvas del año 1990 y producto de este trabajo de investigación (D).....	96
Figura 7.2. Imagen Landsat del año 2011 (E), cartografía oficial de bosques y selvas del año 2011 (F), imagen Landsat del año 2014 (G), cartografía de bosques y selvas del año 2014 y producto de este trabajo de investigación (H).....	97
Figura 7.2. Deforestación producto del cruce de la cartografía oficial 1993-2011 (I), deforestación producto del presente trabajo 1990-2014 (J), sobre-posición de la deforestación de I y J (K).....	98
Figura 8.1. Mapa de Sinaloa.....	109

Índice de tablas

Tabla 2.1. Reseña de trabajos de deforestación.....	25
Tabla 2.2. Reseña de técnicas digitales en trabajos de deforestación.....	36
Tabla 4.1. Criterios cartográficos utilizados en la evaluación de la deforestación..	63
Tabla 6.1. Pérdida de cobertura boscosa 1993-2011.....	76
Tabla 6.2. Matriz de confusión del mapa de cobertura boscosa del año 0(1990)....	92
Tabla 6.3. Matriz de confusión del mapa de deforestación 1990-2014.....	92
Tabla 6.4. Matriz de confusión del mapa de cobertura boscosa del año 1(2014)....	92
Tabla 6.5. Errores de Comisión y Omisión del mapa de cobertura boscosa del año 0 (1990).....	93
Tabla 6.6. Errores de Comisión y Omisión del mapa de deforestación 1990-2014	93
Tabla 6.7. Errores de Comisión y Omisión del mapa de cobertura boscosa del año 1 (2014).....	93
Tabla 7.1. Comparación de la deforestación sobre el área <i>hot spot 2</i>	100

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción

Se ha calculado que gran parte del cambio climático se debe a los Gases Efecto Invernadero (GEI), derivado aproximadamente en un 70% por la quema de combustibles fósiles, los cambios de usos de suelo y la deforestación (IPCC, 2007). Y donde dicha deforestación es producto de la conversión directa inducida por el hombre de tierras forestales a no forestales (UNFCCC, 2013), la cual aporta aproximadamente entre un 10 y 20% de la emisión de GEI en el mundo, en particular el CO₂ (IPCC, 2007; Houghton, 2012; Kanninen *et al.*, 2010; Denman *et al.*, 2007).

La última evaluación de los procesos de pérdida forestal realizada por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) a nivel mundial, señala que aproximadamente 13 millones de ha (principalmente de bosques tropicales) se perdieron durante el periodo 2000-2010 (FAO, 2010). Este proceso es inducido especialmente por la agricultura (Rudel *et al.*, 2009) y el crecimiento de la población urbana (De Fries *et al.*, 2010), generada de manera local o regional. Estas causas afectan negativamente al funcionamiento global del medio ambiente, produciendo un conjunto de cambios que interfieren en el clima, el ciclo de carbono, la pérdida de biodiversidad, la sostenibilidad de la agricultura o el sumidero de agua potable (Lepers *et al.*, 2005; Lambin y Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010).

Esta deforestación viene acompañada, inicialmente por procesos de degradación forestal, que a pesar de no introducir tanta pérdida de reserva de carbono por unidad de superficie como la deforestación, provoca una reducción importante de carbono (Achard *et al.*, 2010; Asner *et al.*, 2010). La degradación puede ser originada por las actividades de la explotación forestal, incendios forestales, la sobreexplotación de leña u otros usos locales de la madera (GOFC-GOLD, 2010).

En tal sentido la deforestación y la degradación de los bosques son tomados en cuenta por la comunidad científica internacional del cambio climático, como un factor de gran importancia en el ciclo global del carbono (Achard *et al.*, 2010). Ambos procesos han sido abordados dentro del marco de la UNFCCC (United Nations Frameworks Convention on Climate Change). Desde el 2005, en la COP-11 (11ª Conference of Parties), celebrada en Montreal, fue donde se puso en marcha un mecanismo para investigar los elementos técnicos capaces de reducir estas emisiones, originando el programa REDD+ (Reducing Emission from Deforestation and Degradation) para los países en vías de desarrollo.

En conjunto a este esfuerzo internacional, la comunidad científica debe proporcionar elementos importantes para conocer los factores causales y el comportamiento de los procesos de pérdida forestal a diversas escalas. A razón de esto, existen métodos basados en los estudios de casos a nivel local, que explican el modelo causal de la deforestación. Estos casos identifican las causas de las pérdidas de la cobertura forestal, a través de análisis estadísticos, como el exploratorio de datos, regresión, estadística bayesiana y redes neuronales o mediante el análisis de literatura (Pacheco *et al.*, 2011).

De igual manera también se debe proveer métodos que permitan estimar de manera precisa los porcentajes de deforestación y así disminuir la incertidumbre en la estimación de las emisiones de CO₂, ya que estos tienen gran incertidumbre, pues es difícil cuantificar en el cálculo global del carbono, la contribución correspondiente al uso de la tierra (Solomon *et al.*, 2007). Para aumentar las precisiones, las estimaciones tienen que apoyarse en datos e información a escala global (Ramankutty *et al.*, 2006). Como es el caso de los datos procedentes de las imágenes de satélite, que aunados con medidas de campo disminuyen la incertidumbre para determinar de la pérdida de cobertura forestal.

Por otro lado, las altas tasas de deforestación reportadas para México en la última década, lo ubican según la FAO en la posición 17 (FAO, 2010) y Hansen *et al.* (2013) en la posición 15 a nivel mundial, con pérdidas de bosques de -195,000 ha/año y -198.850 ha/año, respectivamente.

En tal sentido, diversos trabajos realizados específicamente en diversas zonas del país Mexicano, que han evaluado y cuantificado el impacto que tienen los procesos de alteración y deforestación en las comunidades forestales (Castillo *et al.*, 1998; Reyes Díaz *et al.*, 2001;

Mendoza *et al.*, 2002; Guerra y Ochoa, 2006; Velázquez *et al.*, 2002; INE, 2007; SEMARNAT, 2006; Céspedes *et al.*, 2010; Masera, 1996; Pineda N., 2010), el 38% de la deforestación total del país está concentrada en las regiones noreste (Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas) y noroeste (Durango, Sinaloa, Chihuahua, Sonora, Baja California Sur y Baja California). La zona sureste (Tabasco, Campeche, Quintana Roo y Yucatán) presenta especial preocupación, pues por sí sola representa el 37% del total de la pérdida del recurso forestal del país. Mientras que las zonas de occidente (Nayarit, Jalisco, Colima y Michoacán) y centro (Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí, Zacatecas, Morelos, México y el Distrito Federal) solo representan 25% del total.

Asimismo, con base en información del Instituto Nacional de Ecología (INE) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Sinaloa cuenta con una superficie forestal de 3.7 millones de hectáreas, de las cuales, 744,000 mil corresponden a bosques de clima templado (pino y encino), 1.9 millones a selvas altas, medianas y bajas, 212,000 mil a vegetación de zonas áridas compuestas de matorrales y especies arbustivas y 152,000 mil a vegetación hidrófila y halófila (INE, 2013, INEGI, 2013). De igual manera, según los mapas de uso de suelo y vegetación del INE, el Estado de Sinaloa para el año 1976, estuvo ocupado por 55.97 % de cobertura de bosques y selvas, esta cobertura para el año 2006 disminuyó a 49.54%, es decir, se perdieron 368,056.25 hectáreas (Corrales G., 2013).

Por dichas razones, en este escenario, surge la necesidad de estudiar y evaluar la deforestación en el Estado de Sinaloa, ya que es uno de los factores más importantes que impulsan el cambio climático y esto a su vez produce diversos efectos naturales, afectando las principales actividades económicas del Estado como: la agricultura, la ganadería, la pesca; las cuales representan a nivel global, nacional y local la subsistencia de la población y el desarrollo social y económico. A la par este estudio podrá ser útil para plantearse a futuro una estrategia REDD+ que ayude a mitigar el impacto de tal daño ambiental.

En síntesis, en este trabajo de investigación se analizó la deforestación en Sinaloa los últimos 24 años. Donde, primeramente se identificaron las áreas de cambio rápido de cobertura forestal llamadas áreas *hot spot* de deforestación mediante el cruce de mapas de los años 1993 y 2011 a escala 1:250,000 en un Sistema de Información Geográfica. Posteriormente, utilizando imágenes Landsat de 1990 y 2014 se monitoreo el área *hot spot* más crítica,

aplicando un análisis lineal de mezclas espectrales y la segmentación de la imagen suelo producto. Consecutivamente, para generar el mapa de cobertura boscosa del año 0 (1990), se asignó visualmente cada objeto segmentado a las categorías correspondientes, posteriormente se interpretó la pérdida y la ganancia forestal generando el mapa de deforestación 1990-2014 y derivado de este mapa se obtuvo el mapa de cobertura boscosa del año 1 (2014). Después, con la ayuda de expertos en la temática forestal se validaron dichos productos cartográficos y se caracterizaron los procesos de deforestación mediante una encuesta sobre las causas principales y secundarias de la deforestación. Los resultados indican que en Sinaloa la zona centro-norte (área *hot spot 2*) fue la que reportó más pérdida forestal. Con respecto a la fiabilidad de la cartografía generada del área más crítica, se obtuvo una precisión global entre 85% y 89% y un índice kappa que oscila entre 0.71 y 0.79 para los productos. Finalmente, se determinó que en los municipios de Culiacán, Badiraguato, Mocorito y Salvador Alvarado, la deforestación media anual fue de 4,741.90 ha/año, con una tasa media de 0.60%, la cual es superior a la tasa media del país (-0.37%). Siendo la expansión de la agricultura y la extensión de infraestructura las causas principales de los procesos de deforestación impulsadas a su vez por los factores demográficos.

1.2.- Preguntas de investigación

En México se cuenta con una cartografía de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, elaborada por el INEGI y otras dependencias e instituciones en diferentes periodos de tiempo. Dicha cartografía está diseñada para tener una cobertura a nivel Nacional de los diferentes usos de suelo y vegetación que posibilite tener un inventario de los recursos naturales y emprender diferentes proyectos a nivel de aplicación y de investigación. No obstante, no cuenta con las precisiones requeridas para realizar trabajos o estudios de carácter regional como el que planteamos en esta tesis de investigación. Por ello es necesario realizar estudios de mayor detalle mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat, técnicas y algoritmos de clasificación adecuados para identificar, evaluar y caracterizar la deforestación en nuestra área de estudio. Ante esto nos planteamos las siguientes preguntas de investigación.

1. ¿Será posible determinar las áreas *hot spot* de deforestación utilizando la cartografía oficial a escala 1:250,000?
2. ¿La cartografía oficial a escala 1:250,000 sobreestima o subestima la deforestación?
3. ¿Un procesamiento híbrido sobre imágenes Landsat permitirá obtener una cartografía con mayor certidumbre que la cartografía oficial?
4. ¿Será posible determinar los causales de los procesos de deforestación mediante la consulta a expertos?

1.3.- Objetivos

General

- Estimar la deforestación del área *hot spot* con mayor pérdida forestal en el Estado de Sinaloa, mediante Sistema de información Geográfica, Percepción Remota y consulta a expertos, en el periodo 1990-2014.

Particulares

- Realizar un análisis del estado del arte sobre los trabajos de deforestación a nivel global, continental, nacional y regional.
- Analizar las técnicas de procesamiento digital de imágenes utilizadas en trabajos de deforestación y determinar cuál es la mejor y la que más se adapta a los ambientes del Estado de Sinaloa.
- Identificar y delinear las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado de Sinaloa.
- Caracterizar las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado de Sinaloa mediante la consulta a expertos.
- Elaborar los mapas del año 0 (1990), año 1 (2014) y el mapa de deforestación 1990-2014, a través de imágenes satelitales en el área *hot spot* identificada como más crítica, para estimar la deforestación en el periodo 1990-2014.
- Validar a través de métodos estadísticos, los mapas del año 0 (1990), año 1 (2014) y del mapa de deforestación 1990-2014.

1.4.- Estructura de la tesis

La organización de esta tesis de maestría se presenta en siete capítulos, los cuales desarrollan de manera estructurada y continua el objetivo general de esta investigación.

El Capítulo I explica el planteamiento del problema, enfocándose de lo general a lo particular, empezando por la problemática del cambio climático y sus consecuencias previsibles, lo que implican los gases efecto invernadero en este problema y particularizando en cómo la deforestación acelera este cambio en el clima, asimismo se puntualiza lo que se ha estado haciendo a nivel mundial, nacional y local, para contrarrestar este problema de la deforestación, como es el caso de las estrategias REDD+. En este mismo capítulo está inmersa la justificación, las preguntas de investigación, el objetivo general y los objetivos particulares de esta investigación.

En el Capítulo II se exponen los antecedentes, en los cuales primeramente se profundiza sobre la deforestación, los problemas que produce y la gran importancia que implica monitorearla con las precisiones pertinentes, posteriormente se describen estudios de deforestación que se han realizado a nivel global, continental, regional y nacional. Al respecto también se hace una descripción de las metodologías más importantes que se utilizan para el monitoreo de la deforestación, a saber Prodes Digital, FSI, FRA RSS TRESS, CLASlite, y la de la Universidad de Maryland. De manera consecutiva se exponen las técnicas de análisis espectral y clasificación digital que utilizan estas metodologías, y por último, se presentan los trabajos de deforestación que se han realizado en México a nivel nacional, regional y local. En síntesis, en este capítulo se realizó una revisión bibliográfica de los trabajos de deforestación a diferentes escalas, un análisis de las metodologías y técnicas digitales que se utilizan para el monitoreo de la pérdida forestal y se definió cuáles son las mejores y cuál de ellas se adapta mejor a los ambientes del Estado de Sinaloa.

De acuerdo a lo analizado en el capítulo de los antecedentes se planteó el Capítulo III, en el cual se incluyen los diferentes conceptos y teorías que se abordan en este trabajo de tesis. Primeramente, se describen los tipos de muestreo que se utilizan en la Percepción Remota y particularmente los trabajos de deforestación. De igual manera, se describe qué es un Análisis Lineal de Mezclas Espectrales, para qué sirve, dónde se ha utilizado, sus ventajas y desventajas. En el mismo sentido se enmarca la Teoría de la Interpretación y Clasificación

Visual, cuáles son las razones por las que se sigue utilizando esta técnica de clasificación y porqué esta misma no ha sido superada aún por la clasificación digital pura. Consecutivamente, también se cubre la parte de la validación de los resultados de la interpretación de cualquier tipo de imágenes.

Consecutivamente, el Capítulo IV detalla los materiales y datos que se utilizaron para el trabajo experimental, primeramente se define la ubicación del espacio geográfico y se describen las diferentes coberturas forestales del Estado de Sinaloa, basándose para ello en la cartografía oficial de Usos de Suelo y Vegetación del INEGI y del INE, de igual manera se describen los mapas del Uso del Suelo y Vegetación del Estado de Sinaloa; asimismo, se describen los datos procedentes de sensores ópticos-electrónicos, cómo fueron obtenidas estas imágenes, con que niveles de corrección radiométrica y geométrica, así como los criterios que se tomaron en cuenta para elegir las imágenes. Se mencionan las herramientas de SIG y Percepción Remota que se utilizaron para procesar estos datos y por último se definen los criterios cartográficos que se tomaron en cuenta para el procesamiento de los datos.

En el Capítulo V, correspondiente a la Metodología, se narra de manera meticulosa cómo se realizó el trabajo experimental. Primeramente, se describe cómo se identificaron y delinearon las áreas *hot spot* en Sinaloa, basándose en un cruce de mapas de Usos de Suelo y Vegetación a escala 1:250,000. Posteriormente, se caracterizaron los procesos de pérdida forestal mediante la elaboración y aplicación de una encuesta sobre la deforestación en Sinaloa a expertos en el área forestal del Estado de Sinaloa. Consecutivamente, se describe cómo se realizó la cartografía de cobertura boscosa del año 0 (1990), año 1 (2014) y la cartografía de deforestación 1990-2014 mediante el procesamiento digital de imágenes. Por último, se exponen los métodos estadísticos que se emplearon para la validación de los resultados de la cartografía.

Una vez explicado el proceso de experimentación, se procede a mostrar los resultados, así, en el Capítulo VI, se plantea, conforme al desglose hecho en la metodología, cómo fue que en la primera parte se identificaron y delinearon cuatro áreas *hot spot* de deforestación y sus tasas medias anuales de deforestación que fueron de **0.44%**, **0.80%**, **0.41%** y **0.52%** correspondientemente a las áreas 1, 2, 3 y 4. Después se describen y se plasman de manera

porcentual las causas principales y secundarias de los procesos de deforestación, donde se determinó que las causas con mayor impacto en la deforestación son la expansión agrícola y la extensión de infraestructura, estas impulsadas a su vez por los factores demográficos.

De la siguiente etapa de los resultados se obtuvo la cartografía de cobertura boscosa del área *hot spot* 2 del año 0(1990), año 1(2014) así como también la cartografía de deforestación 1990-2014, al respecto se determinó una tasa media anual de deforestación de **0.60%** y una deforestación de **4741.90** ha por año, para esta área *hot spot* 2. De manera consecutiva se presentan los resultados de la validación de la cartografía obtenida mediante métodos estadísticos, de los cuales se puede resumir que las precisiones globales de los mapas están entre el 85.71% y 89.63%, los errores de comisión oscilaron entre el **10%** y **15.46%** y los de omisión entre 9.91% y 14.85%, los estadísticos Kappa estuvieron entre el rango de **0.71** a **0.79**.

Como derivación de todos los capítulos anteriores, se presenta el Capítulo VII, que incluye la discusión de los conceptos y las conclusiones a las que se llegó. Se discute primeramente la manera de obtener la deforestación utilizando la cartografía oficial a escala 1:250,000, donde ésta sobrestima los datos de deforestación, pero a su vez se corrobora que es muy buena para la identificación de las áreas *hot spot*. Por otro lado, también se concluye que utilizar un Modelo Lineal de Mezclas Espectrales junto con una clasificación de contexto espacial que incluye una segmentación de la imagen fragmento suelo, una interpretación y una clasificación visual, permite identificar de manera precisa los procesos de deforestación.

También se deduce que la adaptación de la metodología que se utilizó para obtener la caracterización de los procesos de deforestación permitió conocer de manera porcentual el comportamiento de las causas que provocan la pérdida de coberturas forestales en el Estado de Sinaloa.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

El presente capítulo expone una introducción sobre la deforestación, los problemas que produce y la gran importancia que implica monitorearla con las precisiones pertinentes, posteriormente se describen estudios de deforestación que se han realizado a nivel global, continental, regional y nacional. Consecutivamente se hace una descripción de las metodologías más importantes que se utilizan para el monitoreo de la deforestación, seguida de un apartado que expone las técnicas de análisis espectral y clasificación digital que utilizan estas metodologías y por último se presentan los trabajos que se han realizado en México a nivel nacional, regional y local.

2.1.- Deforestación

La deforestación es la conversión directa, inducida por el hombre, de tierras forestales a tierras no forestales (UNFCCC, 2001). La última evaluación realizada por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) a nivel mundial, señala que aproximadamente 13 millones de ha (principalmente de bosques tropicales) se perdieron durante el periodo 2000-2010 (FAO, 2010). Este proceso es inducido especialmente por la agricultura (Rudel *et al.*, 2009) y el crecimiento de la población urbana (De Fries *et al.*, 2010), generada desde escala local a regional. Este proceso afecta negativamente al funcionamiento global del medio ambiente, produciendo un conjunto de cambios que modifican el clima, el ciclo de carbono, la pérdida de biodiversidad, la sostenibilidad de la agricultura o el sumidero de agua potable (Lepers *et al.*, 2005; Lambin y Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010).

La deforestación de los bosques contribuye a las emisiones atmosféricas de los gases de efecto invernadero, esencialmente a través del CO₂ (Penman *et al.*, 2003, Denman *et al.*, 2007), debido a la combustión de la biomasa forestal y la descomposición del resto de material vegetal y el carbono del suelo. Actualmente la contribución combinada de la deforestación, la degradación de los bosques y las emisiones de turberas, con respecto al total

de las emisiones antropogénicas de CO₂ es del 15% (en el rango de 8-20%) (Van der Werf *et al.*, 2009).

Estas mediciones poseen un alto grado de incertidumbre (UNFCCC, 2013), no obstante son reconocidas por la comunidad internacional del cambio climático como algo muy significativo (Archad *et al.*, 2010). Esto ha propiciado una serie de debates internacionales oficiales sobre el problema de deforestación, los cuales se iniciaron el año 2005 en Montreal, en la 11^a Conferencia de las Partes (COP-11) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), pero no fue sino hasta la reunión de la COP-16 celebrada en Cancún (2010), donde se formalizó el criterio REDD +, en el cual se cubrieron aspectos sociales y ambientales (Sanhueza, 2011). En tal sentido, la deforestación será uno de los puntos principales que se abordarán en la COP-20, que será celebrada en Lima Perú en Diciembre del 2014 (UNFCCC, 2014).

A raíz de esto se hace fundamental realizar estimaciones precisas de la deforestación de los bosques, con la finalidad de disminuir la incertidumbre y optimizar los recursos que se dispongan para la reducción de las emisiones de CO₂. Dichas estimaciones deben apoyarse en información disponible a nivel global, como son las imágenes de satélites, que integrándolas con datos de campo serán fundamentales en la determinación de la pérdida de la cubierta forestal (Ramankutty *et al.*, 2006). Hoy en día existen dos técnicas de Percepción Remota para evaluar la deforestación, a saber: el análisis mediante el muestreo y el análisis de barrido completo (wall-to-wall) (GOF-C-GOLD, 2013).

El análisis de muestreo se realiza solo en las zonas de interés (áreas boscosas) a evaluar, de manera sistemática y a intervalos regulares o de manera estratificada y concentrada, solo en las áreas donde se ha sufrido una conversión de tierras forestales a tierras no forestales. Mientras que el análisis de barrido completo cubre la superficie total de la zona boscosa a evaluar, es decir toda la vegetación de una región o país (Pacheco *et al.*, 2011).

Por otro lado, para estudiar las causas de la deforestación, existen metodologías que se enfocan en estudios a nivel local, las cuales explican de manera más concreta el modelo causal de la deforestación que los estudios que se enfocan a nivel global (Wibowo y Byron., 1999; Mather y Needle., 2000). Los estudios a nivel local, identifican las causas de las pérdidas en la cobertura vegetal, a través de análisis estadísticos y redes neuronales

artificiales (Lesschen *et al.*, 2005); así como también mediante el análisis de la literatura (Lambin *et al.*, 2003; Lambin y Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010).

El estudio de casos a través de la literatura permite identificar, por un lado, las causas principales que afectan directamente al medio ambiente (Turner *et al.*, 1990; Turner *et al.*, 1993). Asimismo, se identifican los lugares donde una serie de causas han tenido un papel importante en los procesos de pérdida de la cobertura vegetal. Por otro lado se identifican las causas secundarias que impulsan a las causas directas de la deforestación.

Uno de los trabajos más recientes sobre las causas de la deforestación, fue el desarrollado por Pacheco *et al.*, 2011, el cual realiza un estudio retrospectivo de las causas principales y subyacentes de la deforestación en el país de Venezuela. Mediante la recopilación de información, la elaboración y aplicación de una encuesta a personas expertas en la deforestación, determinando porcentualmente cada una de las causas que propician la deforestación.

Partiendo de la revisión bibliográfica, (en particular de los estudios realizados por Geist y Lambin, 2001; Geist y Lambin, 2002; Pacheco *et al.*, 2013), se plantean las causas principales de la deforestación, las cuales son: la expansión agrícola, la extensión de infraestructura, la extracción de la madera, la explotación minera y la presencia de conflictos sociales. Así como también se plantean las causas subyacentes o secundarias que impulsan directamente a las causas principales, y son: los factores demográficos, los factores económicos, los factores tecnológicos, los factores políticos e institucionales y los factores culturales. Estas causas principales y secundarias son subdivididas a su vez para obtener mayor detalle de los datos (figura 2.1), permitiendo realizar un análisis individual de cada una de las causas principales y secundarias, para determinar de acuerdo a su porcentaje, la influencia en los procesos de deforestación.

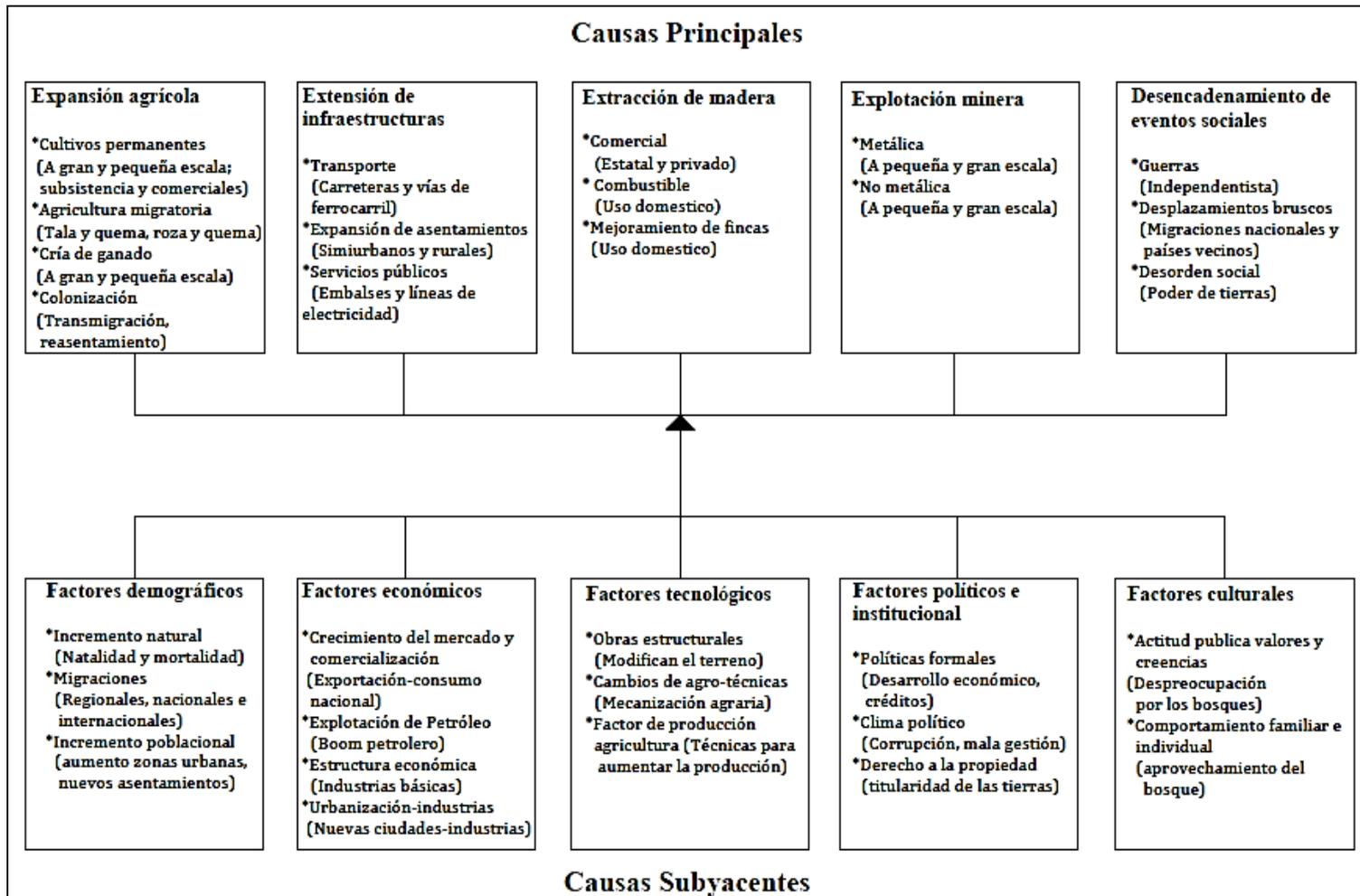


Figura 2.1. Causas principales y causas subyacentes de la deforestación. Fuente: (Geist y Lambin, 2002, Pacheco *et al.*, 2011).

2.2.- Estudios de deforestación a nivel global y regional

A través del tiempo, las tecnologías han estado evolucionando a pasos agigantados y en las últimas décadas la disponibilidad de datos geospaciales procedentes de sensores remotos permite disponer de gran cantidad de información sobre la cubierta del bosque a escalas globales, regionales y nacionales (Achard *et al.*, 2006).

A nivel global y continental se han desarrollado diversos trabajos que tienen que ver con la cartografía de uso de suelo de la superficie terrestre. En este sentido, a principios del año 2000 se generaron mapas de coberturas de suelo a una resolución de 1 km x 1km (Global Land Cover), producidos por los sensores VEGETATION a bordo de los satélites SPOT y por el Espectroradiómetro de Moderada Resolución (MODIS) a bordo de las plataformas Terra y Aqua. Dichos productos han sido de gran utilidad para estudiar la dinámica de la superficie terrestre y en particular se han utilizado para estudiar la pérdida de cobertura forestal a nivel global (Tsendbazar *et al.*, 2014; Seebach *et al.*, 2014; Bartholomé y Belward 2005; Friedl, McIver, y Hodges, 2002). Asimismo, es importante mencionar al Proyecto CORINE Land Cover, bajo el cual se realizó la cartografía de uso de suelo y vegetación para los países miembros de la Unión Europea, y el cual ha sido utilizado para diversos estudios territoriales, dentro de los que destaca la pérdida de superficie forestal, ya que es un producto de carácter espacio temporal (Ferance J. *et al.*, 2010; Büttner *et al.*, 2006; Büttner *et al.*, 2004).

También se puede mencionar el trabajo Rapid Land-Cover Change, el cual se basa en la compilación de datos existentes procedentes de sensores remotos, censos y consulta a expertos, para la realización de un mapa global de los cambios rápidos de cobertura vegetal, identificándose y evaluándose las áreas *hot spot* del cinturón tropical, donde se determinó que a nivel global el Amazonas es donde existen más áreas *hot spot* y que en Asia se encuentra la mayor concentración de áreas de cambios de cobertura (Lepers, 2005).

Asimismo, en el año 2000 se culminó el mapa global IGBP DIScover, donde se utilizaron imágenes de 1 km de resolución espacial del sensor AVHRR, detectando los cambios de usos de suelo a nivel global, mediante una clasificación supervisada de NDVI de los años 1992 y 1993 para determinar la composición de las coberturas y una pos-clasificación para eliminar

la confusión de los tipos de cobertura y en la cual se identificó pérdida de cobertura forestal (Loveland *et al.*, 2000).

Por otro lado, se puede mencionar las estimaciones de deforestación realizadas por la FAO (FAO, 1993, 2001, 2006, 2010) a nivel global, dichas estimaciones son utilizadas como patrón de referencia para otros estudios. Recientemente la FAO realizó el Estudio de Sensores Remotos (RSS), esto dentro del programa Evaluación de los Recursos Forestales de 2010 (FRA 2010) a partir de 2007 para todo el planeta (Duvieller *et al.*, 2008; Eva *et al.*, 2010), este estudio lo realizó en alianza con el JRC de la Comisión Europea (Joint Research Center), a través del proyecto TREES 3 (Tropical Ecosystem Environment observation by Satellites 3). El mismo consta de un muestreo sistemático de aproximadamente 4,000 unidades de 20 Km x 20 Km, en las cuales se evalúa un cuadro de 10 km x 10 km con imágenes Landsat (30m x 30m) de resolución espacial para las últimas dos décadas 1990-2010. El resultado de esta evaluación arrojó que se perdieron aproximadamente 8 millones de ha por año en el periodo (1990-2000) y en el periodo (2000-2010) 7.6 millones de ha por año, dando como resultado una tasa media anual de deforestación de -0.49% (FAO, 2014; Archard *et al.* 2014).

Por otra parte un estudio con carácter novedoso y actualizado es el realizado por Hansen *et al.*, (2013), en el cual se estimó la deforestación a escala global y dinámica de los bosques durante los años 2000-2012, utilizando imágenes Landsat de 30m x 30m de resolución espacial. De acuerdo al el estudio se perdieron 2.3 millones de km² y hubo una ganancia de 0.8 millones de km² de bosques.

A nivel nacional y regional se pueden destacar los trabajos realizados por el Instituto Nacional de Pesquisas Aeroespaciales (INPE) de Brasil, que monitorean el Amazonas Brasileño desde el año de 1988 de manera anual dentro del proyecto PRODES (Proyecto de Monitoreo de la Deforestación en la Amazonia por satélite). Teniendo como objetivo primordial identificar y evaluar la pérdida de cobertura forestal para tomar las medidas pertinentes y disminuir las tasas de deforestación. Estos trabajos se basan en el procesamiento digital de imágenes Landsat y CBERS principalmente. Su última evaluación (2012-2013) revela una tasa anual de pérdida de 5891 km² y en resumen de 1988 al 2013 se han perdido 402,663 km² (INPE, 2014). No obstante, en el año 1978 se estableció en Brasil la

Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), que tiene como objetivo a largo plazo garantizar la protección y el manejo sostenible de los recursos naturales de la Amazonia, mismo que se está llevando a cabo a través del proyecto “Monitoreo de la Deforestación, Aprovechamiento Forestal y Cambios de uso del Suelo en el Bosque Panamazónico”, en los países de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Guyana, para lo cual utilizan la misma metodología que el proyecto PRODES, (OTCA, 2014).

También es importante mencionar el reporte bianual de la evaluación y monitoreo los recursos forestales que realiza el Forest Survey of India (FSI), el cual tiene como finalidad presentar las tasas de deforestación y sus implicaciones ambientales en la India, así como generar la cartografía escala 1:50,000, a partir de imágenes del sensor IRS 1C/1D LISS III con una resolución espacial de 23.5m. Se ha demostrado en los reportes que del año 1987 hasta el año 1999 se presentaron pérdidas de cobertura forestal, mientras que entre 1999 y 2003 se han ido presentando ganancias, teniendo 640,819 km², 637,293 km² y 678,333 km² de cobertura de bosques para los años 1987, 1999 y 2003, respectivamente (FSI, 2014).

Por otro lado, la revisión presentada por Asner *et al.*, (2009) muestra los estudios desarrollados en el Amazonas Peruano, Brasileño, Boliviano y Colombiano, así como en los bosques de Mozambique, Indonesia y Hawai. Algunos resultados de estos estudios fueron la determinación de la tasa de deforestación media anual de Colombia con 336,581 ha/año en el periodo 2000-2007. Igualmente, para Perú se determinaron las tasas anuales de deforestación correspondientes a los periodos 2000-2005, 2005-2009, 2009-2010, 2010-2011 las cuales presentaron 91,000 ha/año, 163,000 ha/año, 109,000 ha/año, 103,000 ha/año, respectivamente. En dichos trabajos se utilizó un sistema para el monitoreo forestal, que permite la identificación automatizada de la pérdida y perturbación de bosques a partir de imágenes de satélite de alta resolución, donde la mayoría de estos estudios utilizaron imágenes Landsat.

También se tiene el trabajo realizado por Bartalev *et al.* (2014); en dicho trabajo se evalúa la cobertura forestal de Rusia mediante una combinación de un estudio wall-to-wall y un muestreo sistemático simple basado en el muestreo de la FAO. El mapa TerraNorte (wall-to-wall), fue hecho con imágenes MODIS de 230 m x 230 m de resolución espacial del año 2010 y el muestreo de referencia forestal fue realizado con imágenes Landsat de 30 m x 30

m de resolución espacial. Se emplearon 32 unidades de muestra de 20 km x 20 km. El resultado que se obtuvo en la regresión lineal fue una correlación del 0.86, presentando una cobertura forestal de 807,664,282 ha para TerraNorte y 822,766,451 ha para Landsat correlacionado.

Asimismo, el estudio de Jay Gao y Yansui Liu (2012), realiza una exploración sobre las causas de los procesos de deforestación e interpreta una relación entre lo observado y las características fisiográficas de una zona en la provincia de Heilongjiang en China, mediante un estudio retrospectivo de fotointerpretación en el periodo de 1896-2000, utilizando imágenes aéreas escaneadas en el periodo de 1896 a 1980 y de 1980 al 2000 imágenes Landsat. A través de este estudio se determinaron las tasas anuales de deforestación para los periodos 1896-1958, 1958-1980 y de 1980-2000, las cuales fueron de 1146 km², 1046 km² y 419 km², respectivamente. Por otra parte Grinand *et al.* (2013), estiman la deforestación a escala regional en Madagascar de los bosques húmedo y seco, mediante el procesamiento digital de imágenes Landsat, en el periodo 2000-2010. En consecuencia se encontraron las tasas de deforestación anuales para los bosques húmedos, estas oscilan entre -0.93% y -2.33%, y para los bosques secos entre -0.46% y -1.17%.

Sobre el mismo asunto, la investigación de Potapov *et al.*, (2012), cuantificó la pérdida de cobertura forestal en la República del Congo, evaluando en el periodo 2000-2010, utilizando 8881 imágenes Landsat para generar una serie de tiempo, e imágenes MODIS para determinar las métricas que fueron necesarias en la normalización de las Landsat. La consecuencia que se obtuvo de este estudio fue que existía una pérdida de cobertura forestal promedio anual de 371,200 ha/año, deduciendo que las estadísticas de la FAO subestimaron la deforestación, ya que estas presentan una pérdida de tan solo 311,000 ha/año.

En Venezuela se determinaron, delinearón y evaluaron las áreas *hot spot* de deforestación, en el periodo 2005-2010, a partir del tratamiento de imágenes MODIS, Landsat y consulta a expertos. Las imágenes MODIS se utilizaron para la identificación y delineación de las áreas *hot spot*, mientras las Landsat se utilizaron para estimar la deforestación. A raíz de esta investigación se encontró que en la parte norte del río Orinoco se concentra la mayoría de las áreas *hot spot* y sus tasas medias anuales de deforestación oscilan entre -0.72% y -2.95% (Pacheco *et al.*, 2014). Así como también en los bosques boreales de Eurasia, se determinaron

las áreas que han tenido un cambio rápido de cobertura forestal (*hot spot*), se evaluó el periodo 2000-2005, con imágenes Spot-4 VEGETACION (1km x 1km) para la identificación de las áreas *hot spot* y para obtener las tasas de deforestación se utilizaron Landsat (30m x 30m) y ASTER (15m x 15m). Las tasas anuales de deforestación más alarmantes fueron en la región del río Lena y en Khabarovsk kray con -6.1% y -2.34%, respectivamente (Achard *et al.*, 2006).

Tabla 2.1. Reseña de trabajos de deforestación

<i>Área de Estudio</i>	<i>Autores</i>	<i>Objetivo/Finalidad</i>	<i>Tipo de estudio</i>	<i>Fuente y/o sensores</i>
Global (Global Land Cover)	Tsendbazar <i>et al.</i> , 2014; Seebach <i>et al.</i> , 2014, entre otros	Estudiar la dinámica de la cobertura terrestre.	Wall-to-wall	Spot VEGETATION
Global (IGBP DISCover)	Loveland <i>et al.</i> , 2000	Estudiar los cambios de uso de suelo a nivel global	Wall-to-wall	AVHRR
Global (Rapid Land Cover Change)	Lepers <i>et al.</i> , 2005	Estudiar los cambios rápidos de cobertura vegetal a nivel global.	Muestreo	Bases de datos generadas de Landsat y MODIS
Global, continental y nacional	FAO, 2010	Estimar las tasas de deforestación a nivel global, continental y nacional	Muestreo	Landsat
Global (cinturón tropical)	Achard <i>et al.</i> , 2014	Estimar las tasas de deforestación a nivel global, del cinturón tropical	Muestreo	
Global (Proyectos TRESS)	FAO, 2014; Achard <i>et al.</i> , 2010; Achard <i>et al.</i> , 2014	Estimar las tasas de deforestación a nivel continental y regional	Muestreo	
Global	Hansen <i>et al.</i> , 2013	Analizar y determinar las pérdidas y ganancias de bosque a nivel global	Wall-to-wall	Landsat y MODIS
Continental (CORINE Land Cover)	Ferance J. <i>et al.</i> , 2010; Büttner <i>et al.</i> , 2006; Büttner <i>et al.</i> , 2004	Estudiar los cambios en los diferentes usos y coberturas de suelo.	Wall-to-wall	Landsat
Nacional y regional (Amazonas de Brasil)	INPE, 2014	Monitorear y obtener las tasas de deforestación a nivel, nacional y estatal	Wall-to-wall	Landsat y CBERS
Regional (Todo el Amazonas)	OTCA, 2014	Monitorear la deforestación en todo el Amazonas	Wall-to-wall	
Nacional (India)	FSI, 2014	Generar un reporte del estado forestal de la India	Wall-to-wall	IRS 1C/1D LISS III
Nacional y regional	Asner <i>et al.</i> , 2009	Determinar de manera semi-automática la pérdida	Wall-to-wall	

(Bolivia, Perú, Colombia, Brasil, Hawái, Mozambique)		y perturbación de los bosques		Landsat principalmente
Regional (Bosques de Eurasia)	Bartelev <i>et al.</i> , 2014	Combinar un estudio wall-to-wall y un estudio de muestreo para determinar la pérdida de cobertura forestal	Muestreo	MODIS y Landsat
Nacional (Venezuela)	Pacheco <i>et al.</i> , 2014	Determinar, delinear y evaluar las áreas <i>hot spot</i> de deforestación	Muestreo	MODIS y Landsat
Regional (Heilongjiang, China)	Jay Gao y Yansui Liu (2012)	Estudiar los procesos de deforestación y relacionar estos con las características fisiográficas de las zonas deforestadas	Wall-to-wall	Landsat
Regional (Bosques boreales de Eurasia)	Achard <i>et al.</i> , 2006	Determinar las áreas <i>hot spot</i> y sus tasas de deforestación	Muestreo	AVHRR y Landsat
Regional (Madagascar)	Grinand <i>et al.</i> , 2013	Estimar la deforestación de los bosques húmedos y secos para el periodo 2000-2010	Muestreo	Landsat
Nacional (República del Congo)	Potapov <i>et al.</i> , 2012	Cuantificar la pérdida de cobertura forestal para el periodo 2000-2010	Wall-to-wall	MODIS y Landsat

En resumen podemos señalar que la mayoría de los estudios realizados a escalas globales y continentales, presentan características similares, tales como: la resolución espacial entre 250m y 500m, la baja temporalidad de 5 a 10 años o más, y la fuente de información a partir de imágenes de los sensores AVHRR, MODIS, Spot y Landsat, principalmente. De igual manera estos estudios presentan información sobre la pérdida de cobertura forestal a un nivel de detalle bajo, lo que los habilita para detectar áreas donde existe deforestación, sin embargo, al momento de evaluar y determinar las tasas de deforestación no los recomiendan los expertos.

Por su parte, trabajos a escala regional o nacional presentan una temporalidad más alta, realizando el monitoreo y evaluaciones de manera anual y bianual. Además la resolución de trabajo es más alta, lo cual permite una mayor precisión y un mejor seguimiento en el monitoreo a los procesos de deforestación.

2.3.- Situación y estudios de deforestación en México

Existe una diversidad importante de trabajos enfocados en el estudio de la dinámica territorial de nuestro país, algunos de los estos hacen referencia a cambios, fragmentación, predicción de usos y cobertura de los suelos, pérdida de bosques y selvas, evaluación de la deforestación y cálculo de sus tasas, agricultura, entre otros (Bonilla-Moheno *et al.*, 2012; Couturier *et al.*, 2012; Velazquez *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2008; Mas *et al.*, 2004; Mendoza *et al.*, 2002; Velázquez *et al.*, 2002a; Bocco *et al.*, 2001; García *et al.*, 2000).

Específicamente los estudios de deforestación para México se han obtenido a partir de datos oficiales del INEGI, INE y del Instituto de Geografía de la UNAM, en tal sentido es importante mencionar el estudio de Mas *et al.*, (2004), que generó una base de datos nacional, utilizando los mapas de INEGI de Uso de Suelo y Vegetación para los periodos 1976-1993-2000, a escala 1:250,000 y analizando los cambios de coberturas, entre ellos estimando las tasas de deforestación para México, que fueron de -0.5% y -1.3% para los periodos 1976-2000 y 1993-2000, respectivamente.

En tal sentido Velázquez *et al.*, (2002) cuantificaron una tasa anual de deforestación de 1.02% y de 2.06%, para bosques templados y bosques tropicales, respectivamente. Determinando una pérdida total de 840.710 ha para el período 1993–2000. De igual manera, en un estudio de dinámica de la vegetación a nivel nacional realizado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), sobre los periodos 1993-2002, se reportó una tasa media anual de deforestación de -0.5% ante el Global Forest Resources Assessment de la FAO (2006).

Por otra parte Velazquez *et al.*, 2008 utilizó las bases de datos de INEGI serie I y las del Inventario Nacional Forestal del 2000, para analizar la conversión de los usos de suelo que implica la deforestación y la fragmentación de los principales usos de suelo. A consecuencia de ello determinó una pérdida de cobertura forestal de 534,000 ha por año.

A escalas regionales, se han hecho diversos estudios, como Ramírez y Zubieta, (2005) que estudiaron el cambio de la cubierta forestal en los santuarios de la mariposa monarca entre los Estados de Michoacán y México, en el periodo 1993-2000, dando como resultado una tasa de deforestación de -0.8%. Igualmente Bocco *et al.*, (2001) analizó los procesos de cambio de cobertura y usos del suelo en todo el Estado de Michoacán en el periodo de 1975-

1993, obteniendo como resultado tasas de deforestación anuales de -1.8% y -1.0% para los bosques templados y selvas, respectivamente.

Por otro lado García *et al.*, (2000) realizó un estudio sobre la delimitación y caracterización de tierras con uso inadecuado para la agricultura en Celaya, Guanajuato, utilizando la base de datos del CETENAL de 1973 e imágenes aéreas de 1993, donde se encontró un incremento de alrededor de 30,000 ha del área agrícola, a través de las pérdidas de cobertura forestal.

También en ambientes locales, Castillo *et al.*, (1998), elaboraron un análisis de cambios de uso del suelo en la Selva El Ocote en el Estado de Chiapas, para estimar áreas vulnerables a la transformación, durante el período 1972-1995, al respecto se determinó una tasa de deforestación anual de -2.7%. Dentro del mismo contexto Franco *et al.*, (2006b) realizaron una investigación de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Los resultados arrojan una tasa de deforestación de 0.48% anual, que representa una pérdida de 156 ha anuales de superficies boscosas entre los años 1972 y 2000.

La selva tropical del sur y sureste de México es una de las cubiertas vegetales más analizadas en los últimos años. Algunas estadísticas que se reportan para esta región son importantes, como la tasa de deforestación del -5.0% encontrada en las selvas de la Reserva de la Biosfera de Calakmul en el Estado de Campeche (Reyes Díaz *et al.*, 2001), la tasa de -4.3% determinada en la zona de Los Tuxtlas en el Estado de Veracruz de acuerdo con Dirzo y García (1991), asimismo Guerra y Ochoa (2006), estimaron una tasa de cambio por pérdida anual de -6.0% y de -34.9% en dos tipos de selvas en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco.

Asimismo un estudio de cambios sobre usos de suelo y deforestación desarrollado por Cortina *et al.*, (1999) en el sur de los Estados de Campeche y Quintana Roo muestra una tasa de deforestación de 2.0%. Mientras que Mendoza y Dirzo (1999), determinaron las tasas de deforestación de 1.7% a 2.1% en la Selva Lacandona en el Estado de Chiapas. Por otro lado en la costa del Estado de Sinaloa se analizó la pérdida de cobertura de manglares, determinando una tasa anual de pérdida de -0.3%, de acuerdo con Alonso *et al.*, (2003).

Al comparar estas evidencias, también se han localizado zonas que han registrado ganancias en la cobertura forestal, principalmente se localizó la regeneración de áreas quemadas en el

Estado de Quintana Roo (Dupuy *et al.*, 2007). Igualmente, en la región de la ciudad de Chetumal, mostrando pérdidas en la cobertura forestal en los años ochenta para uso agrícola, abandonándose en años posteriores, lo que provocó una ganancia de 0.6% anual de selvas en la zona (García *et al.*, 2005).

De esta manera, se revela la utilidad de determinar qué metodología para el monitoreo de las pérdidas de los bosques se adapta mejor a los ambientes del Estado de Sinaloa y el país Mexicano, con la finalidad de ser utilizada posteriormente para evaluar la deforestación en el país, ya que las altas tasas de deforestación reportadas para México en la última década, lo ubican según la FAO en la posición 17 (FAO, 2010) y Hansen *et al.* (2013) en la posición 15 a nivel mundial, con pérdidas de bosques de -195,000 ha/año y -198.850 ha/año, respectivamente. Esto constituye una consecuencia en gran parte del cambio climático. Por su parte, recientemente se realizó un estudio en el Estado de Sinaloa sobre los cambios de uso de suelo, en el cual se utilizaron los mapas de los años 1976, 1993, 2000, y 2007, a escala 1:250 000 del INE e INEGI, del cual se puede resaltar que en el periodo comprendido entre 2000 y 2007 la tasa media anual de deforestación fue de -6,453 ha (Corrales G., 2013), esto representa un -3.3% de la deforestación del país según la cifra de la FAO.

Es por ello que es necesario cuantificar y analizar la deforestación de los bosques y selvas con las precisiones sugeridas por los expertos para evaluar la deforestación (escalas de trabajo de 1:25,000 a 1:50,000), así como también indagar sobre los elementos causales de la deforestación en el Estado de Sinaloa, ya que de acuerdo a la literatura consultada, los procesos de deforestación de los bosques y selvas son unas de las causas que impulsan en gran parte las emisiones de gases invernadero (CO₂), produciendo cambios en los principales elementos constituyentes del clima e induciendo el cambio climático y a su vez causan diferentes efectos naturales, que tienen un impacto en las actividades económicas como: la agricultura, la ganadería y la pesca; las cuales representan a nivel global, nacional y local la subsistencia de la población y el desarrollo social y económico.

2.4.- Metodologías empleadas en el monitoreo de la deforestación

En los últimos años se han venido desarrollando una serie de metodologías para monitorear la deforestación a nivel global y regional, de entre todas las que más destacan son: la metodología del Forest Survey of India (FSI), la de PRODES Digital del Instituto Nacional

de Pesquisas Aeroespaciales (INPE) de Brasil, la del Instituto de Carnegie de la Universidad de Stanford “CLASlite”, la metodología de los proyectos TRESS del RSS de la FAO y el JRC y la metodología de la Universidad de Maryland desarrollada recientemente por M. Hansen.

En 1988 el INPE desarrolló el Programa de Cálculo de Deforestación de la Amazonia, con la finalidad de calcular las tasas de deforestación. Para ello se utilizaron 220 imágenes Landsat impresas en papel fotográfico a escala 1:250,000 y sobre estas se realizó una clasificación o interpretación visual (1988-2002). A partir del año 2003 se adoptó una clasificación digital asistida por computadora utilizando el Sistema de Procesamiento de Información Georreferenciada (SPRING), desarrollado por el INPE (Camara *et al.*, (2013).

Actualmente la metodología de **PRODES Digital** se basa principalmente en cuatro pasos. Primero se aplica un modelo lineal de mezclas espectrales en las bandas RGB-543, del cual se obtienen imágenes fracción suelo, sombra y vegetación. En segundo lugar se aplica una segmentación por crecimiento de regiones a la imagen fragmento suelo utilizando umbrales de similitud y de área mínima, 8 y 16 respectivamente. Posteriormente, se utilizan los vectores segmentados de la imagen y se sobreponen en la imagen (composición falso color), para después realizar una interpretación, clasificación y edición visual de dichos polígonos a las categorías correspondientes para obtener la cartografía base. Finalmente, se procede a realizar la clasificación y edición visual prospectiva de los siguientes años, interpretando solamente las pérdidas y las ganancias de la cobertura boscosa utilizando los vectores de las clases del mapa base o de la época anterior evaluada sobre las imágenes del año a evaluar en composición falso color (Camara *et al.*, 2013).

Hoy en día, la mayoría de los proyectos de deforestación de la Amazonia son procesados en un Sistema de Monitoreo de la Deforestación del Amazonas (TerraAmazon), el cual fue desarrollado recientemente por el INPE y es ampliamente utilizado en el proyecto PRODES Digital para monitorear el Amazonas. En el mismo sentido, la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), el cual incluye a Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Guyana y Suriname, monitorean la deforestación a través del proyecto “Monitoreo de la Deforestación, Aprovechamiento Forestal y Cambios de usos del Suelo en el Bosque Pan-Amazónico”, mismo que utiliza el sistema TerraAmazon (OTCA, 2014).

Por su parte, la metodología del **FSI** se fundamenta en la aplicación de una serie de correcciones que permiten tener imágenes satelitales de buena calidad y apropiadas para estudiar la deforestación. Para esto se lleva a cabo la corrección radiométrica, corrección de contraste y corrección geométrica. Posteriormente, se realiza la fotointerpretación mediante una técnica híbrida, la cual emplea una clasificación no supervisada con un algoritmo ISODATA y una interpretación visual en pantalla. Para eliminar las áreas no vegetales de la imagen, las áreas menores a una hectárea y espacios en blanco dentro de la imagen se utiliza el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Mientras que la eliminación de las sombras o cuerpos de agua son tratadas mediante el empleo de una relación entre bandas. Finalmente la validación de los resultados se realiza mediante un muestreo con imágenes del mismo satélite, pero diferente sensor, con una resolución espacial de 5.8 metros (Figura 2.2) (FSI, 2014).

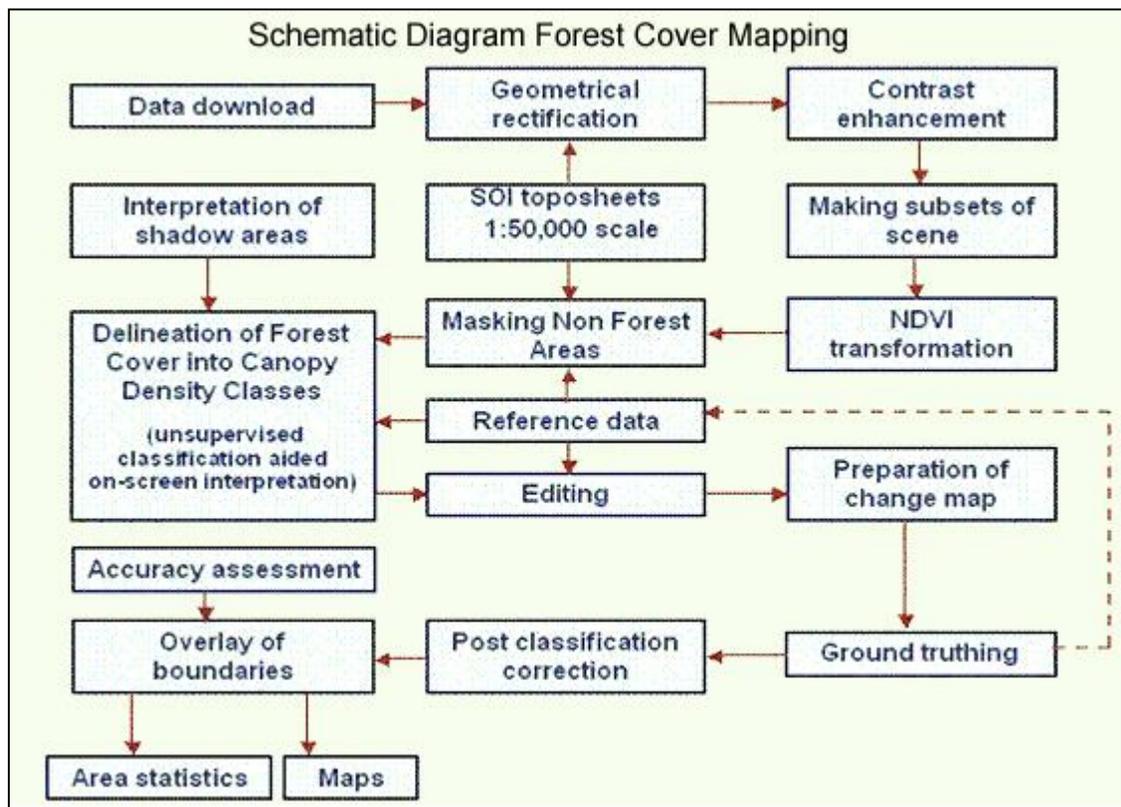


Figura 2.2. Esquema metodológico del FSI. Fuente
 :(http://fsi.nic.in/details.php?pgID=sb_6).

También el Instituto Carnegie de la Universidad de Stanford diseñó la metodología “CLASlite” (Figura 2.3), la cual permite el monitoreo de bosques y la identificación automatizada de la deforestación y degradación, mediante la utilización de imágenes satelitales bajo un sistema que puede ser utilizado por no expertos forestales.

Dicha metodología se presenta en cuatro pasos claves:

- 1.- Calibración de las imágenes crudas a reflectancia superficial aparente, la cual comprende la calibración radiométrica, corrección atmosférica y la utilización de máscaras para los cuerpos de agua, sombras y nubes.
- 2.- Análisis espectral de los datos de reflectancia a cobertura fraccional, descomponiendo los píxeles en superficies fraccionales de suelo desnudo, vegetación viva y vegetación muerta.
- 3.- Clasificación de los datos de cobertura fraccional de vegetación viva en un mapa de cobertura boscosa por medio de un algoritmo de árbol de decisión.
- 4.- Detección de cambios con datos de cobertura fraccional multi-temporal para obtener la cartografía de la deforestación y perturbación del bosque.

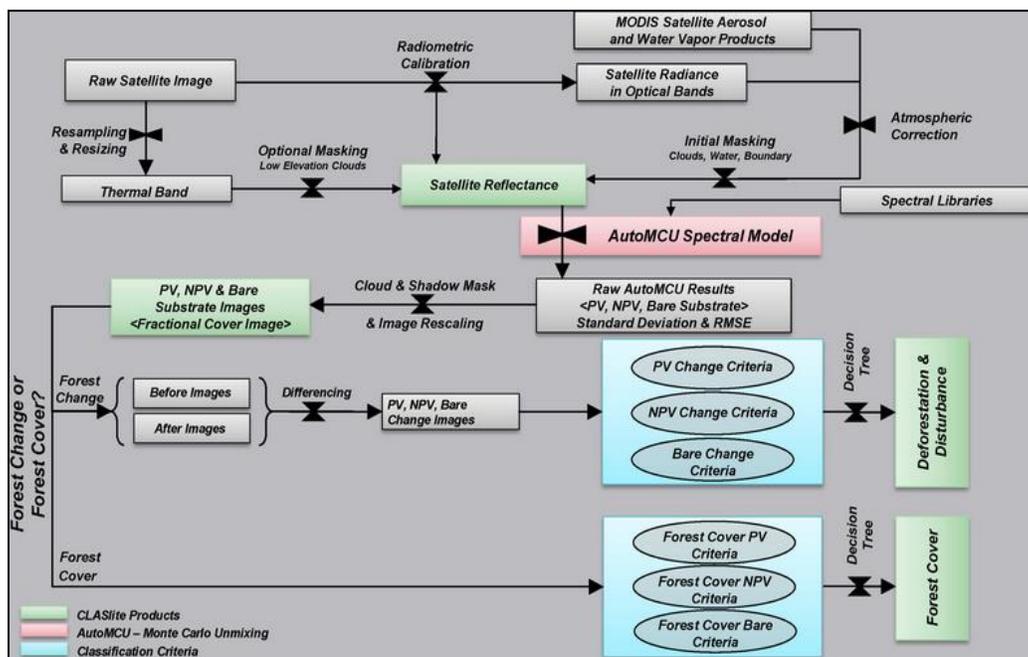


Figura 2.3. Esquema general de la metodología de CLASlite.

Fuente: (<http://claslite.carnegiescience.edu/en/about/science.html>).

Esta metodología provee una alta automatización de cartografía, todo enfocado a determinar los componentes principales de la estructura de los bosques tropicales como la vegetación viva, vegetación muerta, y suelo desnudo. Estas imágenes fracción son importantes para determinar la composición del ecosistema, su estructura y biomasa, así como también son las más sensibles para determinar la deforestación, la degradación de los bosques y bosques reforestados o bosques jóvenes.

La parte medular de esta metodología es el empleo de un Modelo de Análisis de Mezclas Espectrales llamado Automated Monte Carlo Unmixing (AutoMCU), el cual permite un monitoreo muy rápido de la deforestación utilizando la imagen fragmento suelo, dar seguimiento de los errores mediante una ecuación lineal y la cual no requiere de una calibración.

Unas de las desventajas principales de esta metodología es que no distingue entre los diferentes tipos de bosque, así como también se le dificulta identificar los bosques cuando el terreno está cubierto por sombra, por ejemplo en cuevas empinadas con bajos ángulos del sol, y por consecuencia se incluyen ciertos errores importantes al momento de la clasificación.

Del mismo modo, grupos de Investigación en el Joint Research Center (JRC) en conjunto con la FAO desarrollaron una metodología denominada **FRA-RSS TRESS**, la cual se enfoca específicamente en el monitoreo de los recursos de cobertura forestal desde una perspectiva global y en particular en la estimación de los cambios de cobertura arbórea a nivel continental y regional para el cinturón tropical para los períodos 1990-2000-2005. Dicha metodología se enmarca en los proyectos TREES, los cuales estiman la deforestación utilizando una segmentación multi-temporal de las épocas a evaluar, una clasificación digital aplicando el algoritmo del Tasseled Cap y distancias euclidianas en función de la reflectancia de los píxeles. Para ello se utilizaron alrededor de 4,000 muestras de manera sistemática de 20 Km por 20 Km para los Trópicos y unas 2,000 de 10 Km por 10 Km para la zona Europea (FAO, 2014).

Finalmente la **Universidad de Maryland** desarrolló otra metodología para estimar la deforestación a escala global, utilizando imágenes Landsat con resolución espacial de 30 metros (Hansen *et al.*, 2013). Esta permite conocer en qué año ocurrió la pérdida de cobertura

boscosa ya que emplea compuestos anuales de imágenes en un abanico de tiempo de varios años. El pre-procesamiento de las imágenes Landsat consiste en un remuestreo de la imagen, convertir los datos crudos a niveles digitales, corrección atmosférica, enmascaramiento de cuerpos de agua, sombras y nubes y normalización de los datos. Posteriormente se utiliza el NDVI para aplicar un árbol de decisión basado en valores de máximos y mínimos niveles digitales de polígonos de entrenamiento generados por expertos para determinar las categorías de interés. A la par se aplica otro árbol de decisión para eliminar la cobertura de nubes, sombras y cuerpos de agua, de tal manera que se obtengan las pérdidas y ganancias de bosques y tasas de deforestación de toda la cubierta terrestre (Figura 2.4).

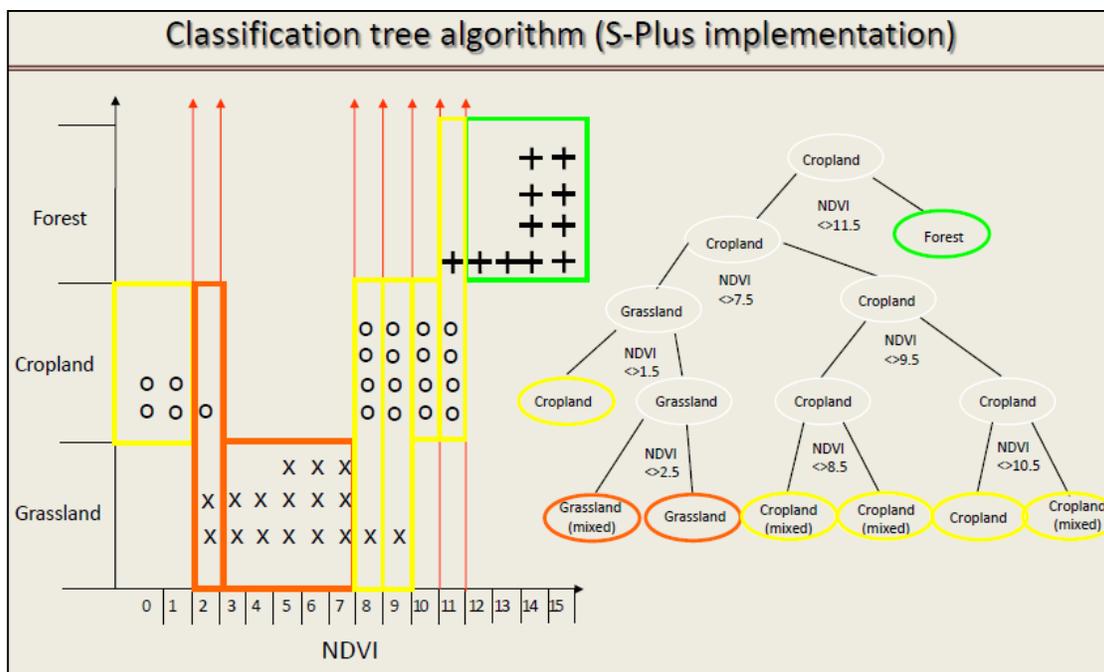


Figura 2.4. Esquema de árbol de decisión, empleado por la metodología de la Universidad de Maryland. Fuente: (University of Maryland).

De las metodologías analizadas podemos señalar con base a Pacheco *et al.*, (2013) que la FRA-RSS TRESS es la que mejor realiza la clasificación, seguida de CLASlite, de PRODES y por último la del FSI. No obstante, al momento de realizar la validación de la deforestación mediante la matriz de confusión y el análisis de regresión lineal, la metodología PRODES presentó mejores resultados que las otras. En este apartado la metodología de Maryland no fue considerada por el autor, ya que esta es una metodología recientemente publicada, no

obstante, esta metodología presenta buenos resultados en comparación con otros trabajos realizados.

Asimismo, en función de la literatura consultada sobre deforestación a nivel global y regional y de las técnicas digitales empleadas para el monitoreo, determinación y evaluación de la deforestación, se puede decir que de las metodologías que se rigen bajo las estrategias REDD+, la de PRODES Digital es la más apta para las zonas tropicales y sub-tropicales del País. Esto, por un lado, porque utiliza un Modelo Lineal de Mezclas Espectrales, la cual, como se mencionó en el sub apartado anterior, es una de las mejores técnicas para el análisis espectral de variables biofísicas continuas. Además, utiliza una segmentación que agrupa los píxeles en función del comportamiento espectral de los mismos y que a su vez emplea una metodología híbrida, es decir, se complementa la clasificación digital con una interpretación o clasificación visual en pantalla, potencializando la eficiencia de las técnicas digitales empleadas.

2.5.- Técnicas de análisis espectral y clasificación más utilizadas en estudios de deforestación que se apegan a los lineamientos de REDD+

En los estudios de deforestación hay una gran variedad de técnicas digitales para determinar las áreas donde ocurrió pérdida de cobertura forestal (conversión de tierras forestales a tierras no forestales).

Dentro de las principales técnicas de clasificación que se emplean para el mejoramiento espectral, se puede mencionar el Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Esta primera etapa de clasificación digital sirve como base para posteriormente aplicar una clasificación de asignación, ya sea por un método supervisado o no supervisado.

Los clasificadores de asignación más empleados en los trabajos de deforestación son: el de árbol de decisión, el de mínima distancia, el ISODATA, el isoseg, y la clasificación visual. Asimismo, se utiliza la técnica basada en el contexto espacial, mediante un proceso previo de segmentación, para realizar la asignación a objetos o grupos de píxeles, y la clasificación de pixel, para realizar la asignación a cada pixel de manera individual.

Los trabajos de la FAO (1993, 2001, 2006, 2010) y los proyectos FRA RSS TRESS I, II y III (FAO, 2014), utilizan el NDVI para el análisis espectral, con el objetivo de resaltar rasgos de interés en la imagen que ofrecen componentes de significado físico, esto aunado con la clasificación basada en contexto espacial que consiste en una segmentación y una clasificación supervisada que permite determinar las clases de interés con buena precisión.

En el trabajo realizado por el INPE se utiliza un Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME) para el mejoramiento espectral, una segmentación y una clasificación visual para obtener las categorías de interés (INPE, 2014). Al igual que los trabajos desarrollados con CLASlite emplean un MLME para el mejoramiento espectral y obtención de las variables continuas de interés (vegetación viva, vegetación muerta y suelo desnudo), pero al momento de realizar la clasificación de asignación utiliza un árbol de decisión (Asner *et al.*, 2009).

Por otro lado, los reportes del FSI y los trabajos del INPE utilizan una clasificación híbrida, pero el FSI emplea el NDVI para el análisis y mejoramiento espectral, y una clasificación no supervisada ISODATA en combinación con una interpretación y clasificación visual, lo que permite obtener buena precisión para poder discriminar mejor las diferentes clases. (FSI, 2014). También por su parte Hansen *et al.*, (2013), utiliza el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), una clasificación supervisada por expertos para obtener las áreas de entrenamiento y árboles de decisión para discriminar las diferentes categorías en función de la reflectancia de los píxeles.

Tabla 2.2. Reseña de técnicas digitales en trabajos de deforestación

<i>Trabajo</i>	<i>Técnica de clasificación (análisis espectral y mejoramiento espectral)</i>	<i>Técnica de clasificación (asignación)</i>
INPE, 2014	Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME)	Segmentación y clasificación visual
FSI, 2014	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Clasificación no supervisada ISOSEG y clasificación visual
Asner <i>et al.</i> , 2009	Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME)	Árbol de decisión
FAO, 2010; FRA RSS TRESS, 2010	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Segmentación multi-temporal y una clasificación supervisada
Hansen <i>et al.</i> , 2013	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Clasificación supervisada y árboles de decisión

El estudio desarrollado por Shanmugam *et al.*, 2005 determinó que el MLME es una de las mejores técnicas para discriminar o clasificar las variables continuas en imágenes satelitales, como la vegetación, suelo desnudo y humedales o cuerpos de agua, en comparación con los algoritmos de máximas probabilidades, clasificadores ISODATA y NDVI. Del mismo modo, podemos afirmar, en base a la revisión bibliográfica realizada, que efectivamente el Modelo Lineal de Mezclas Espectrales es una de las técnicas más eficientes para obtener variables continuas, ya que permite obtener valores puros para cada pixel de variables asociadas a variables biofísicas (Shimabukuro *et al.*, 2006), y aunado con una interpretación y clasificación visual permite obtener datos más precisos sobre el monitoreo, determinación y evaluación de la deforestación.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

El marco de referencia que se presenta en esta investigación describe los conceptos claves para el desarrollo de la misma, tales como: los tipos de muestreo más utilizados en estudios de deforestación, el análisis lineal de mezclas espectrales, la interpretación y clasificación visual y la verificación o validación de los resultados.

3.1.- Tipos de muestreo

En ocasiones en que no es posible o conveniente realizar un análisis de toda el área de estudio (censo completo de toda la población), se selecciona una muestra, entendiendo por tal una parte representativa de la población.

El muestreo es por lo tanto una herramienta de la investigación científica, cuya función básica es determinar qué parte de una población debe examinarse, con la finalidad de hacer inferencias sobre dicha población.

Específicamente en estudios de deforestación se utilizan métodos de muestreo probabilísticos ya que son aquellos que se basan en el principio de equiprobabilidad. Es decir, aquellos en los que todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser elegidos para formar parte de una muestra y, consiguientemente, todas las posibles muestras de tamaño n tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas. Sólo estos métodos de muestreo probabilísticos nos aseguran la representatividad de la muestra extraída y son, por tanto, los más recomendables (Köhl *et al*, 2006; Chuvieco, 2008).

Los esquemas de muestreo más empleados en Percepción Remota para la obtención de datos al igual que para la validación de los mismos son: el muestreo aleatorio, el aleatorio estratificado, el sistemático, sistemático no alineado y por conglomerados.

1. Aleatorio simple. Los elementos se eligen de tal forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados, y que la elección de uno no influya en la del siguiente. Gracias a este carácter probabilístico, el muestreo aleatorio es bastante

sólido estadísticamente, si bien presenta errores en su aplicación espacial, por cuanto puede suponer elevados costes de desplazamiento. Por otra parte, existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial del error presente en la imagen clasificada, y de que algunas categorías, poco frecuentes, no estén representadas en la muestra.

2. Aleatorio estratificado. La muestra selecciona dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo a una variable auxiliar. Es más complejo de diseñar que el anterior, pero aporta información sobre subconjuntos de la población, además de reducir el error de muestreo siempre que la variable auxiliar este claramente relacionada con la distribución del error.
3. Sistemático. La muestra se distribuye a intervalos regulares, a partir de un punto de origen señalado aleatoriamente. Garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada. Por otro lado, no asegura una estimación probabilística, por cuanto no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones.
4. Sistemático no alineado. Modifica el esquema anterior gracias a variar aleatoriamente en cada línea y columna del muestreo una coordenada. Manteniendo fija la otra. Esto permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por otra parte sigue garantizando una revisión completa del territorio.
5. Por conglomerados. Se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, denominado conglomerado, en lugar de individuos aislados. En otras palabras, en cada punto se toman varias muestras en puntos vecinos al elegido aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado. Este método reduce costes, pero resulta más complejo y, normalmente, menos preciso que los anteriores.

3.2.- Análisis lineal de mezclas espectrales

El Análisis lineal de mezclas espectrales (ALME), parte de adjudicarse que la señal recibida para un pixel puede ser una mezcla de reflectividades procedentes de varias cubiertas, en función de la superficie que ocupan en ese pixel, y pretende obtener precisamente esas

proporciones. Por lo tanto, como resultado de esta técnica obtendremos tantas imágenes de salida como categorías pretendan estudiarse (Chuvieco, 2008).

Por lo regular la clasificación de imágenes de satélite ha tenido por misión asignar cada pixel a una sola categoría que previamente es definida en la leyenda de trabajo. La necesidad de categorizar cada pixel de la imagen con un código exclusivo implica asumir que toda la superficie está cubierta por la categoría a la que se ha asignado. En definitiva esta clasificación de la imagen no considera que la radiancia proveniente de un pixel, en la mayor parte de las ocasiones, es una mezcla de distintas cubiertas, y que al clasificarlo simplemente optamos asignarlo a la cubierta dominante. A efectos de la representación cartográfica convencional, este es el objetivo habitual, ya que los mapas temáticos asumen que cada unidad es homogénea: una misma parcela no puede asignarse a dos o más categorías. Cuando en realidad existe esa mezcla, que va más allá de la mínima unidad cartografiable a una determinada escala, las opciones más empleadas son, o bien simplificar la realidad, prescindiendo de las categorías menos representativas, o bien generar categorías mixtas, en donde la realidad se etiqueta considerando esa difícil separación en componentes.

Una opción en ambos planteamientos es emplear técnicas que permitan extraer información sobre el grado de mezcla presente en cada pixel. En otras palabras se trataría de obtener imágenes que nos indiquen la proporción de cada categoría de interés en un pixel, asumiendo que la respuesta recibida por el sensor es, de alguna forma, una combinación de reflectancias espectrales.

En primer lugar en el ALME, se asume que la radiación recibida por el sensor desde cada tipo de cubierta se restringe al ámbito de la parcela ocupada por el pixel; en otras palabras, que no está influyendo en la radiación reflejada la señal procedente de una cubierta vecina (Settle y Darake, 1993). En caso de pixeles que contengan más de un tipo de cubierta que tienda a, por decirlo así, “ensombrecer” al resto, provocando una ponderación superior a su propia superficie en la radiación finalmente reflejada al sensor. La linealidad de la mezcla es asumible solo en las bandas del espectro óptico, no el térmico, ya que la radiancia no es lineal en la temperatura. Por último, y más importante aún, se asume en el ALME que existen reflectancias espectrales puras, válidas para toda la zona analizada (Quarmby *et al.*, 1992).

Si estas tres teorías son válidas, podemos asumir que la reflectividad de un determinado pixel con mezcla es una combinación lineal de reflectividad características de unas cubiertas o componentes básicos (que denominaremos componentes puros o miembros terminales: *endmembers*), en proporción equivalente a la superficie que ocupa. En definitiva, se cumple la formula siguiente (Shimabukuro y Smith, 1991):

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1,p} F_{I,J,m} \rho_{m,k} + e_{i,j} \quad (3.1)$$

Donde $\rho_{i,j,k}$ indica la reflectividad observada en el pixel i,j en la banda k ; $F_{I,J,m}$ es la proporción del componente m en ese pixel i,j para cada uno de los p componentes puros $\rho_{m,k}$ corresponde a la reflectividad característica de ese componente m en la banda k , y $e_{i,j}$ es un término del error asociado a la estimación de las proporciones en cada pixel i,j .

Esta fórmula está sujeta a dos a dos restricciones. Por un lado, la proporción de cada componente puro F_m debe de estar entre 0 y 1:

$$0 \leq F_{i,j,m} \leq 1 \quad (3.2)$$

Esto quiere decir que no puede haber proporciones negativas, y

$$\sum_{m=1,p} F_{i,j,m} = 1 \quad (3.3)$$

Lo que indica que la suma de las proporciones para todos los componentes es igual a la superficie total del pixel.

La ecuación 3.1 también puede expresarse en términos de ND, en lugar de reflectividad, siempre que no se modifique la linealidad frente a la información inicialmente detectada por el sensor. El interés de presentar la formula en magnitudes físicas, y más importante, del ALME, es el de definir con precisión los componentes puros de los que van a obtenerse las imágenes “desmezcladas”. Estos componentes son los típicos característicos de cubierta que explican la señal reflejada hacia el sensor. Se asume que el resto de situaciones que se presenten en la imagen son una mezcla de ellas. Por ejemplo los componentes puros podrían ser la vegetación sana, el suelo y las sombras, para un estudio de deforestación (Adams *et al.*, 1995; Holben y Shimabukuro, 1993); las plantaciones forestales vigorosas, las recientemente cortadas y las que ofrecen un proceso de regeneración en el caso de un estudio forestal (Hlavka y Spaner, 1995); la vegetación sana, la quemada, y las sombras, para una

cartografía de incendios forestales (Caetano *et al.*, 1994), o los tipos de cultivo para un inventario de cosechas (Quarmby *et al.*, 1992). Los más habituales han sido los de vegetación vigorosa, suelo y sombra, si bien otros autores recomiendan añadir a estos tres básicos un cuarto correspondiente a la vegetación seca o no fotosintética (Riaño *et al.*, 2002; Roberts *et al.*, 1993).

Para obtener las reflectividades características de los componentes puros de la imagen pueden abordarse varios procedimientos que podemos dividir en dos grupos, según se utilicen los datos de la propia imagen o información externa. En el primer caso, podemos seleccionar los píxeles representativos de cada componente puro ($\rho_{m,k}$ en la fórmula anterior) a partir de varios criterios:

El más sencillo es seleccionarlo a partir del conocimiento del área de estudio que posea el intérprete, lo que le permita extraer de la imagen algún píxel que considere completamente homogéneo de cada componente puro. Como es lógico, esta selección es arriesgada, ya que si seleccionamos un píxel con mezcla, los resultados del ALME producirán un ruido equivalente.

Otros autores recomiendan extraer los datos de la imagen con un procedimiento más objetivo, que permita asegurar la calidad de las estadísticas a un con un escaso conocimiento del territorio. Entre las técnicas propuestas, tal vez la más extendida es la denominada pixel purity index (PPI: Boardman *et al.*, 1995). El método parte de representar la nube de puntos de una determinada imagen en un espacio n-dimensional, que se va re-proyectando aleatoriamente. En cada iteración se anotan los píxeles extremos de esa nube, señalándose los más puros como aquellos que alcancen con mayor frecuencia la condición de extremos.

La alternativa para extraer los componentes puros sería utilizar espectros extraídos de fuentes externas. Puede tratarse de firmas espectrales medidas con radiómetro o extraídas de alguna biblioteca espectral, o incluso simuladas mediante algún modelo de simulación. Esta opción permite controlar mejor la pureza de los valores de entrada, evitando efectos anómalos a la cubierta, como serían las condiciones topográficas o del sustrato, ya que los espectros se toman en condiciones muy controladas. Sin embargo, esta alternativa tiene otros inconvenientes, como asumir que las imágenes están adecuadamente calibradas y corregidas del efecto atmosférico y topográfico.

Una vez obtenidas las reflectividades o ND característicos de cada componente puro, pueden generarse las imágenes de las proporciones ($F_{i,j,m}$) solucionando para cada pixel la ecuación 3.1. Normalmente, las proporciones se obtienen de tal forma que se minimice el error residual de cada pixel ($e_{i,j}$). Por ello puede describirse esta fórmula en función del error:

$$e_{i,j,k} = \rho_{i,j,k} - \sum_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} \quad (3.4)$$

De tal forma que los valores a estimar ($F_{i,j,m}$) permitan minimizar el error (o más concretamente, el cuadrado de los errores). Este es el criterio denominado de ajuste por mínimos cuadrados, que tiene dos modalidades de solución: el ajuste con restricción y el ajuste ponderado (Shimabukuro y Smith, 1991). Precisamente una de las ventajas del ALME frente a otras técnicas de interpretación es que nos ofrece una imagen de los errores del modelo en cada pixel, o dicho de otra forma, nos permite conocer el grado de ajuste de nuestro modelo a la realidad de las cubiertas presentes en cada pixel de la imagen. Si el error es alto para una determinada zona de la imagen seguramente habrá componentes puros de importancia que no se hayan identificado correctamente.

El ALME resulta de gran interés para extraer información compleja de las imágenes hiperespectrales y es muy apropiada para expresar el carácter continuo de los datos ambientales, que no tienen una clara solución de continuidad en el espacio. Además implica una interesante alternativa para extraer información de los sensores de baja resolución espacial, AVHRR, MODIS o Vegetation, ya que facilita estimaciones sobre las mezclas, tan abundantes en estos pixeles de gran tamaño, manteniendo una alta frecuencia de adquisición y bajo coste.

3.3.- Interpretación y Clasificación visual

Una interpretación precisa de imágenes requiere tener en cuenta los principales rasgos de su adquisición, así como de los tratamientos que puedan haber abordado de las antenas receptoras. Por ejemplo, la fecha de adquisición es fundamental para plantear la hipótesis de interpretación adecuada, considerando el ciclo fenológico de los cultivos o de las especies forestales. Igualmente, los ángulos solares resultan de interés para conocer las condiciones

de iluminación de la zona observada y, por lo tanto, plantear hipótesis de interpretación en función de la combinación relieve-iluminación: laderas que se encuentran en umbría y solana y su relación con la identificación de sombras (Chuvieco, 2008).

Hoy en día el análisis visual se hace sobre imágenes digitales, a partir de la interpretación en pantalla o imprimiéndolas previamente en cualquier periférico gráfico de suficiente calidad.

Unas de las ventajas del análisis y clasificación visual sobre la digital es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos. Mientras el tratamiento digital se basa, casi exclusivamente, sobre la intensidad radiométrica de cada pixel en las distintas bandas utilizadas para la interpretación, el análisis visual puede utilizar otros elementos, como la textura, estructura, emplazamiento o disposición, muy difíciles de definir en términos digitales.

Estos criterios nos permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático distinto. Por ejemplo algunos cultivos en regadío suelen ofrecer una respuesta espectral muy parecida a los parques urbanos, ya que ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies vegetales. Sin embargo su significado temático es claramente distinto, y así debe incluirse en la cartografía final. Digitalmente la distinción es compleja, pues los valores numéricos de ambas cubiertas son muy similares. Ahora bien, basta incorporar un criterio visual sencillo, como es el contexto geográfico, para separarlas (Chuvieco, 2008).

Entre las pautas manejadas en Percepción Remota, algunas son comunes con la fotografía aérea; tono, textura, estructura, sombras, contexto, etc. Otras son propias de las imágenes espaciales, principalmente en los que atañe a la dimensión multi-espectral y multi-temporal de las observaciones. Un último grupo corresponde a criterios tradicionales en la foto-interpretación que rara vez resultan accesibles en imágenes espaciales, como es el caso de la cobertura estereoscópica, tan vital para estudios de relieve. En cualquier caso, ya sean nuevos o tradicionales, los criterios visuales deben manejarse con cierta precaución en las imágenes de satélite, por cuanto las escalas de trabajo y la geometría de adquisición son distintas a las empleadas en fotografía aérea. Según vayan disponiéndose imágenes de mayor resolución espacial, estas diferencias se irán atenuando, hasta convertirse prácticamente en inexistentes.

Varios autores han sugerido clasificar esos criterios en una escala jerárquica, en función de su grado de complejidad y de las variables que se consideran (European Commission, 1993). El brillo y color son los criterios más elementales, pues caracterizan espectralmente una cubierta, y están directamente relacionados con la forma en que reflejan la radiancia incidente en distintas bandas del espectro. La forma, tamaño, y textura tienen que ver con las propiedades espaciales de los objetos, en sí mismo considerados, mientras la sombra y el contexto (emplazamiento) también expresan aspectos espaciales, pero en este caso en relación a los objetos circundantes. Finalmente, la dimensión temporal hace referencia a cómo se modifican las cubiertas a lo largo del año. A continuación revisaremos con detalle los criterios de interpretación visual más utilizados.

Brillo

El brillo hace referencia a la intensidad de la radiancia recibida por el sensor en un pixel, para una determinada banda del espectro. Visualmente, los pixeles con tonos oscuros indican aquellas áreas sobre las que el sensor detectó una débil radiancia (lo que indica baja reflectividad, si estamos trabajando en el espectro solar), mientras las zonas claras corresponden a zonas con mayor radiancia. En otras palabras el brillo se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, por lo que sus firmas espectrales son la base para entender la distribución de tonos de gris en la imagen resultante.

Puesto que la energía reflejada desde una cubierta varía en distintas longitudes de onda, su brillo característico también varía en imágenes adquiridas para diversas bandas del espectro. Como ya vimos, una superficie ocupada por vegetación vigorosa presentará una baja radiancia en las bandas visibles del espectro, especialmente en el azul y rojo, como consecuencia de la alta absorción de la luz solar que realizan los pigmentos de la hoja en esas longitudes de onda. En consecuencia, en las imágenes adquiridas sobre esas bandas la vegetación aparecerá en gris oscuro. Por el contrario, se mostrará en grises claros si la imagen corresponde al infrarrojo cercano, ya que en esa región del espectro la hoja sana ofrece una elevada reflectividad. En definitiva para interpretar los brillos que ofrece la imagen se ha de tener presente el comportamiento espectral de las distintas cubiertas en las bandas espectrales que se estén analizando.

Color

Diversos investigadores indican que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad luminosa (Barret y Curtis, 1999). Si a eso le sumamos el aumento de información que supone la mezcla de varias bandas del espectro, fácilmente se comprende que el color resulta un elemento básico en la interpretación visual de imágenes.

Como es bien sabido, el color que aprecian nuestros ojos es producto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda. Aquellas superficies con alta reflectividad en el azul, y baja en el resto, aparecen con ese color, mientras ofrecen un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestro ojo solo percibe las longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 0.7 μm , separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras.

Una impresión similar al color que nosotros percibimos puede obtenerse cuando combinamos las bandas espectrales RGB, aplicando a cada una de ellas los tres colores primarios, en ese mismo orden. Esa asignación natural puede modificarse a voluntad del intérprete, asignando los colores primarios RGB a tres bandas espectrales cualquiera, en el orden que se estime más oportuno, cuando no se seleccione las bandas RGB, si no otras cualquiera, el color resultante no será con el que nosotros percibimos de los objetos (lo que llamamos color natural), composiciones falso color. Esas composiciones coloreadas no se ajustan a los colores que aprecian nuestros sentidos, pero pueden ser más interesantes desde el punto de vista de la interpretación temática de la imagen.

La mezcla de las tres bandas espectrales en una composición en color puede conseguirse de acuerdo a dos procesos, denominados aditivo y sustractivo.

Textura

La textura hace referencia a la heterogeneidad espacial de una determinada cubierta, en definitiva al contraste espacial entre los elementos que la componen. Visualmente se manifiesta como la rugosidad o suavidad de los tonos de gris. Cuanto más similares sean, la tonalidad será más homogénea en el interior de la cubierta, y la textura será más lisa. Por el contrario, si existe una alta heterogeneidad en los niveles de grises de esa cubierta, aparecerá como muy rugosa, con textura grosera.

La textura de la cubierta procede a la relación entre el tamaño de los objetos que la forman y la resolución del sensor. Cuando un objeto ocupa una superficie inferior a 1mm^2 (en la resolución de la imagen) no puede identificarse individualmente, si no solo a través de la variabilidad espacial que provoca. En función del tamaño de los objetos que forman una cubierta suelen distinguirse tres tipos de textura:

1. Textura grosera, cuando los objetos están comprendidos entre 0.25 y 1mm^2 a la escala de la imagen.
2. Textura media, objetos comprendidos entre 0.04 y 0.25mm^2 .
3. Textura fina, objetos inferiores a 0.04mm^2 .

En sentido estricto, además del tamaño de los objetos que forman una determinada cubierta, la textura con la que aparece en la imagen puede variar en función de diversos factores. Los más importantes son el ángulo de observación del sensor (una observación más aguda incrementa la rugosidad), las condiciones de la iluminación (ángulos solares más bajos, el efecto de sombras es más evidente), y la longitud de onda (una superficie lisa a longitudes largas puede aparecer como rugosa en cortas). Trabajando en el espectro visible e IRC, la rugosidad se modifica principalmente en función de las condiciones de iluminación solar. Un bloque natural, por ejemplo, puede ofrecer una textura muy variada a lo largo del año, dependiendo de la altura del sol sobre el horizonte y de su desarrollo estacional.

En cualquier caso, el criterio de textura es muy importante para discriminar determinadas cubiertas que pueden ofrecer un comportamiento espectral uniforme. Por ejemplo, los frutales en regadío y las caducifolias ofrecen una reflectividad muy similar, por cuanto, en muchas ocasiones, presentan grandes afinidades fisiológicas.

Forma-Tamaño

La forma y el tamaño de un determinado objeto es una clave determinante para identificarlo, ya que en su contorno nos permite asimilarlo a alguno de los patrones que nos resultan familiares. Al igual que en otros criterios visuales, la forma resulta más determinante en imágenes de alta resolución espacial, ya que permite reconocer el perfil específico de muchos más objetos, limitándose solo a los de gran tamaño en las imágenes de resolución media. A partir de la forma, por ejemplo, podemos determinar la presencia de ciertos objetos urbanos: instalaciones deportivas, centros comerciales, aeropuertos, fábricas, etc. También facilita la

discriminación entre carreteras y líneas de ferrocarril o de los ríos frente a los canales artificiales, que ofrecerán un aspecto más geométrico. También permite reconocer estructuras geológicas bien definidas: volcanes, domos, lineamientos, así como algunas perturbaciones atmosféricas.

En caso de posible duda de la forma, el tamaño complementa bastante la identificación de una cubierta. Por ejemplo, la forma de un campo de tenis y de fútbol es similar, pero no su tamaño. El empleo de este criterio viene marcado por la resolución de las imágenes.

Contexto espacial

Por situación o contexto espacial se quiere indicar la localización de las cubiertas de interés en relación con elementos vecinos de la imagen.

Un ejemplo del empleo de este criterio de interpretación hace referencia, de nuevo, al mundo urbano. Un jardín situado al interior de la ciudad y formado por especies de hoja caduca, tiende a presentar un tono, un color, y una textura muy similares a los que puede ofrecer un bosque natural de caducifolios. La confusión se debe a que ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies, incluso con densidades y heterogeneidad (textura) muy parejas. En esa situación, no cabe más criterio para separarlas que ponerlas en relación con el entorno geográfico: aquellas que aparezcan en el interior de una superficie edificada, más o menos densa, pueden considerarse como parques urbanos, mientras que las que se sitúen en un contexto de vegetación natural serán asignadas a las categorías de bosques. En similares términos cabe expresarse en lo que se refiere a la separación entre árboles de rivera y otras especies caducifolias, ya que las primeras se asocian con cursos fluviales.

Sombras

Las variaciones de condiciones de iluminación en una cubierta introducen una notable variedad en su firma espectral característica, de tal forma que una misma cubierta puede ofrecer valores de reflectividad bastante contrastados según se sitúe en una vertiente iluminada directamente por el sol, o en umbría. Este aspecto conviene tenerlo en cuenta, de cara a evitar señalar fronteras entre coberturas allí donde solo hay cambios en las condiciones de iluminación.

En el campo de análisis visual, la sombra producida por la iluminación que recibe un determinado objeto resulta, en muchas ocasiones, criterio clave para detectarlo o identificarlo, ya que nos proporciona una idea de su altura y profundidad. Además permite realzar la interpretación de los rasgos geomorfológicos y de la textura de la imagen, especialmente en zonas forestales.

3.4.- Validación de resultados

Una vez obtenidos los resultados de cualquier tipo de interpretación de las imágenes, ya sea visual o digital, resulta obligado verificar la calidad de los mismos, de cara a comprobar la validez tanto de producto generado como el método propuesto. Frecuentemente, la verificación de resultados se considera parte de ella. Ahora bien, estrictamente debe también incluirse en la interpretación visual de imágenes, así como en otros tipos de análisis digital, como sería la generación de variables continuas o la detección de cambios (Chuvieco, 2008; Congalton y Green, 1987).

La verificación de resultados permite al usuario valorar su grado de acuerdo con la realidad. Por ejemplo, si el interés del trabajo es ofrecer una estimación del rendimiento de un determinado cultivo, la estimación del error nos permitiría conocer en qué márgenes se mueve el rendimiento real, de cara a tomar decisiones sobre la comercialización futura de este producto o el tipo de ayuda que requiere su producción.

Este proceso de validación siempre requiere que comparemos nuestros resultados con una fuente externa, que se considere fiel representante de la realidad presente en el terreno en el momento de adquirir la imagen. Como lógicamente no es posible tener esa información de referencia para toda el área de estudio, el proceso de verificación requiere aplicar técnicas de muestreo que nos permitan estimar, con la mayor precisión y el menor coste posible, el error que contienen nuestros resultados. En consecuencia, este proceso no es nada más que un ejemplo concreto de muestreo espacial, que se dirige a estimar la variable error a partir de seleccionar una muestra suficientemente representativa de las condiciones del terreno, en el mismo lugar y fecha en que se adquirió la imagen. Posteriormente, el análisis estadístico de esos pares de observaciones (realidad-resultados) nos permitirá estimar numéricamente ese grado de error.

La validación de resultados se desglosa en las siguientes fases (Congalton y Green, 1999):

-Diseño del muestreo, señalando cuántas parcelas deben muestrearse y cómo se seleccionan.

-Recolectar datos de referencia y resultados sobre las parcelas seleccionadas en la muestra. Esta fase incluye la selección de las fuentes de la verdad-terreno, el procedimiento para recolectar los datos de referencia, y la extracción de los resultados del análisis digital.

-Comparar los datos de referencia y nuestros resultados, mediante distintos test estadísticos y la generación de una matriz de confusión.

-Análisis de los errores encontrados, validación de la calidad del proceso, y si es el caso, cuantificación de la fiabilidad de las distintas metodologías aplicadas.

Medidas de fiabilidad

La estimación de la exactitud alcanzada por los resultados de una interpretación de imágenes se ha realizado por varios métodos.

El más sencillo es una valoración cualitativa que lleva al intérprete a dar por buenos unos productos, si ofrecen una visión acorde con su conocimiento y la realidad del terreno.

Otro método es el denominado Verificación No Espacial, que implica comparar los resultados con una fuente estadística convencional, como pueden ser los inventarios agrícolas o forestales que se hacen mediante estimaciones de terreno o encuestas a las cámaras agrarias.

El tercer método de verificación implica utilizar como datos de comprobación los mismos que se hayan empleado para ajustar el modelo. Esta opción reduce el coste del trabajo de campo, ya que no supone una inversión añadida a la propia realización del modelo, pero incluye un importante sesgo positivo en la valoración de resultados.

El cuarto método y el más adecuado para validar es seleccionar una serie de muestras independientes, no utilizadas en la obtención de resultados, que permitan generar una medida estadísticamente más sólida del acuerdo entre la imagen y verdad-terreno. Lógicamente, la selección y recolección de esas muestras supone un coste adicional al proyecto, que no repercute en una mejora de su fiabilidad, si no solo en la medida de esta. A partir de la obtención de esas muestras independientes puede estimarse el error de los resultados, ya sea mediante un estadístico continuo en variables de intervalo, ya mediante una tabla o matriz de

confusión, en donde se resuman los acuerdos y desacuerdos entre clases del mapa y del terreno.

Fuente de errores en una clasificación temática

La fiabilidad de los resultados depende de distintas variables que conviene tener en cuenta a la hora de valorar los errores estimados en el proceso de verificación. Por un lado, las características del sensor con el que trabajamos, que quizá no ofrezca la resolución necesaria para esa determinada aplicación. Por otro, el método de trabajo, que puede no ser capaz de extraer toda la información contenida en la imagen. Un tercer grupo de factores hace referencia a la propia complejidad del área de estudio. Finalmente, también es preciso considerar los propios errores del proceso de verificación, que lleven a una estimación poco certera del error realmente en la imagen.

Diseño del muestreo para la validación

El diseño y desarrollo del muestreo es la parte principal del proceso de verificación. Al igual que en otras aplicaciones, el muestreo espacial sirve en este caso para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de forma tal que sea suficientemente representativa del conjunto. Esa semejanza con la población de referencia debe conseguirse, además, minimizando el tamaño de la muestra, con objeto de reducir los costes del proceso de verificación. En definitiva, un buen muestreo sería aquel que permita extraer la mejor estimación posible de la variable con el menor tamaño de muestra posible. Esto implica que el esquema de muestreo elegido tiene que permitir realizar estimaciones estadísticas a partir de la muestra, ser sencillo de implementar, analizar y recoger adecuadamente la variabilidad espacial del error y ser de bajo coste. La selección de uno u otro tipo de muestreo dependerá de una serie de factores (Congalton y Green, 1999): ¿Cómo se distribuye la información en el área de estudio? ¿Cuál es la unidad de muestreo más apropiada? ¿Cuántas muestras elegir? ¿Cómo elegirlas?

Distribución de la información

Este aspecto hace referencia al tipo y continuidad espacial de la variable que estamos verificando. En otras palabras, el esquema de muestreo debe considerar si se trata de una variable discreta o continua, y cómo se distribuye esa variable en el espacio, principalmente si presenta rasgos acusados de auto-correlación espacial.

En cuanto al tipo de variables, en verificación de clasificaciones temáticas se manejan técnicas estadísticas aptas para variables nominales. En consecuencia, el muestreo se basará sobre distribuciones categóricas, siendo la más frecuente la binomial (acierto/error). Por el contrario, cuando se pretenda verificar una variable continua, como la temperatura o el contenido de la humedad de la vegetación, el muestreo puede basarse en distribuciones continuas, como la distribución normal o la Poisson.

Unidad de muestreo

La unidad de muestreo hace referencia al elemento sobre el que se extraerá la información de referencia para comparar con nuestros resultados. Con frecuencia se identifica con el pixel, pero no tiene porqué. De hecho, en muchas ocasiones será más conveniente utilizar como unidad de muestreo un grupo de pixeles, lo que permitirá reducir los posibles errores de la georreferenciación. También pueden utilizarse como unidad muestral cada uno de los polígonos temáticos que se hayan definido en la clasificación. En este caso, y puesto que la verificación debe realizarse con los mismos esquemas de clasificación, no convendrá que la unidad de muestreo sea más pequeña que la unidad cartografiable. De otra manera, se podría señalar como errores lo que en realidad sería fruto de la generalización.

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y DATOS

4.1.- Ubicación geográfica

El Estado de Sinaloa se localiza al noroeste del país entre las latitudes 27° 02' y 22° 29' Norte y las longitudes 105° 24' y 109° 27' Oeste. Posee una superficie de 57,365 km², que representa el 2.9 % de la superficie total del País (Figura 4.1). Sinaloa cuenta con una superficie forestal de 37,000km², de las cuales, 7,440 km² corresponden a bosques de clima templado (pino y encino), 19,000 km² a selvas altas, medianas y bajas, 2,120 km² a vegetación de zonas áridas compuestas de matorrales y especies arbustivas y 1,520 km² a vegetación hidrófila y halófila (INEGI, 2013).

Con respecto al mapa de uso de suelo y vegetación de INE, en el año 2000, la distribución de los usos y coberturas del suelo en Sinaloa estaba ocupado por un 38% de usos pecuarios, un 25.2% de uso agrícola y un 18% de usos forestales (INE, 2010).

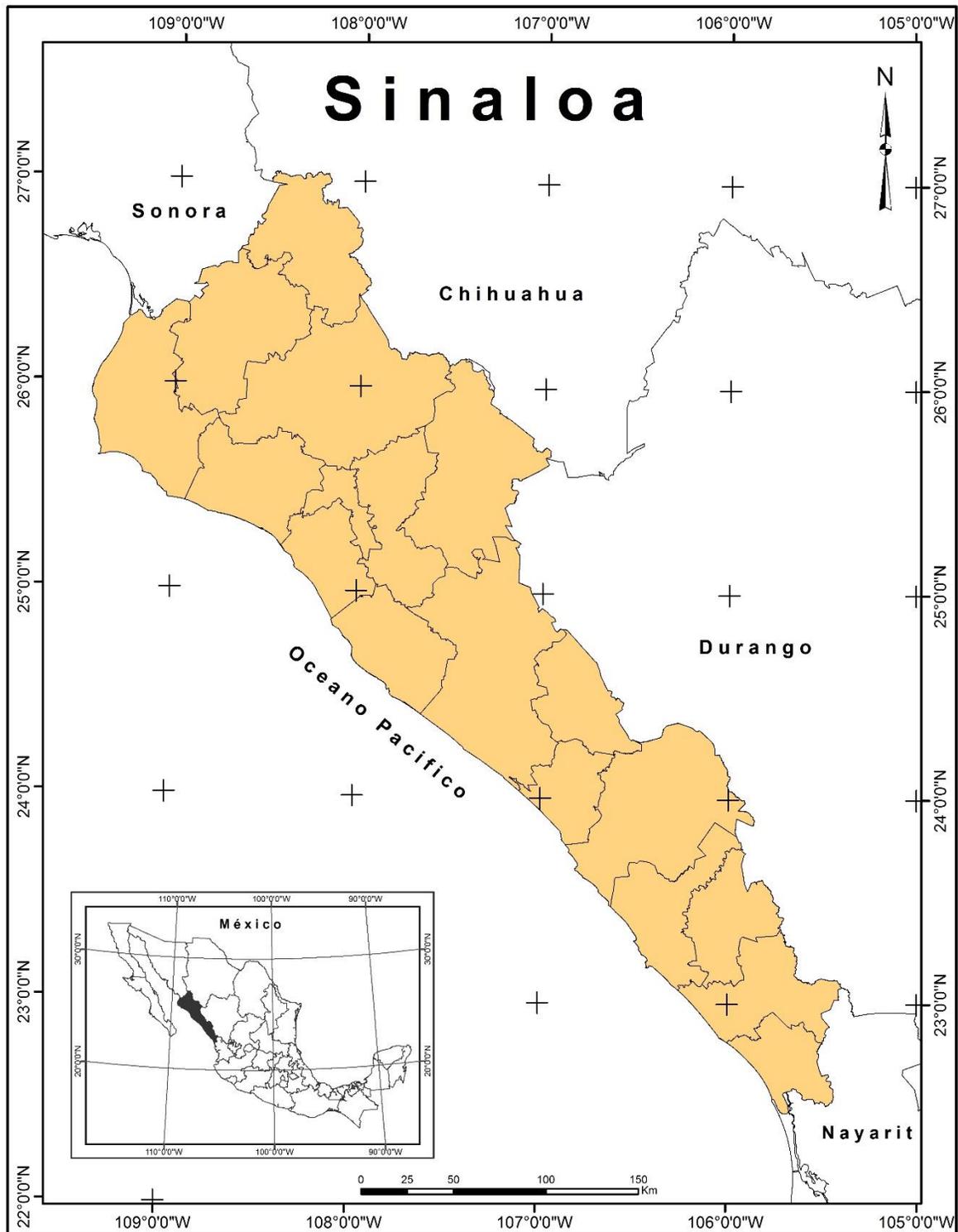


Figura 4.1. Localización geográfica del área de estudio. Fuente: (Corrales G., 2013)

4.2.-Mapas de uso del suelo

Para el presente trabajo se utilizaron los mapas de uso de suelo y vegetación del año 1993 proveniente del INE (serie II) (Figura 4.2) y el mapa de uso de suelo y vegetación del INEGI (serie V) (Figura 4.3) del año 2011, ambos mapas fueron elaborados mediante la foto-interpretación de imágenes Landsat obtenidas de los sensores TM y ETM respectivamente, con una resolución espacial de 30 metros, obteniendo una cartografía a escala 1:250,000, la cual permite conocer la vegetación en la totalidad del territorio nacional, conservando cierto nivel de detalle.

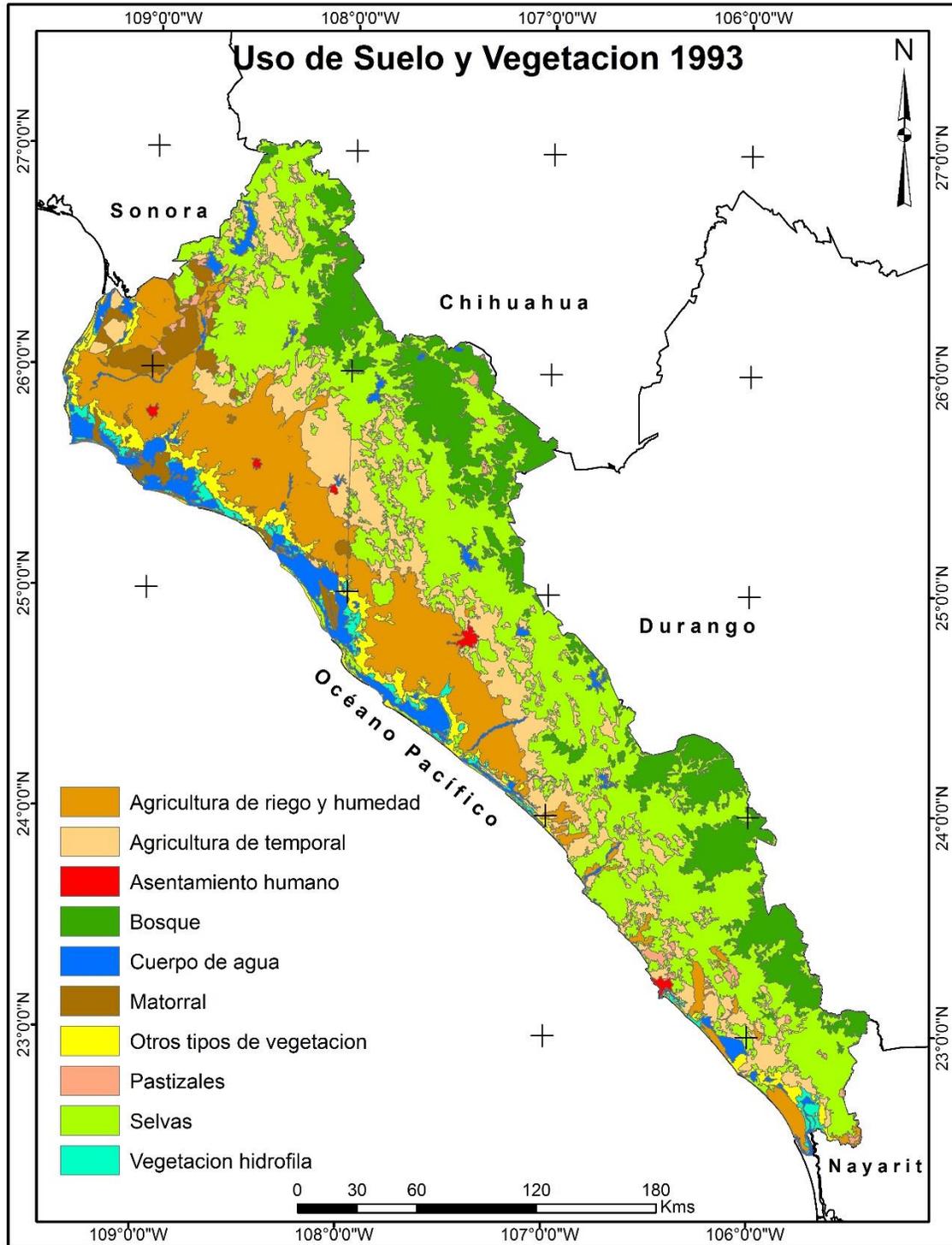


Figura 4.2. Mapa de Usos de Suelo y Vegetación de 1993

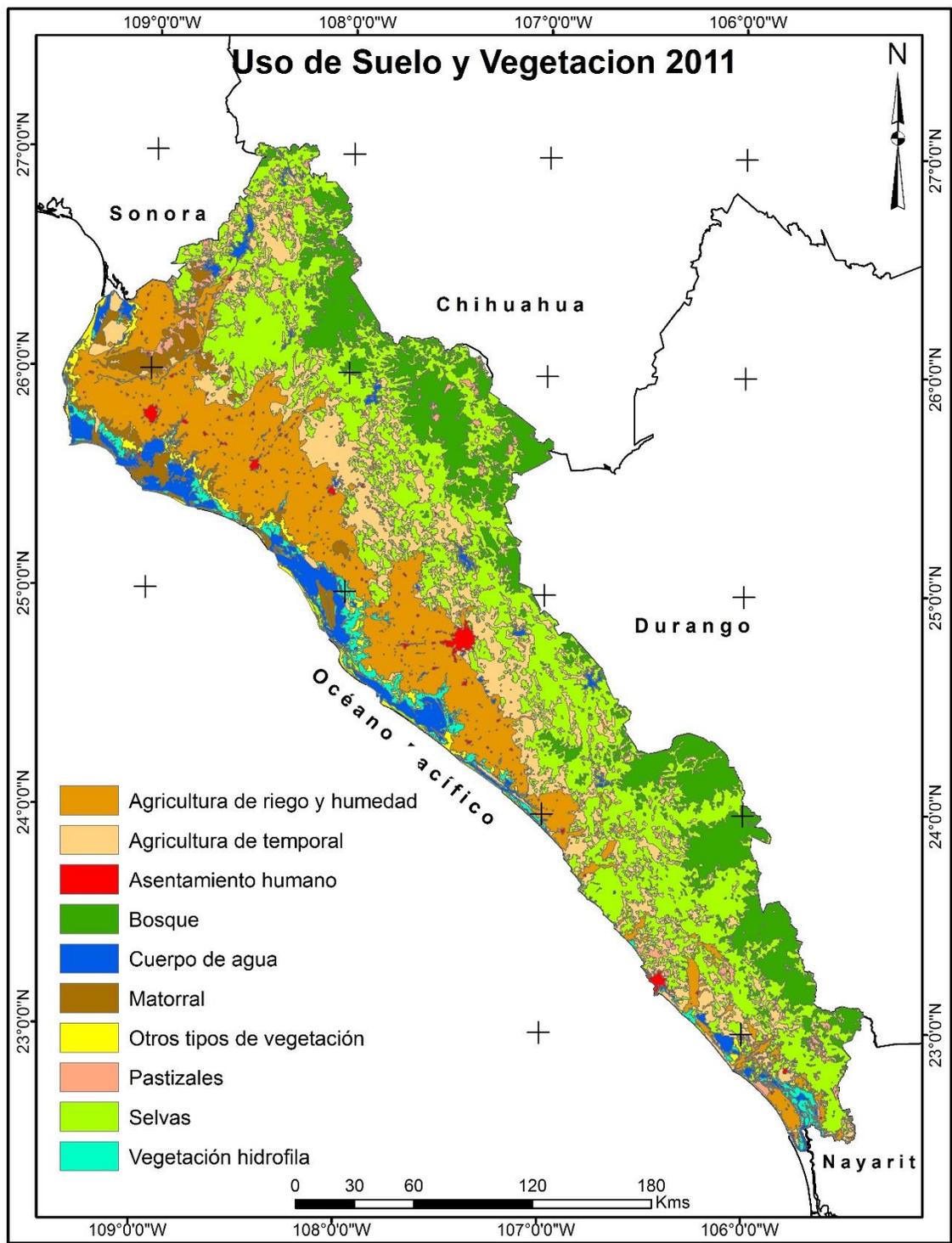


Figura 4.3. Mapa de Usos de Suelo y Vegetación de 2011.

El sistema clasificatorio de los mapas del INE (serie II) de 1993 está organizado de forma jerárquica en cuatro niveles (Formación, Tipo, Comunidad y Subcomunidad). El nivel más detallado comprende 75 categorías resultantes de cinco talleres con expertos en el tema. Dicho sistema permite pasar de un nivel de alta resolución (comunidad) a uno de baja resolución (formación).

Por su parte la cartografía de la Serie V está organizada en una nueva adecuación conceptual que consideran tres tipos de información a representar:

1.- Información Agrícola-Pecuaria-Forestal: Se refiere a los terrenos utilizados con fines agrícolas, pecuarios y forestales y que han desplazado a las comunidades vegetales originales.

2.- Información Ecológica-Florística-Fisonómica: Se refiere a las comunidades vegetales naturales e inducidas de acuerdo a los criterios ecológicos, florísticos y fisonómicos con los que se establece su caracterización.

3.- Información Complementaria: Se refiere a los aspectos naturales o antropogénicos que inciden directa o indirectamente en la distribución geográfica de las comunidades vegetales o de las áreas agrícolas.

Como información complementaria también se utilizó para el análisis de la información los mapas administrativos a nivel Estatal y a nivel Municipal, los cuales son los oficiales del INEGI.

4.3.- Imágenes de sensores ópticos-electrónicos

Se utilizaron imágenes de los satélites Landsat, que fueron tomadas en el período de sequía entre Enero y Mayo, con más o menos 2 años de diferencia a los establecidos como referencia, es decir, 1990 y 2014, este criterio de años de referencia, es el utilizado actualmente por el proyecto RSS (Remote Sensing Survey) de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) dentro del programa FRA 2010 (Forest Resources Assessment, 2010) (FAO, 2009).

Las imágenes corresponden a los path/row: 033/042, 032/043 y 032/42 (Figura 4.4), procedentes de los sensores multiespectrales Thematic Mapper (TM), de los satélites Landsat 4 y 5, y del sensor multiespectral Operacional Land Imager (OLI) del satélite Landsat 8. Las mismas fueron obtenidas de la colección del Instituto de Estudios Geológicos de los Estados Unidos (USGS) (<http://glovis.usgs.gov/>) de acceso libre, estas poseen un nivel de corrección radiométrico y geométrico L1T. Para este estudio se utilizaron las bandas de reflectividad: rojo (0.63-0.69 μm) B3, infrarrojo cercano (0.76-0.90 μm) B4 e infrarrojo medio (1.55-1.75 μm) B5 de TM y ETM+; y rojo (0.63-0.68 μm) B4, infrarrojo cercano (0.84-0.88 μm) B5 e infrarrojo medio (1.56-1.66 μm) B6 de OLI.

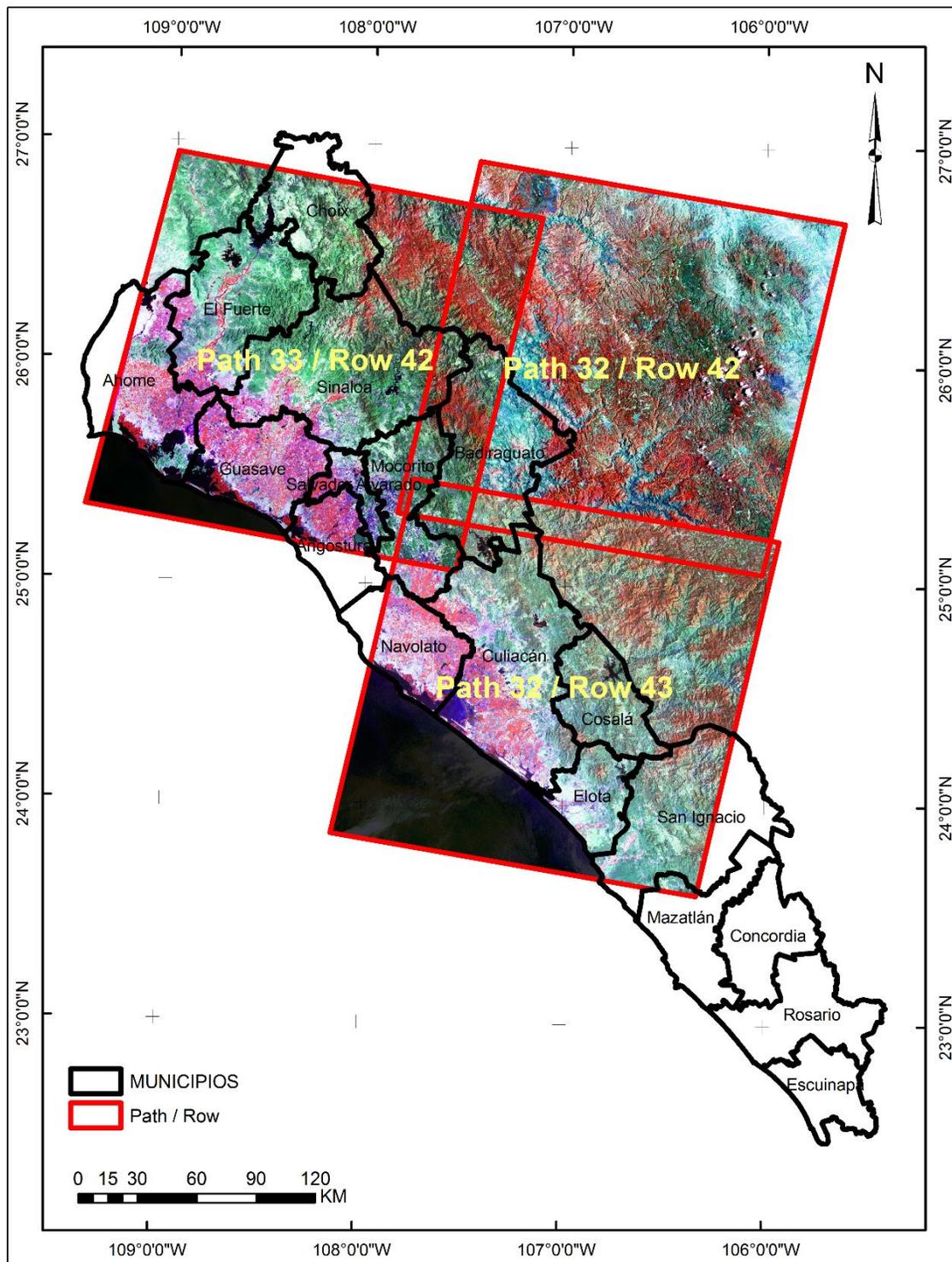


Figura 4.4. Mapa de los Path/Row

4.4.- Programas

Por su parte, se utilizó el Sistema de Monitoreo de la Deforestación del Amazonas (TerraAmazon), que contiene componentes disponibles de software libre, basado en la librería TerraLib, desarrollado por el Instituto Nación de Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil. Este sistema es modular ya que permite la visualización, edición de vectores y la clasificación temática, con un control de procesos para operar en el entorno de cliente-servidor. Además, permite la interpretación asistida de imágenes multi-temporales de diferentes satélites, en un entorno corporativo, distribuido y concurrente, con el fin de producir mapas de tamaño continental (INPE, 2011).

La arquitectura de TerraAmazon es un entorno Cliente-Servidor, con una base de datos Terralib utilizando PostGRESQL como Sistema Manejador de Base de Datos (DBMS), este sistema cuenta con diferentes niveles de usuarios que pueden manipular la base de datos (Figura 4.5).



Figura 4.5. Arquitectura del sistema TerraAmazon. Fuente:

(http://terraamazon.org/images/DocumentacaoTerraAmazon/TerraAmazon_User_Guide_Administrator.pdf)

El modelo del sistema TerraAmazon consiste principalmente en la siguiente estructura: Access Control, Users and User Groups, Cell Layer, Class, Classification Process, Database, Conceptual Model, Edition Layer (or Input Layer), Edition Mode, Interest Area (or Area of Interest), Layer, Output Layer, Phase, Project, Rule, Scenario, Theme, View. Este sistema está solamente disponible para Microsoft Windows® OS.

La interface principal del software está compuesta principalmente de tres áreas: Database & Layers Tree, Views & Themes Tree y Drawing Area (Figura 4.6).

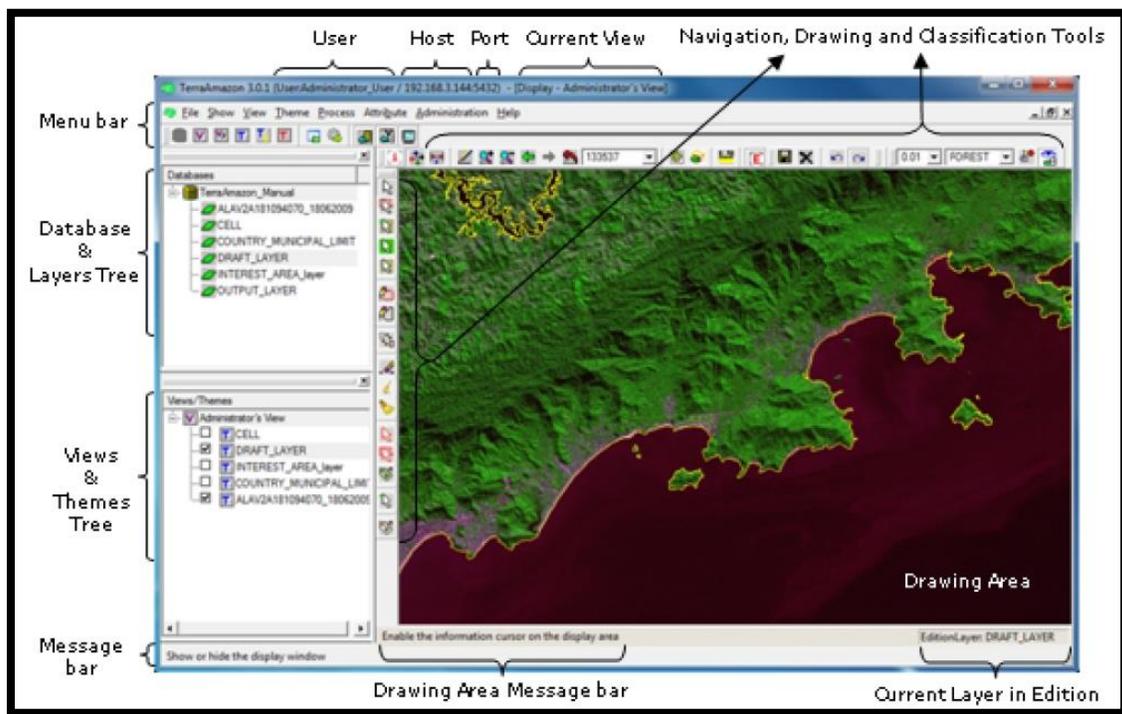


Figura 4.6. Interface principal del sistema TerraAmazon. Fuente:

(http://terraamazon.org/images/DocumentacaoTerraAmazon/TerraAmazon_User_Guide_Administrator.pdf)

Asimismo, se utilizó el SIG ArcGis, el cual es un programa que agrupa varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Su estructura principal está compuesta por el ArcCatalog, ArcMap, ArcToolbox, las cuales tienen sus funciones particulares para la realización de un SIG.

4.5.- Criterios cartográficos

De igual manera, como en cualquier proyecto de cartografía, antes de realizar el análisis correspondiente a cualquier fenómeno ambiental, se tienen que establecer algunos criterios cartográficos que permitan garantizar la calidad y el éxito de dicho trabajo. En tal sentido, para este estudio se establecieron los siguientes criterios (Tabla 4.1):

Tabla 4.1. Criterios cartográficos utilizados en la evaluación de la deforestación.

Criterios cartográficos	Descripción
Definición de bosque	De acuerdo con el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases (COMEGEI) ante la UNFCC, México considera Bosque a una superficie mínima de tierras, de 1 ha, con una cobertura de copa que excede a un 30% y con árboles de altura mínima 4 metros en su madurez. SEMARNAT e INEGI también toman esta definición. Para el presente estudio se incluirán las selvas que cumplan con las condiciones de la definición de Bosque.
Definición de deforestación	Expresada en la Decisión 11/CP.7 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) esta comenta que la deforestación se define como: "la conversión directa, inducida por el hombre de tierras boscosas en tierras no forestales." (UNFCCC, 2001).
Unidad Mínima de Interpretación (UMI)	de Se asumió una (1.44) hectáreas
Sistemas de Coordenadas	Proyección cilíndrica UTM, Datum WGS84. Los parámetros del elipsoide son: semi-eje mayor a = 6378137.0 m, semi-eje menor b = 6356752.3142 m, achatamiento f = 1/298.257223563.
Definición de la Línea Base	El 1990 como año 0 y el año 2014 como el año 1, para la medición de la deforestación.
Leyenda	Para el año 1990 las categorías: Bosque, No bosque y Nubes, mientras que el año 2014, se considerará adicionalmente la categoría Deforestación, que representa la pérdida de la cobertura boscosa para este periodo evaluado.

CAPÍTULO V

METODOLOGÍA

La presente metodología se enfoca principalmente en obtener, analizar y cartografiar la deforestación mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite, empleando técnicas de Percepción Remota, Sistema de Información Geográfica y consulta a expertos en la temática forestal (ver figura 5.1), a partir de cuatro etapas principales que consisten en: a) la identificación y delineación de las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado de Sinaloa, b) la caracterización de las áreas *hot spot* de deforestación, mediante consulta a expertos, c) la elaboración de la cartografía del año 0 (1990) y año 1 (2014) a través de un procesamiento híbrido de las imágenes satelitales en el área *hot spot* identificada como la más crítica, d) validación de los resultados obtenidos de la clasificación de los mapas del año 0 (1990) y año 1 (2014) a través de métodos estadísticos.

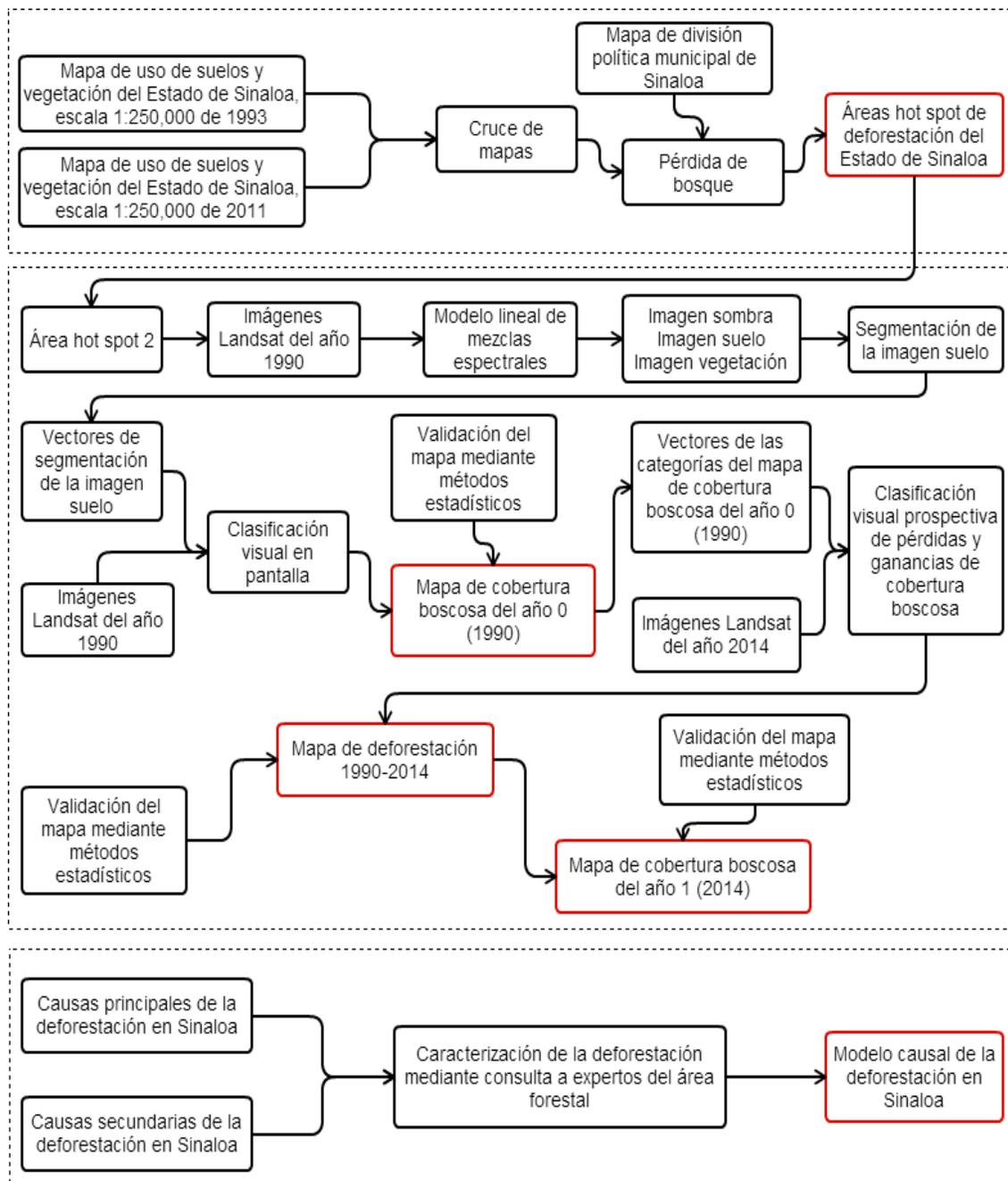


Figura 5.1. Esquema metodológico

5.1.- Identificación y delineación de las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado de Sinaloa mediante consulta a expertos

Primeramente para identificar y delinear las áreas *hot spot* de deforestación del Estado de Sinaloa, se utilizaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación de los años 1993 y 2011,

obtenidos a través del INE y del INEGI, respectivamente. Las leyendas de estos mapas se homogeneizaron en bosque (categorías de bosques y selvas) y no bosque (todas las demás categorías). Posteriormente, se aplicó como técnica de detección de cambio, a la diferencia entre mapas, para obtener las áreas de pérdida de superficie forestal en el periodo considerado (Pacheco *et al.*, 2014). Partiendo de esto fue posible delinear las áreas *hot spot* considerando la cartografía de pérdida de cobertura boscosa, y la cartografía de la división política territorial del Estado de Sinaloa.

5.2.- Caracterización de las áreas *hot spot* de deforestación, mediante consulta a expertos.

Para generar la caracterización de las áreas *hot spot* se realizó de manera individual una consulta a algunos expertos forestales y ambientales de diferentes instituciones, tales como: la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (PROFEPA), a la Dirección Forestal de Gobierno del Estado de Sinaloa, del Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación, de la Universidad Autónoma del Estado de México, de la Universidad Autónoma de Sinaloa. A estos expertos se les aplicó una encuesta diseñada en función de los elementos causales de la deforestación de los países del cinturón tropical (Geist y Lambin, 2001). Estos elementos causales se adaptaron a las condiciones propias del estado de Sinaloa, luego fueron identificados con los expertos mediante las encuestas y posteriormente se les analizó, todo acorde con el periodo de tiempo y los espacios geográficos determinados.

Los elementos causales de deforestación que se adaptaron e identificaron, se dividieron en dos grandes grupos: primero, el denominado causas directas, que generan de manera inmediata los procesos de deforestación, por ejemplo la expansión agrícola, la extensión de infraestructuras, la explotación maderera, la explotación minera y la presencia de conflictos sociales. Estas causas directas son motivadas por un segundo grupo de causas denominado subyacentes o indirectas, estas involucran los factores: demográficos, económicos, tecnológicos, políticos, institucionales y culturales. La identificación de cada uno de estos elementos, a su vez se subdivide en función de las actividades que se desarrollen en el área de estudio.

Luego se contabilizaron las frecuencias de los elementos causales y de su subdivisión, en función de la aparición de los mismos, al realizar la identificación por los expertos. Esto permitió conocer porcentualmente la influencia de cada uno de estos elementos dentro del proceso de deforestación en el Estado de Sinaloa.

Estas frecuencias, fueron expresadas porcentualmente de acuerdo a su presencia sobre el total de veces que se observó. Permitiendo realizar un análisis individual de cada una de las causas principales y secundarias, para determinar de acuerdo a su porcentaje, la influencia en los procesos de deforestación.

De igual manera, en función de estos porcentajes se realizó un análisis para establecer la relación de las causas subyacentes sobre las causas principales y viceversa.

5.3.- Elaboración de la cartografía de cobertura boscosa del año 0 (1990), año 1 (2014) y la cartografía de deforestación 1990-2014 a través de las imágenes satelitales en el área *hot spot* identificada como más crítica.

En este orden de ideas, la siguiente etapa fue la elaboración de la cartografía a través de las imágenes satelitales en el área *hot spot* identificada como más crítica, siguiendo una serie de pasos y procedimientos que permitieron alcanzar los objetivos propuestos, principalmente mediante el uso del sistema TerraAmazon, los cuales consisten en:

La importación de las imágenes de satélite al sistema TerraAmazon; en este caso particular se importaron las imágenes de las bandas 3, 4 y 5 de los sensores Landsat5-TM y Landsat7-ETM+, y las bandas 4, 5 y 6 del sensor Landsat8-OLI, con un nivel de corrección L1T, en formato GEOTIFF, con estas bandas se realizaron composiciones a falso color.

Una vez importadas las imágenes y formada las composiciones a falso color, se aplicó un Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME) (Shimabukuro y Smith, 1991), el cual estima la proporción de los componentes suelo, vegetación y sombra para cada pixel, a partir de la respuesta espectral de las bandas de Landsat, dando como resultado imágenes del fragmento suelo, vegetación y sombra (o agua), a través de la ecuación **6.1**:

$$r_i = a * vege_i + b * suelo_i + c * sombra_i + e_i \quad (6.1)$$

donde r_i es la respuesta del pixel en la banda i ; a , b , y c son las proporciones de vegetación, suelo y sombra (o agua), correspondientemente; $vege_i$, $suelo_i$ y $sombra_i$, son las respuestas espectrales de los componentes de vegetación, suelo y sombra (o agua), respectivamente; e_i es el error en la banda i . En el proceso se utilizan las bandas 3 (rojo), 4 (infrarrojo cercano) y 5 (infrarrojo medio) de la imagen Landsat formando un sistema de ecuaciones lineales que se resuelven usando el método de mínimos cuadrados (Shimabukuro y Smith, 1991).

Posteriormente, ya teniendo las tres bandas sintéticas generadas, la que proporciona mayor contraste entre el suelo descubierto y el bosque es la banda del componente suelo. Por lo tanto, esta banda fue utilizada para delinear los bosques mediante un proceso de segmentación que utiliza los valores del proyecto PRODES (Câmara *et al.*, 2006): 8, como criterio mínimo de similitud, bajo el cual dos áreas son consideradas similares y agrupadas en una única región; y 16, como valor de área mínima, bajo el cual dos áreas son consideradas similares y agrupadas en una única región (Bins *et al.*, 1993).

Enseguida se procedió a la interpretación visual, que es el proceso de asignación de cada polígono a las diferentes categorías establecidas. Para ello, se utilizó como fondo la imagen original y sobre esta se interpretaron y clasificaron las categorías, utilizando los archivos vectoriales de segmentación.

5.4.- Validación de cartografía través de métodos estadísticos.

La etapa final de esta metodología consistió en validar los mapas del año 0 (1990), año 1 (2014) y el mapa de deforestación 1990-2014 a través de métodos estadísticos. Una vez generada la cartografía del área *hot spot* más crítica de los años 1990 y 2014, resulta obligado evaluar la calidad del mismo, de cara a comprobar la validez de los productos generados y valorar el grado de acuerdo con la realidad. Este proceso de validación requiere comparar el resultado con una fuente externa, que se considere fiel representante de la realidad presente en el terreno. Como lógicamente no es posible tener toda esa información para toda el área de estudio, el proceso de validación requiere aplicar técnicas de muestreos, que nos permitan

estimar, con la mayor precisión, el menor tiempo y coste posible, el error que contiene el resultado (Chuvienco, 2008).

En este punto se siguió las sugerencia de los científicos, quienes recomiendan utilizar expertos externos, para seleccionar aleatoriamente los puntos de evaluación en cada categoría y en base a las mismas imágenes que fueron utilizadas para la elaboración de los mapas (Congalton y Green, 2009). Para este caso los expertos externos seleccionaron 100 puntos muestras para cada categoría de cada mapa, el doble de lo recomendado por Congalton (1988).

Con estas muestras de verdad-terreno, se cuantificó la exactitud de cada mapa, mediante el cálculo de la matriz de confusión, a partir de la cual se obtuvieron los errores de omisión, comisión y de precisión global (Congalton y Green, 2009). Asimismo, se obtuvo el estadístico K (Cohen, 1960) para medir la precisión o acuerdo basado en la diferencia entre el error de la matriz y acuerdo en los cambios (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986), mediante la ecuación **6.2**:

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^n X_{i+} X_{+i}} \quad (6.2)$$

donde, n es el número total de casos, X_{ii} se refiere al acuerdo observado y el producto de los marginales (X_{i+} , X_{+i}) el acuerdo esperado en cada categoría.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

Los resultados de la identificación, delineación, evaluación y caracterización del área *hot spot* de deforestación más crítica que se obtuvieron en este trabajo de investigación se presentan conforme se planteó en el apartado correspondiente a la metodología.

6.1.- Identificación y delineación de las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado de Sinaloa

Según la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación (USyV) a escala 1:250,000.00 del INE, en el año de 1993 el Estado de Sinaloa poseía una superficie de 30 377.26 km² de cobertura de bosques y selvas, esto representó el 52.95% del territorio del Estado (Figura 6.1(a)). Mientras que para el año 2011, en estas mismas coberturas en la cartografía de USyV del INEGI a la misma escala, se reportó una superficie 28 100.08 km², lo que representó el 48.98% (Figura 6.1(b)).

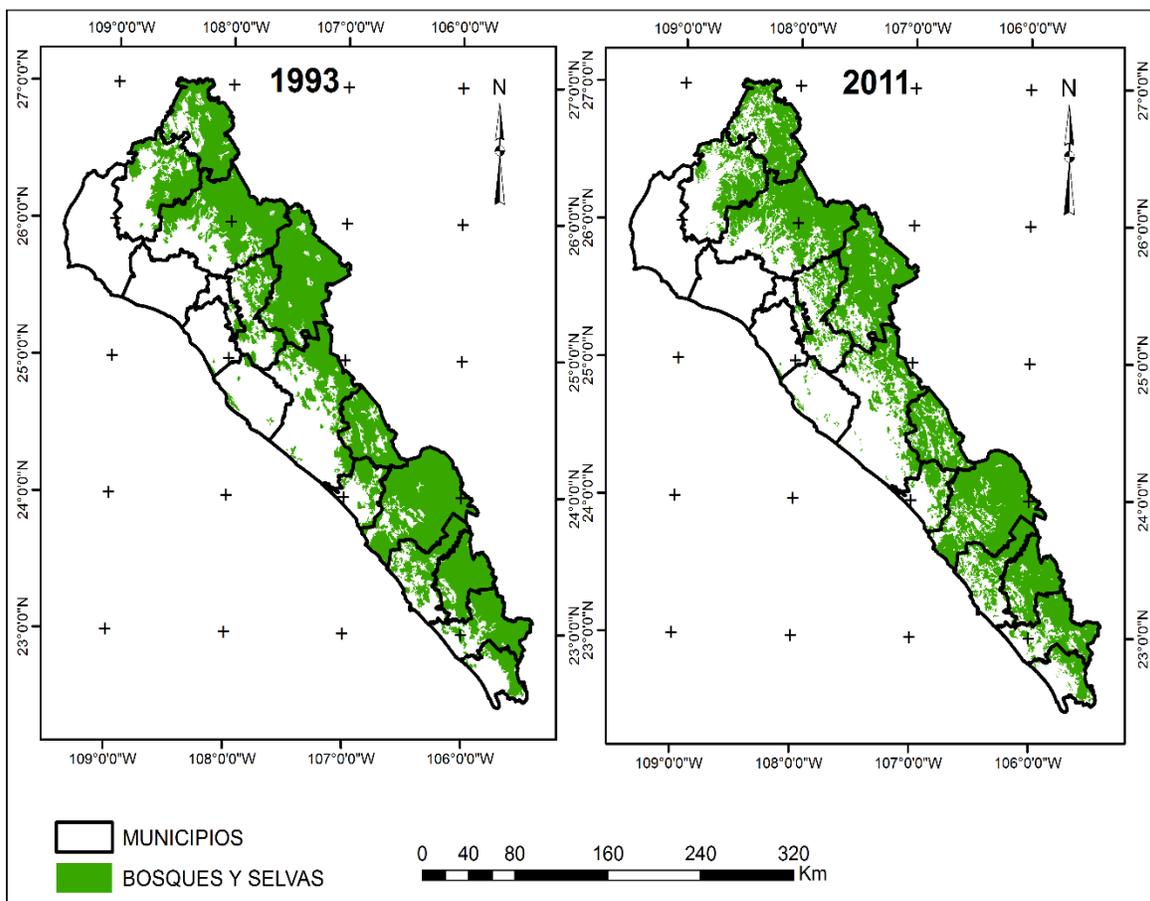


Figura 6.1. Cartografía de Bosques y selvas de los años 1993(a) y 2011(b).

La diferencia de los mapas de la cobertura de bosques y selvas de los años de 1993 y 2011 arrojó una pérdida neta de estas coberturas de 2,277.17 km² y una deforestación de 3, 257.23 km², igual al 5.67% del territorio del Estado de Sinaloa y correspondiente al 10.72% de la superficie inicial de dichas categorías (Figura 6.2).

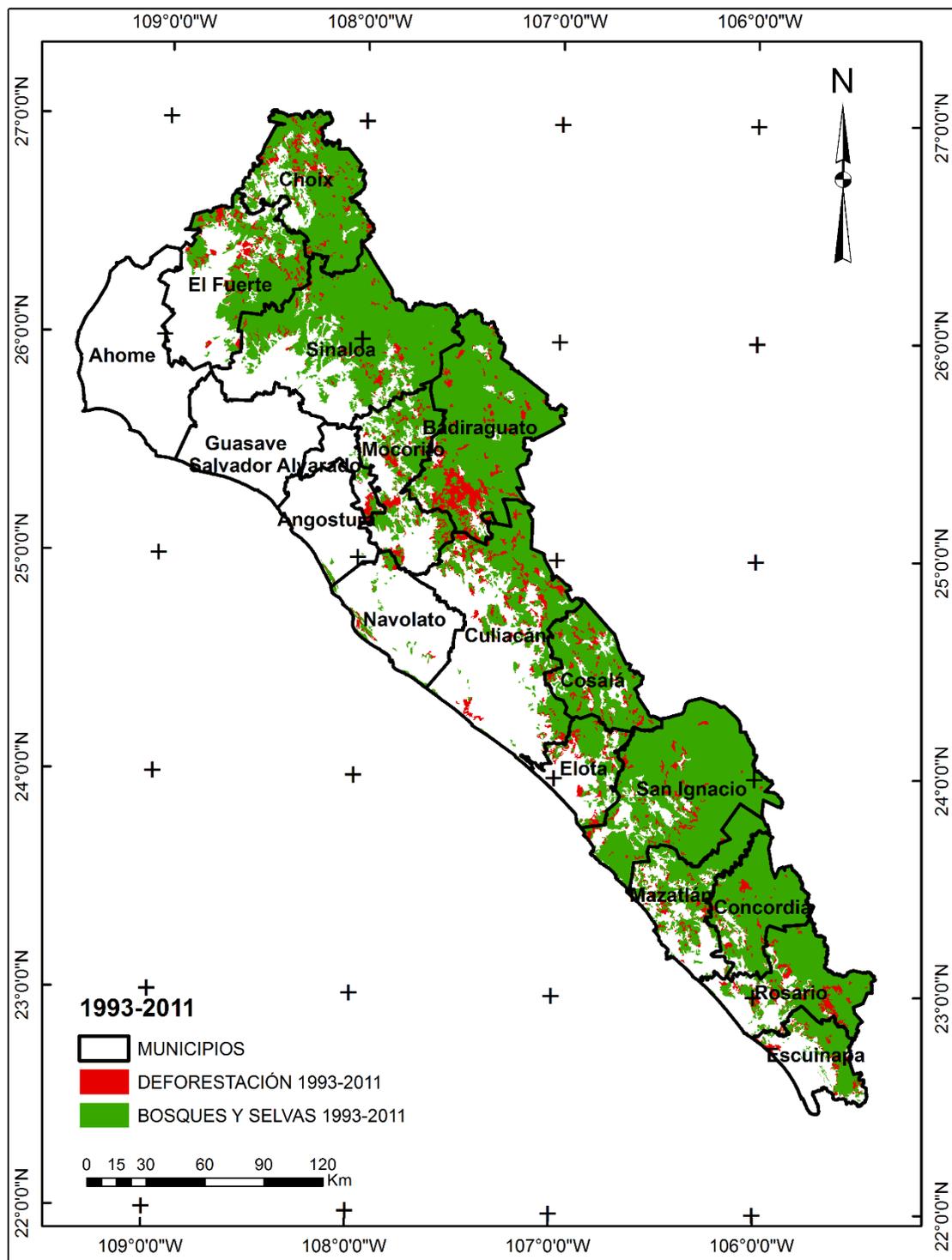


Figura 6.2. Cartografía de pérdida de cobertura Bosques y Selvas 1993-2011.

Cabe destacar que la cartografía de USyV de ambas fechas (1993 y 2011) está representada a escala 1:250,000, lo que significa que para llegar a esta escala hubo un proceso de

generalización cartográfica que disminuyó la precisión de los polígonos que representaron los bosques, trayendo como consecuencia sobreestimación o subestimación de la pérdida de cobertura boscosa derivada de estas cartografías.

Por esta razón, los resultados de la pérdida de cobertura boscosa, que se presentan a continuación son aproximaciones, ya que según los expertos, la cartografía que se debe emplear para el monitoreo de las deforestación debe estar entre las escalas 1:25,000 y 1:50,000 (Chuvieco, 2008), es decir, cuando se utilizan datos de los sensores óptico electrónicos las resoluciones espaciales deben oscilar entre 10 y 60 metros (GOF-C-GOLD, 2013).

Tomando en consideración lo antes mencionado, se identificaron y delinearon cuatro áreas *hot spot* de deforestación, las cuales servirán solamente para ubicar y analizar de manera porcentual cuáles son las áreas que han sufrido mayor pérdida de cobertura boscosa y posteriormente realizar el monitoreo de la deforestación con mayor precisión, utilizando imágenes Landsat con una resolución espacial de 30 metros.

De esta manera se identificaron cuatro áreas *hot spot* a lo largo del Estado de Sinaloa (Figura 6.3).

- El área 1 está en la parte Norte del Estado y comprende los municipios de Choix, El Fuerte y Sinaloa de Leyva.
- El área 2 está en la parte Centro-Norte del Estado y comprende los municipios de Culiacán, Badiraguato, Mocorito y Salvador Alvarado.
- El área 3 comprende los municipios de San Ignacio, Cosalá y Cruz de Elota, los cuales están en la parte Centro-Sur del Estado de Sinaloa.
- El área 4 está en la parte Sur del Estado y comprende los municipios de Mazatlán, Concordia, El Rosario y Escuinapa.

Con respecto a la identificación y delimitación de las áreas *hot spot*, se muestra que estas oscilan entre 11,399.81 Km² y 7,787.62 Km² de superficie, las mismas que presentan una cobertura boscosa en orden, siendo el área número 1, la que tiene mayor cobertura boscosa, seguida del área 2,3 y 4, así como también se encontró que el área número 2, es la que presenta la mayor pérdida de cobertura de bosques, con una tasa media anual de deforestación de **0.80%**, lo que representa **1296.40 km²** en 18 años. Las áreas *hot spot* 4, 3 y 1 presentan

una tasa anual de deforestación de **0.52%**, **0.41%** y **0.44%**, respectivamente (Tabla 6.1). De igual manera se puede señalar que el área *hot spot* número 1, es la que presenta mayor cobertura boscosa y fue la que presentó menor pérdida de la misma.

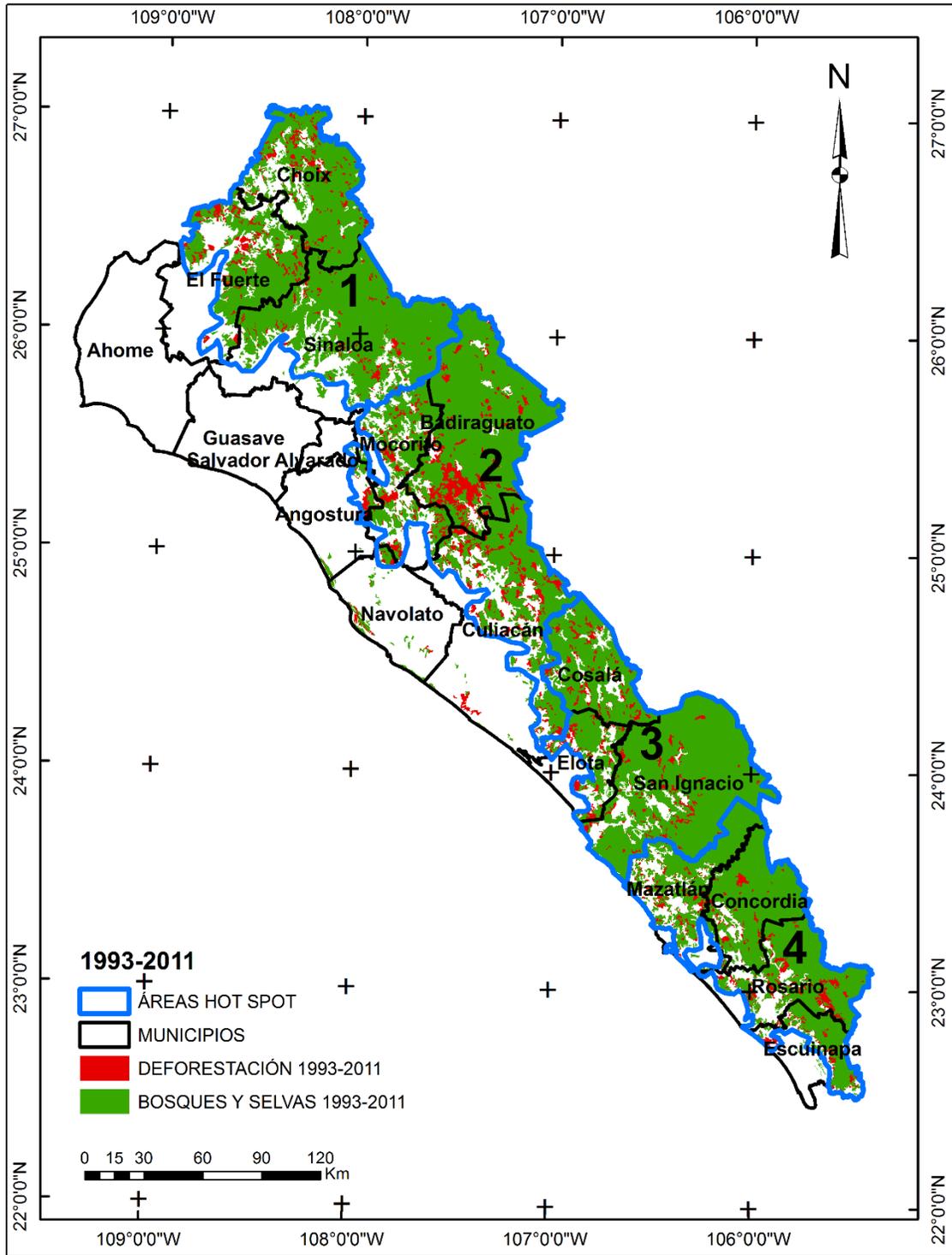


Figura 6.3. Áreas *hot spot* de deforestación

Tabla 6.1. Pérdida de cobertura boscosa 1993-2011

Área “hot spot”	Municipios	Superficie (km ²)	Bosques 1993 (km ²)	Bosques 2011 (km ²)	Pérdida (km ²)	Tasa media anual de deforestación (%)
1	Choix El Fuerte Sinaloa de Leyva	11,399.81	8,491.03	8118.46	725.78	0.44
2	Culiacán Badiraguato Mocorito Salvador Alvarado	11,127.77	8,457.71	7,374.31	1296.40	0.80
3	Cruz de Eloba Cosalá San Ignacio	8385.03	7,259.19	6,797.69	568.35	0.41
4	El Rosario Concordia Escuinapa Mazatlán	7787.62	5,955.42	5,568.89	599.03	0.52

6.2.- Caracterización de las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado de Sinaloa mediante la consulta a expertos.

El resultado de las encuestas a diferentes expertos en el área forestal permitió cuantificar y analizar porcentualmente las causas que provocan los procesos de pérdida forestal de acuerdo a su presencia, resultando un análisis individual de las causas principales, secundarias y de la interacción entre ellas.

6.2.1.- Causas principales

De acuerdo a los resultados estadísticos de las encuestas, la principal causa de la transformación de tierras forestales a tierras no forestales, es la expansión agrícola con un 49.4% de influencia en el Estado de Sinaloa (Figura 6.4), de la cual el 35.36% se debe a

cultivos permanentes, el 31.6% a la cría de ganado, el 25.16% a la agricultura migratoria y por último, la colonización con un 7.88% (Figura 6.5).

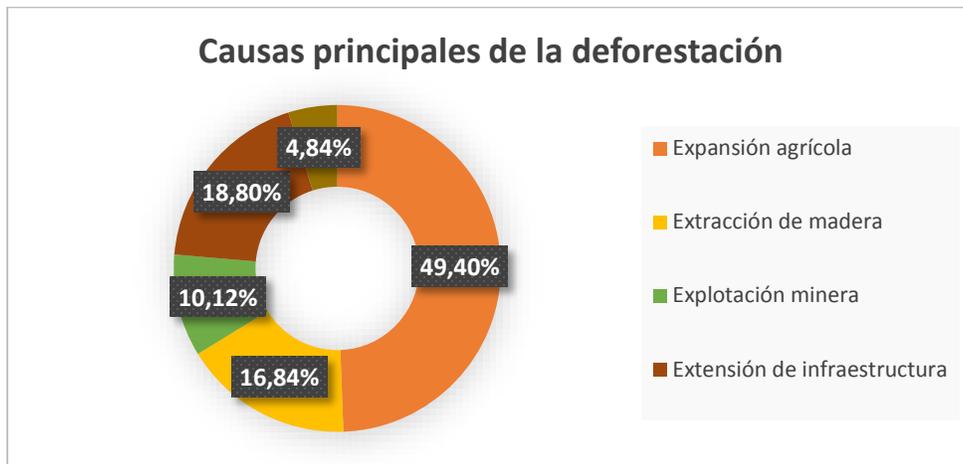


Figura 6.4. Frecuencias porcentuales de las causas principales de deforestación en el Estado de Sinaloa.

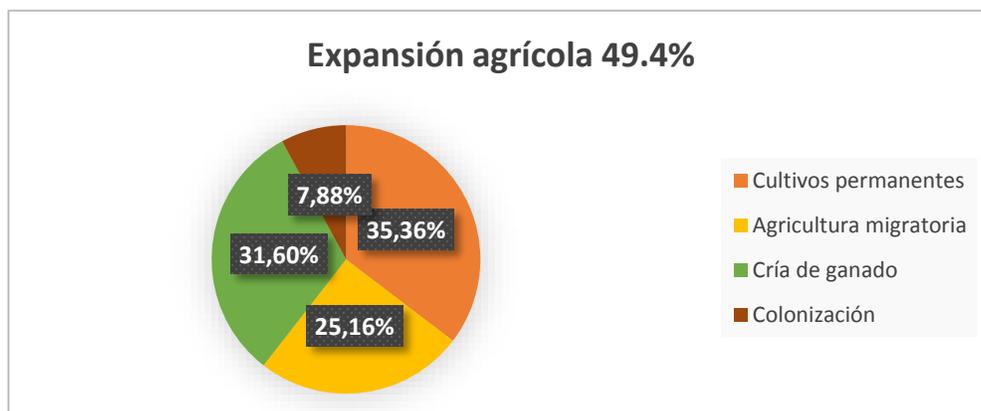


Figura 6.5. Expansión agrícola.

Por su parte, la extensión de infraestructura presentó un 18.8% (Figura 6.4), siendo la segunda causa principal con mayor impacto. A su vez, esta misma se desglosa en el 38.4% de extensión de infraestructura de transporte, seguida de la extensión de asentamientos con un 29.4% y por último 32.20% debido a la extensión de infraestructura de servicios públicos (Figura 6.6).

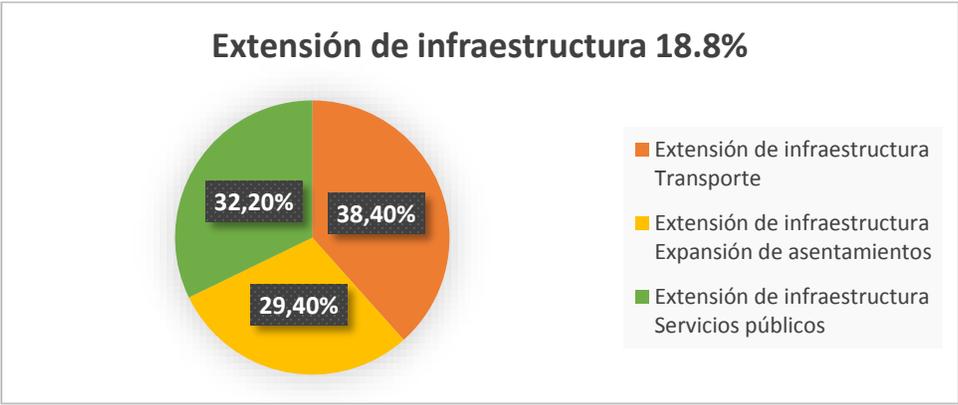


Figura 6.6. Extensión de infraestructura.

Al respecto, la extracción de madera cuenta con una presencia de un 16.84% en el Estado, siendo para uso comercial la más usual con un 63.20% (Figura 6.7).



Figura 6.7. Extracción de madera.

Por su parte, la explotación minera es representada con un 10.12% en Sinaloa, misma que se divide en el 65.80% de minería metálica y 34.20% de minería no metálica (Figura 6.8).



Figura 6.8. Explotación minera.

Por último, la causa principal con menor presencia en el estado, son los desencadenamientos de eventos sociales con un 4.84%, donde el narcotráfico es la principal, presente con el 49.6% (Figura 6.9).

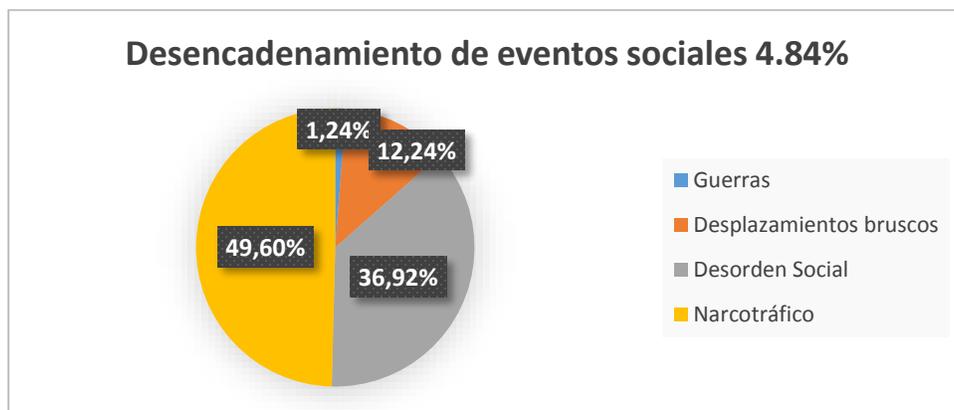


Figura 6.9. Desencadenamiento de eventos sociales.

6.2.2.- Causas secundarias

De estas evidencias, la causa secundaria que más ha impulsado a la deforestación de acuerdo con las encuestas realizadas es el factor demográfico con un 29.40% (Figura 6.10), del cual el 54.0% se debe al incremento poblacional, seguido del incremento natural con un 24.6% y un 21.4% ocasionado por las migraciones (Figura 6.11).

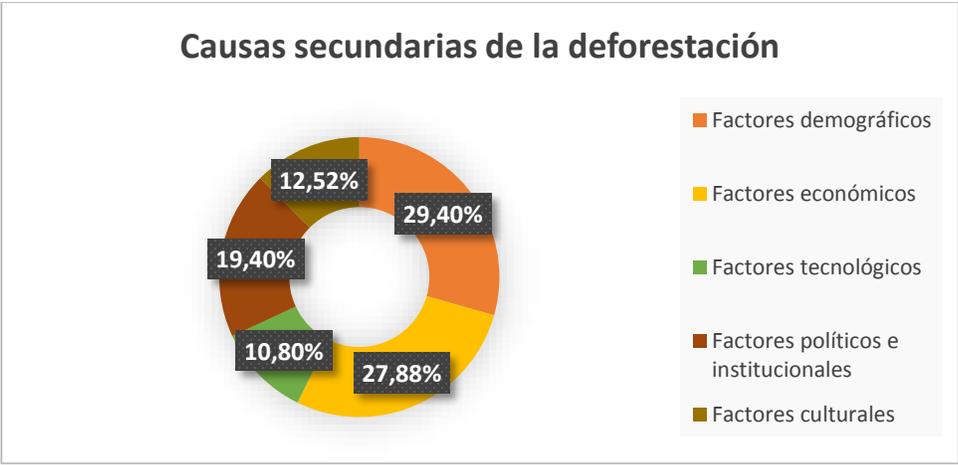


Figura 6.10. Frecuencias porcentuales de las causas secundarias de deforestación en el Estado de Sinaloa.

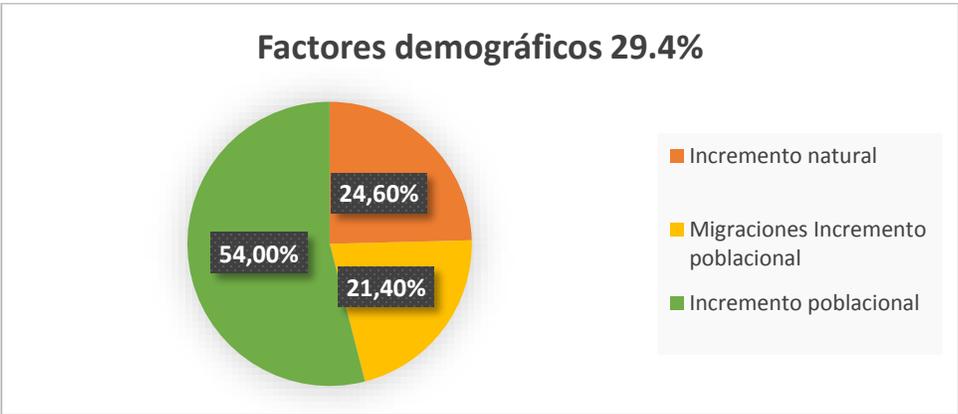


Figura 6.11. Factores demográficos.

En orden descendente la causa secundaria seguida de los factores demográficos, son los factores económicos representados con un 27.88%, mismo que se parte en el 39.6% debido al crecimiento del mercado y comercialización, seguido de la estructura económica y la urbanización e industrias con un 37.08% y 23.32%, respectivamente (Figura 6.12).

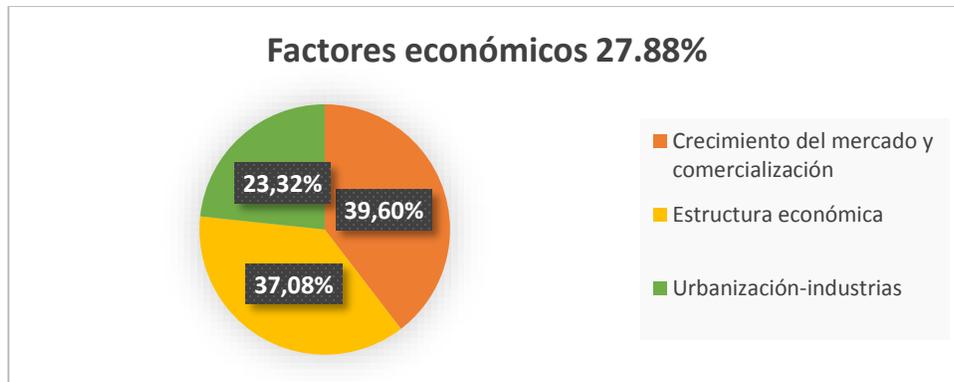


Figura 6.12. Factores económicos.

Mientras tanto, los factores políticos e institucionales son los responsables de 19.4% de los procesos de deforestación en el Estado, del cual el 42%, el 34.20% y el 23.80% corresponden mutuamente al clima político, al derecho de la propiedad y a las políticas formales (Figura 6.13).

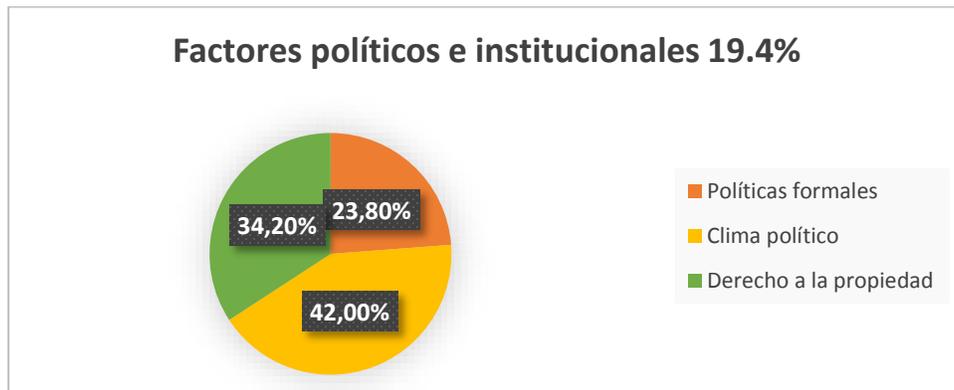


Figura 6.13. Factores políticos e institucionales.

Al mismo tiempo, los factores culturales representan el 12.52% de los procesos de pérdida de cobertura forestal, de los cuales el 61.20% corresponde a la actitud pública, valores y creencias, y el 38.80% concierne al comportamiento familiar e individual (Figura 6.14).

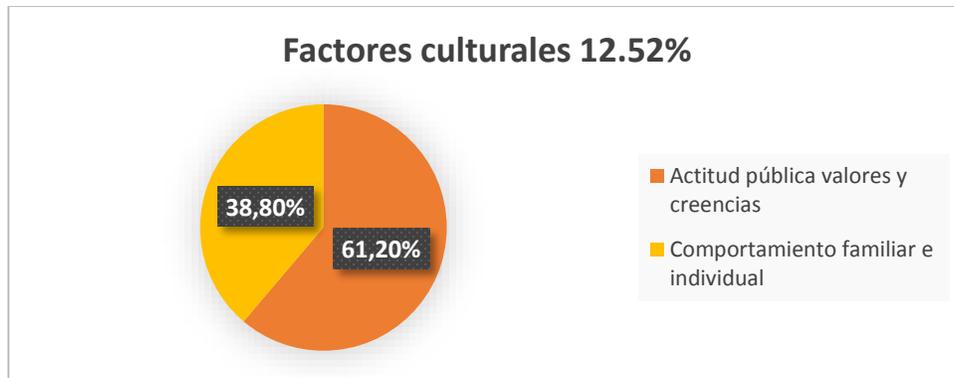


Figura 6.14. Factores culturales.

Por último, el 10.80% de las causas secundarias se debe a los factores tecnológicos, desglosándose en obras estructurales, el factor de producción agrícola y cambios de agro-técnicas, en 40.60%, 33.60% y 25.80%, respectivamente (Figura 6.15).

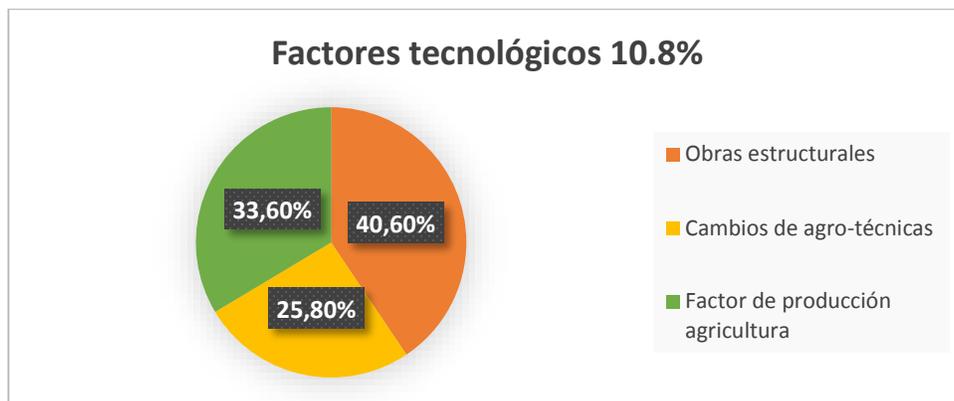


Figura 6.15. Factores tecnológicos.

6.2.3.- Interrelación entre las causas principales y secundarias de deforestación

Esta parte trata de identificar cuál es la dinámica y la relación que existe entre los causantes de los procesos de transformación de tierras forestales a tierras no forestales. En la figura 6.16 se observa la relación porcentual que existe entre las causas principales y secundarias, dando como resultado un sistema, el cual es el que conduce a la deforestación en el Estado

de Sinaloa, de igual manera también se observa que más de una causa secundaria influye en una causa principal y viceversa.

Como ejemplo de este sistema podemos deducir que la causa principal con mayor influencia en los procesos de deforestación es la expansión agrícola en el Estado de Sinaloa, con un 49.40%, la cual es influenciada por un 33.33% de factores demográficos, un 28.57% de factores económicos, un 19.04% de factores políticos e institucionales, un 7.14% de factores culturales y un 11.90% de factores tecnológicos. Así mismo de manera inversa la causa secundaria con mayor presencia en la conversión de la cobertura boscosa son los factores demográficos con un 29.40% de presencia en el Estado; a su vez esta causa es impulsada por la expansión agrícola con un 37.83%, igualmente con un 8.10% de extracción de madera y con un 2.70%, 35.13%, 16.21%, con la explotación minera, extensión de infraestructura, y desencadenamiento de eventos sociales, respectivamente.

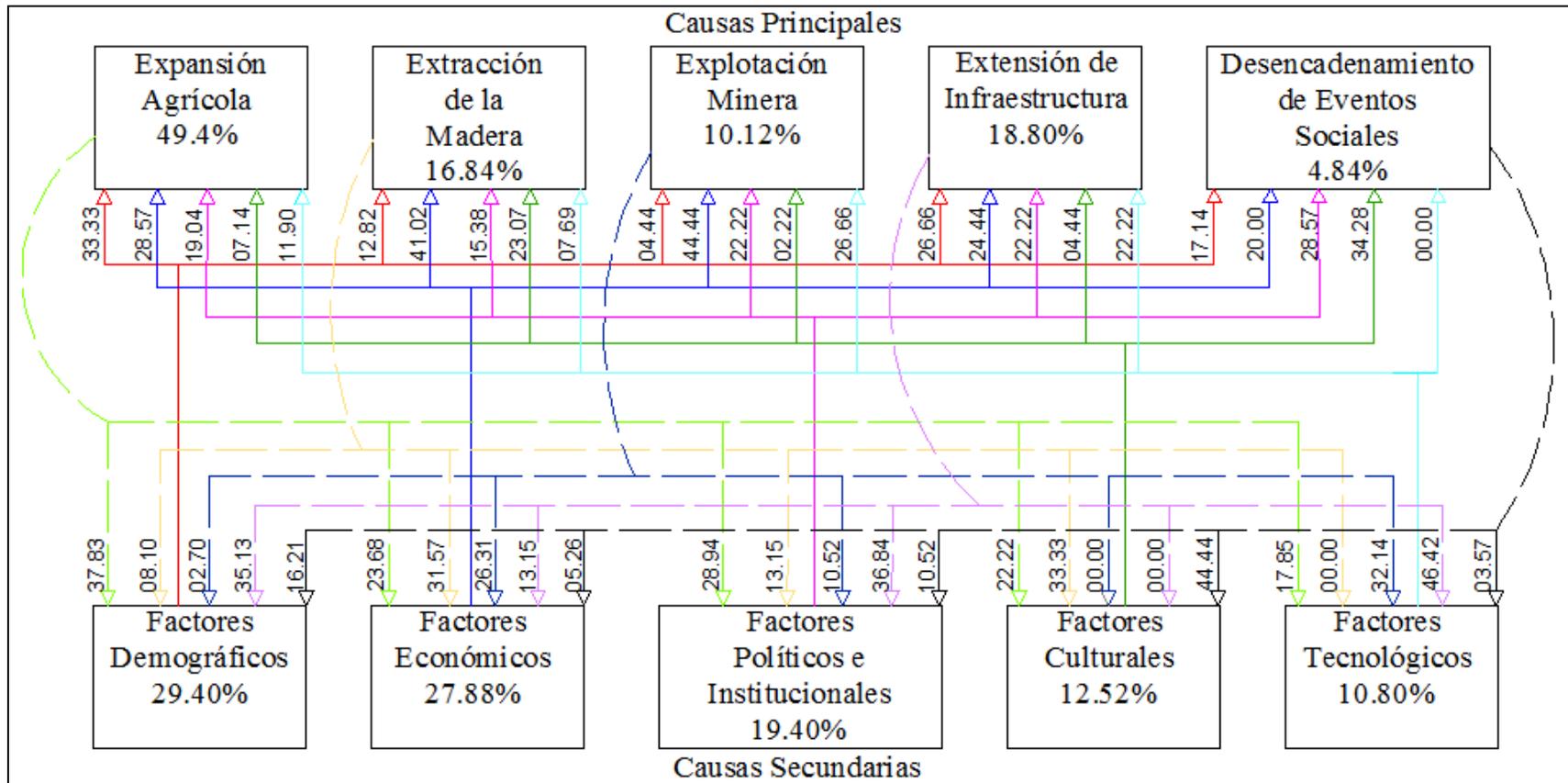


Figura 6.16. Interrelación entre las causas principales y secundarias de deforestación (adaptado de Geist y Lambin, 2002; Pacheco *et al.*, 2011).

6.3.- Elaboración de la cartografía de cobertura boscosa del año 0 (1990), año 1 (2014) y cartografía de deforestación 1990-2014 a través de imágenes satelitales en el área *hot spot* identificada como más crítica.

Para la elaboración de la cartografía del año 0 (1990), año 1 (2014) y cartografía de deforestación 1990-2014 del área *hot spot* más crítica, se empleó el Sistema de Monitoreo de la Deforestación del Amazonas (TerraAmazon) (INPE-FUNCATE, 2010).

Una vez configurado el sistema TerraAmazon para interpretar y editar el año 0 se creó una composición a falso color con RGB 453 (Figura 6.17), y se aplicó la técnica del Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (Shimabukuro y Smith, 1991), la cual estima la proporción de los componentes suelo, vegetación y sombra para cada pixel, a partir de la respuesta espectral de las bandas de Landsat, dando como resultado imágenes del fragmento suelo, vegetación y sombra (o agua) (Figuras 6.18, 6.19, 6.20).

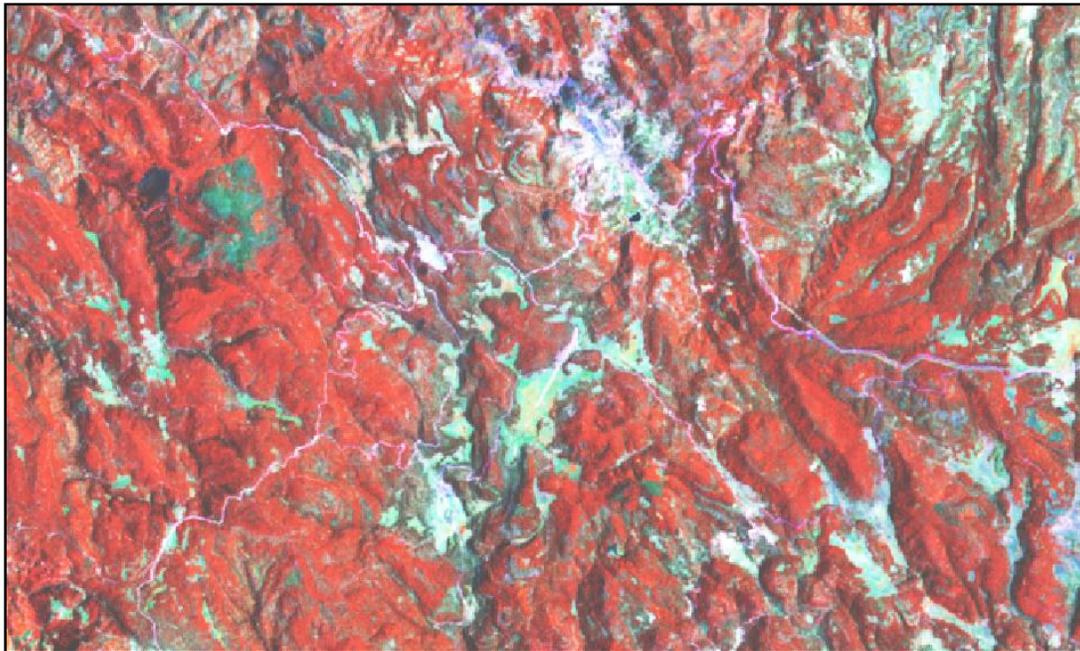


Figura 6.17. Composición falso color RGB 453.

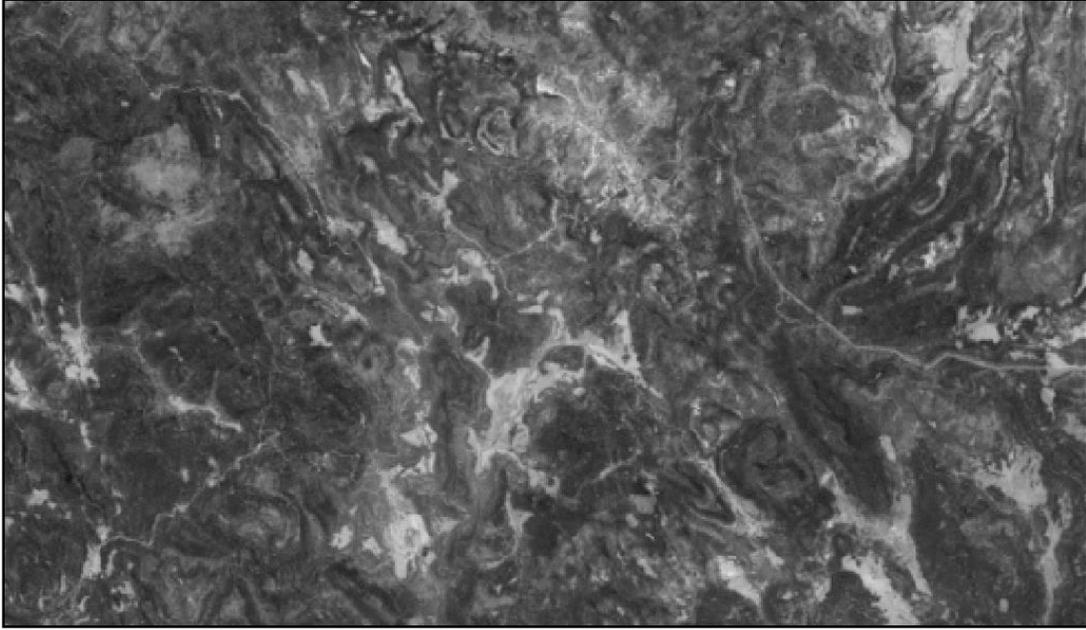


Figura 6.18. Imagen fragmento suelo.

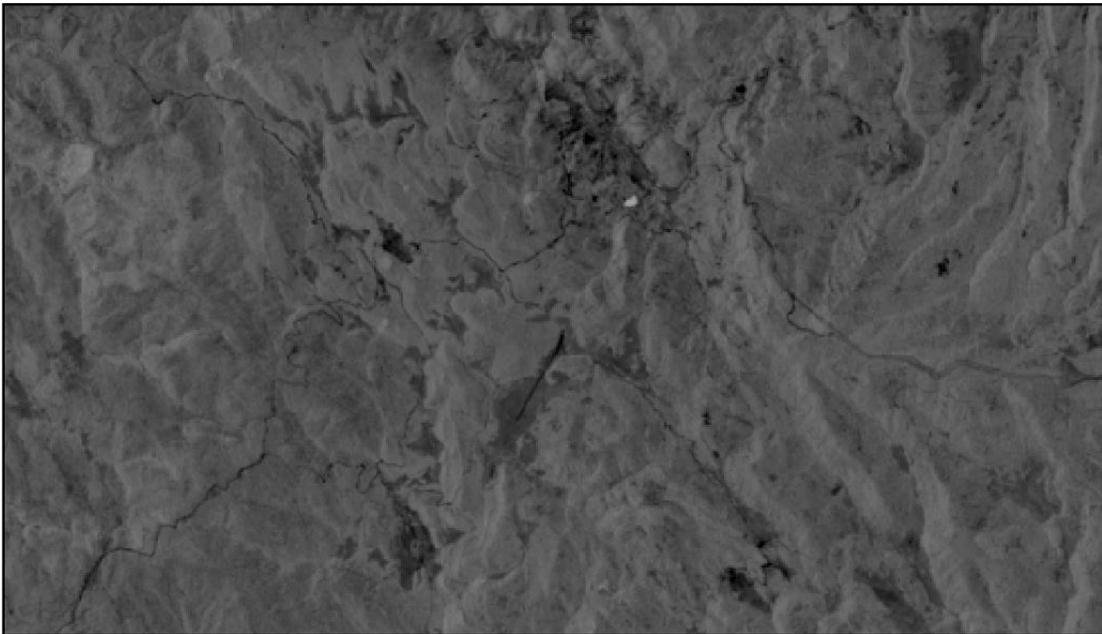


Figura 6.19. Imagen fragmento sombra.

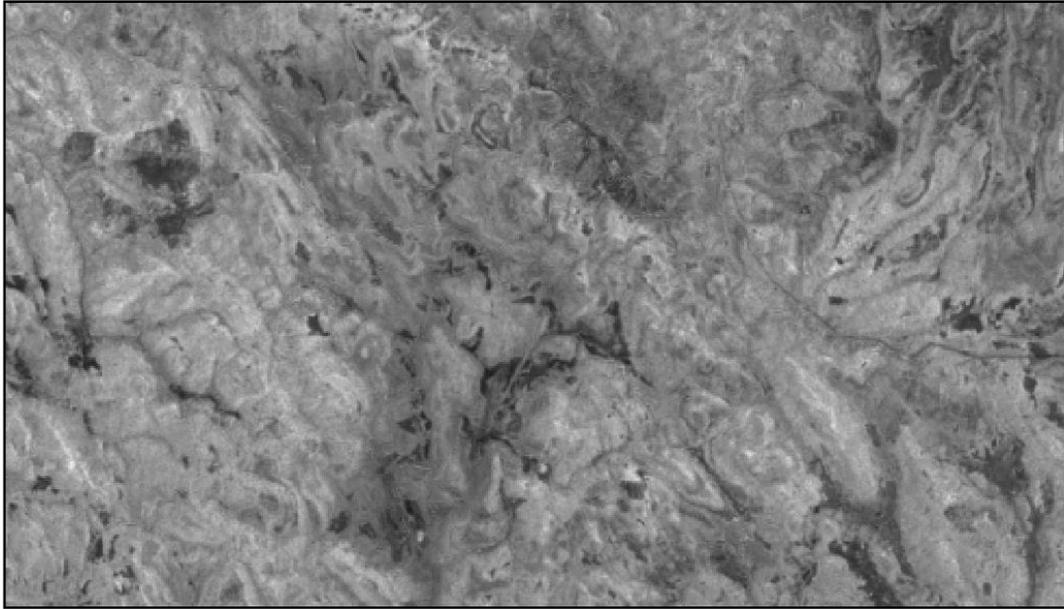


Figura 6.20. Imagen fragmento vegetación.

Posteriormente, se segmentó el componente suelo, ya que es el que proporciona mayor contraste entre el suelo descubierto y el bosque, a partir del cual se obtuvo una imagen segmentada (Figura 6.21) que permitió el proceso de interpretación y clasificación visual y obtener la cartografía de cobertura boscosa del año 0 (1990) con las categorías de Bosque y No-Bosque (Figura 6.23)

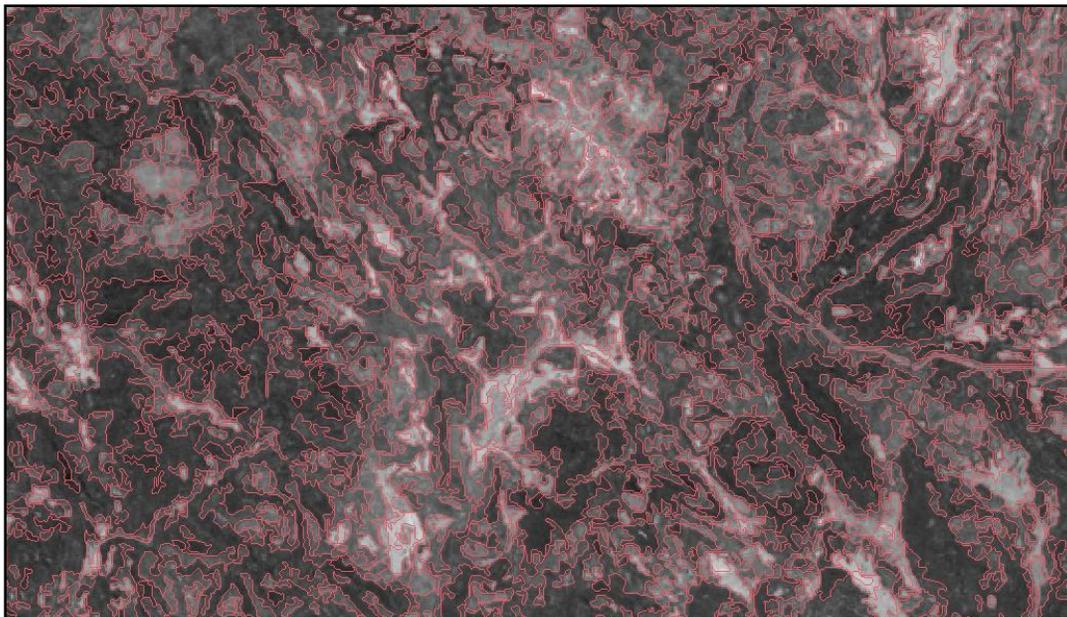


Figura 6.21. Segmentación de la imagen fragmento suelo.

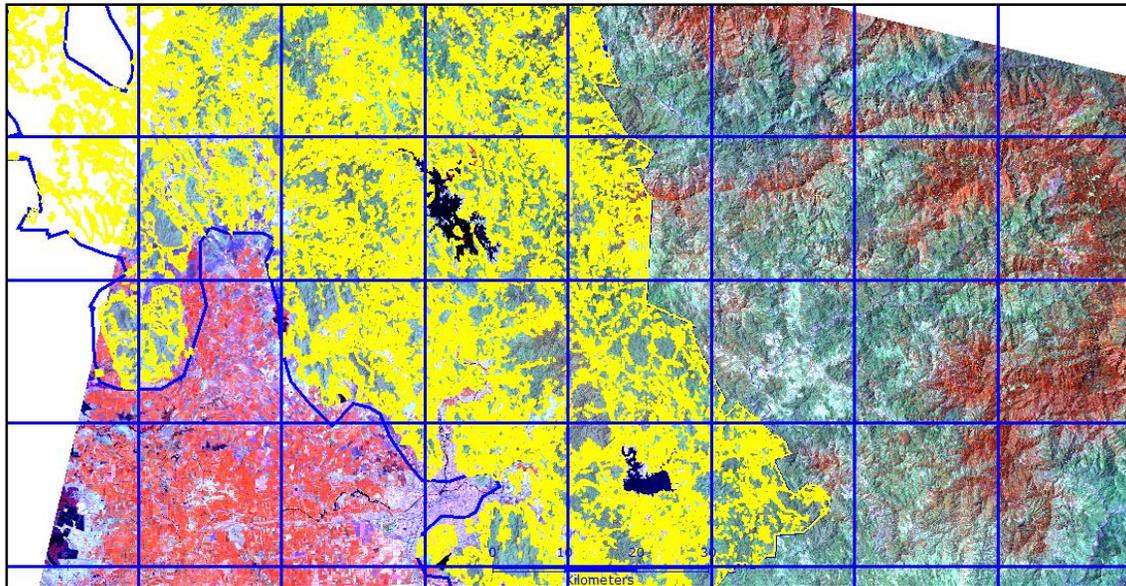


Figura 6.22. Interpretación y clasificación visual.

Una vez generada la cartografía del año 0 (1990) (Figura 6.23), se procedió a determinar la cartografía de deforestación y la del año 1 (2014). Donde primeramente, con base en los vectores de Bosque del año 0 se procedió a interpretar visualmente sobre las imágenes del año 1 la deforestación, y con base al vector de No-Bosque la Ganancia. De esta manera se obtuvo la cartografía de deforestación 1990-2014 con las categorías de Bosque, No-Bosque, Deforestación y Ganancia Forestal (Figura 6.24). Por último, tomando en cuenta que la categoría de deforestación pertenecen a la categoría de No-Bosque y las ganancias forestales a la categoría Bosque se obtuvo la cartografía de cobertura boscosa del año 1 (2014), solamente con las dos categorías de Bosque y No Bosque (Figura 6.25). Posteriormente a partir de esta cartografía se determinó que en el año 1990 esta área *hot spot 2* contaba con una cobertura de bosques de 7,898.05 Km², mientras que para el año 2014 esta misma presentó una cobertura de 6,759.99Km², dando como resultado una pérdida de 1, 192.99 Km² y una ganancia de 55.05 Km², presentando una tasa media anual de deforestación de 0.60%.

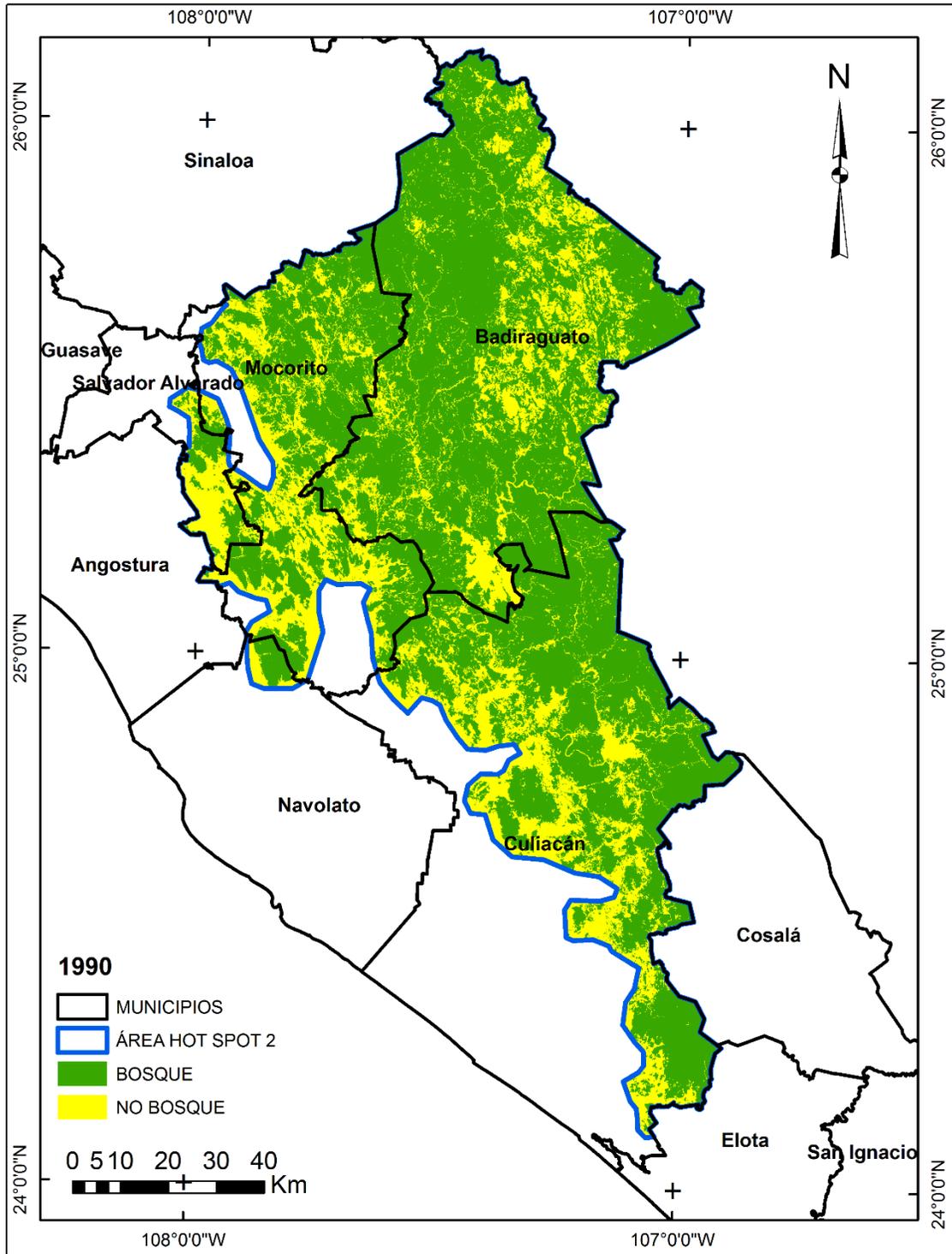


Figura 6.23. Mapa de cobertura boscosa del año 0 (1990).

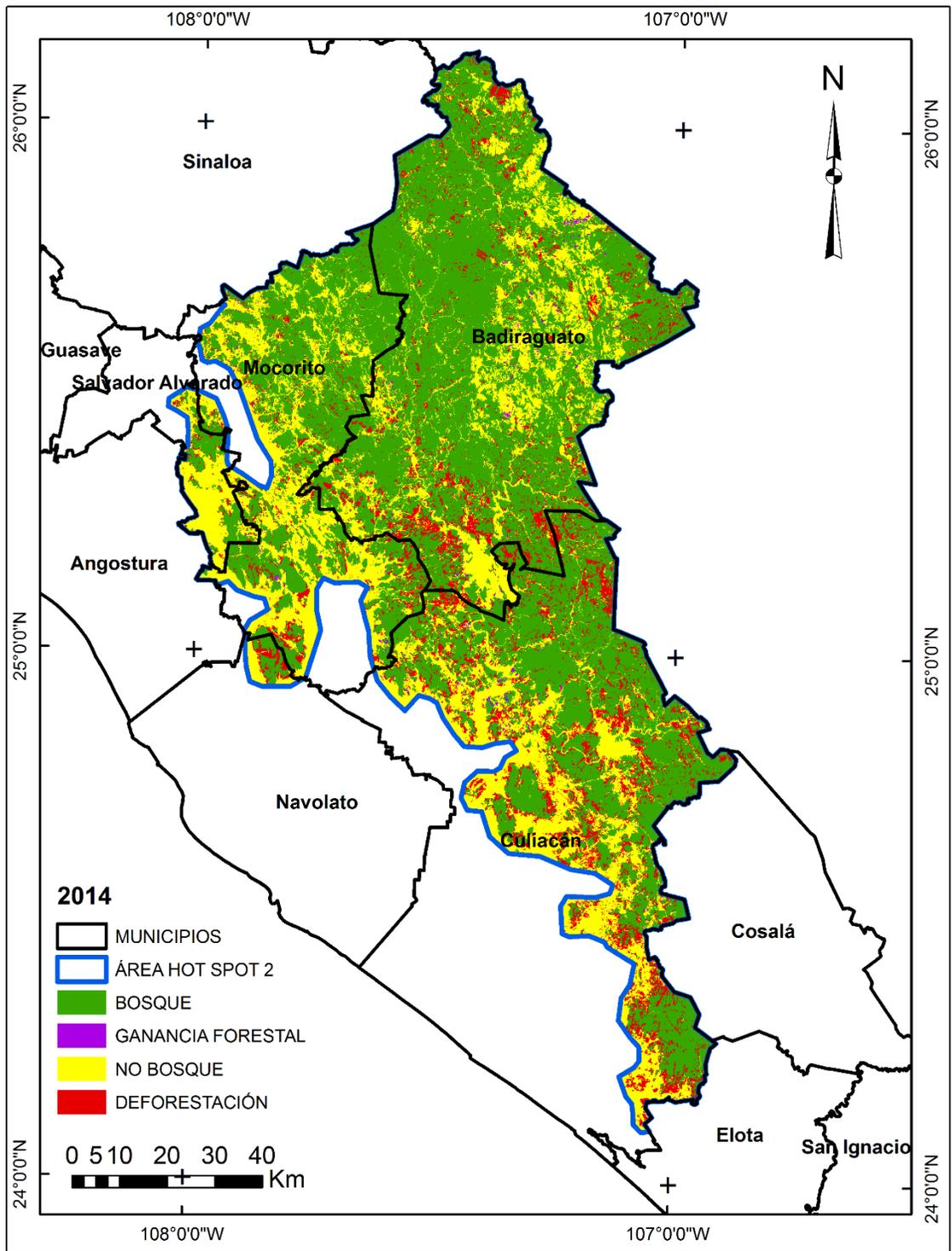


Figura 6.24. Mapa de deforestación 1990-2014.

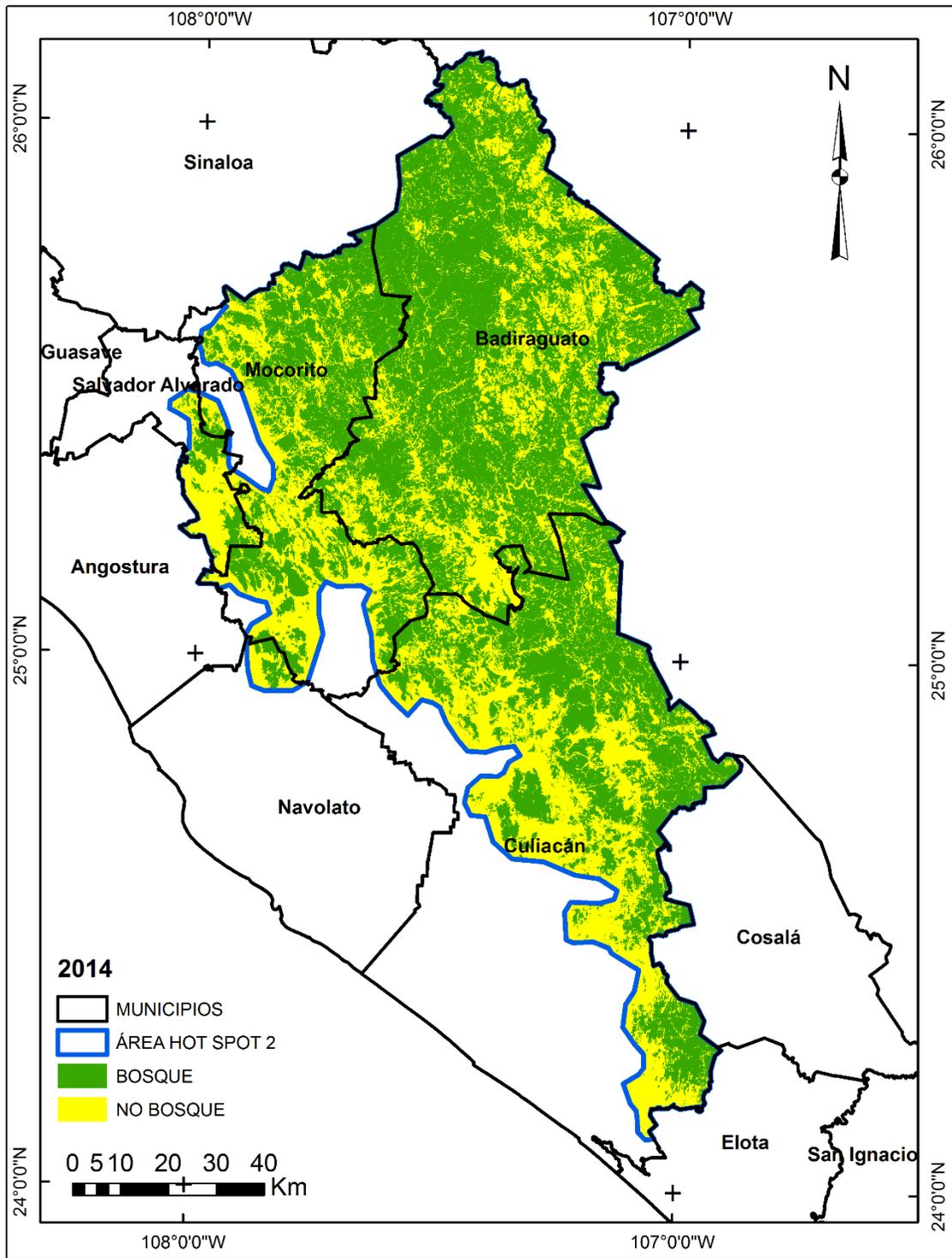


Figura 6.25. Mapa de cobertura boscosa del año 1 (2014).

6.4.- Validación de la cartografía a través de métodos estadísticos

Una vez generada la cartografía de cobertura boscosa de los años 0, 1 y la cartografía de deforestación 1990-2014 del área *hot spot* más crítica, se validaron los mapas para dar robustez a los productos generados y valorar el grado de acuerdo con la realidad. La validación fue realizada por 2 expertos externos en la temática considerando un muestreo aleatorio de 100 puntos muestra por categoría.

Los resultados de las matrices de confusión de los mapas antes mencionados (Figuras 6.23, 6.24 y 6.25) se observan en las tablas 6.2, 6.3 y 6.4 respectivamente. Por ejemplo, en la tabla 6.2 se puede interpretar, que la clase Bosque tuvo un acuerdo del 86.32%, confundiéndose con la clase No Bosque en un 13.68%. Por su parte, la clase no-bosque tuvo acuerdo de 85.15% y una confusión de 14.85% con la clase Bosque.

Tabla 6.2. Matriz de confusión del mapa de cobertura boscosa del año 0 (1990).

	Verdad Terreno %		
	Bosque	No bosque	Total
Bosque	86.32	14.85	49.49
No Bosque	13.68	85.15	50.51
Total	100	100	100

Tabla 6.3. Matriz de confusión del mapa de deforestación 1990-2014.

	Verdad Terreno %		
	Bosque	No bosque	Total
Bosque	89.19	9.91	49.55
No Bosque	10.81	90.09	50.45
Total	100	100	100

Tabla 6.4. Matriz de confusión del mapa de cobertura boscosa del año 1(2014).

	Verdad Terreno %		
	Bosque	No bosque	Total
Bosque	88	14	51
No Bosque	12	86	49

Total	100	100	100
-------	-----	-----	-----

Por otro lado, los resultados de los errores de omisión y comisión se observan en las tablas 6.5, 6.6 y 6.7, por ejemplo en la tabla 6.5 se interpreta que la clase Bosque fue la que obtuvo el mayor error del usuario (comisión) con 15.46%, seguida de la clase No Bosque con 13.13%. Mientras que los errores del productor (omisión) se presentaron con mayor valor en la clase No-Bosque con 14.85%, seguida de la clase de Bosque con 13.68%. En general se puede decir que los errores de comisión oscilan entre el 10% y 15.46% y los de omisión entre 9.91% y 14.85%, para los tres mapas.

Tabla 6.5. Errores de Comisión y Omisión del mapa de cobertura boscosa del año 0 (1990).

Clase	Errores (%)	
	Comisión	Omisión
Bosque	15.46	13.68
No Bosque	13.13	14.85

Tabla 6.6. Errores de Comisión y Omisión del mapa de deforestación 1990-2014.

Clase	Errores (%)	
	Comisión	Omisión
Bosque	10.00	10.81
No Bosque	10.71	9.91

Tabla 6.7. Errores de Comisión y Omisión del mapa de cobertura boscosa del año 1(2014).

Clase	Errores (%)	
	Comisión	Omisión
Bosque	13.73	12
No Bosque	12.24	14

En cuanto a la precisión global de los mapas antes evaluados (Figuras 6.23, 6.24 y 6.25), fue de 85.71%, 89.63% y 87%, valores que están ubicados dentro de los límites establecidos (80 a 95%) por los científicos para diferenciar estas clases y posteriormente evaluar sus cambios

(GOFC-GOLD, 2012). Mientras que los resultados del índice Kappa de cada uno de los mapas fueron de 0.71, 0.79 y 0.74, resultados que se encuentran dentro de lo permisible, ya que sus valores se hallan dentro de la precisión válida que es de 0.61 – 0.80 (Landis y Koch, 1977).

CAPÍTULO VII

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En primera instancia en este trabajo se utilizó información cartográfica oficial del INE y del INEGI a escala 1:250,000, la cual permitió obtener a groso modo la deforestación en Sinaloa, asimismo se identificaron y delinearón las áreas *hot spot* de deforestación en el Estado, a diferencia de otros trabajos (Achard *et al.*, 2006; Pacheco *et al.*, 2014) que se tiene que generar esta cartografía para identificar estas áreas de rápido cambio forestal. Partiendo de esto también se obtuvo que la cartografía oficial no satisface los requerimientos necesarios para estudiar la deforestación a escala local, ya que esta no es la escala adecuada para determinar la deforestación con buena precisión (GOFC-GOLD, 2013; Chuvieco, 2008) y aunado a esto presenta errores de asignación temática y geométrica (Mas *et al.*, 2004).

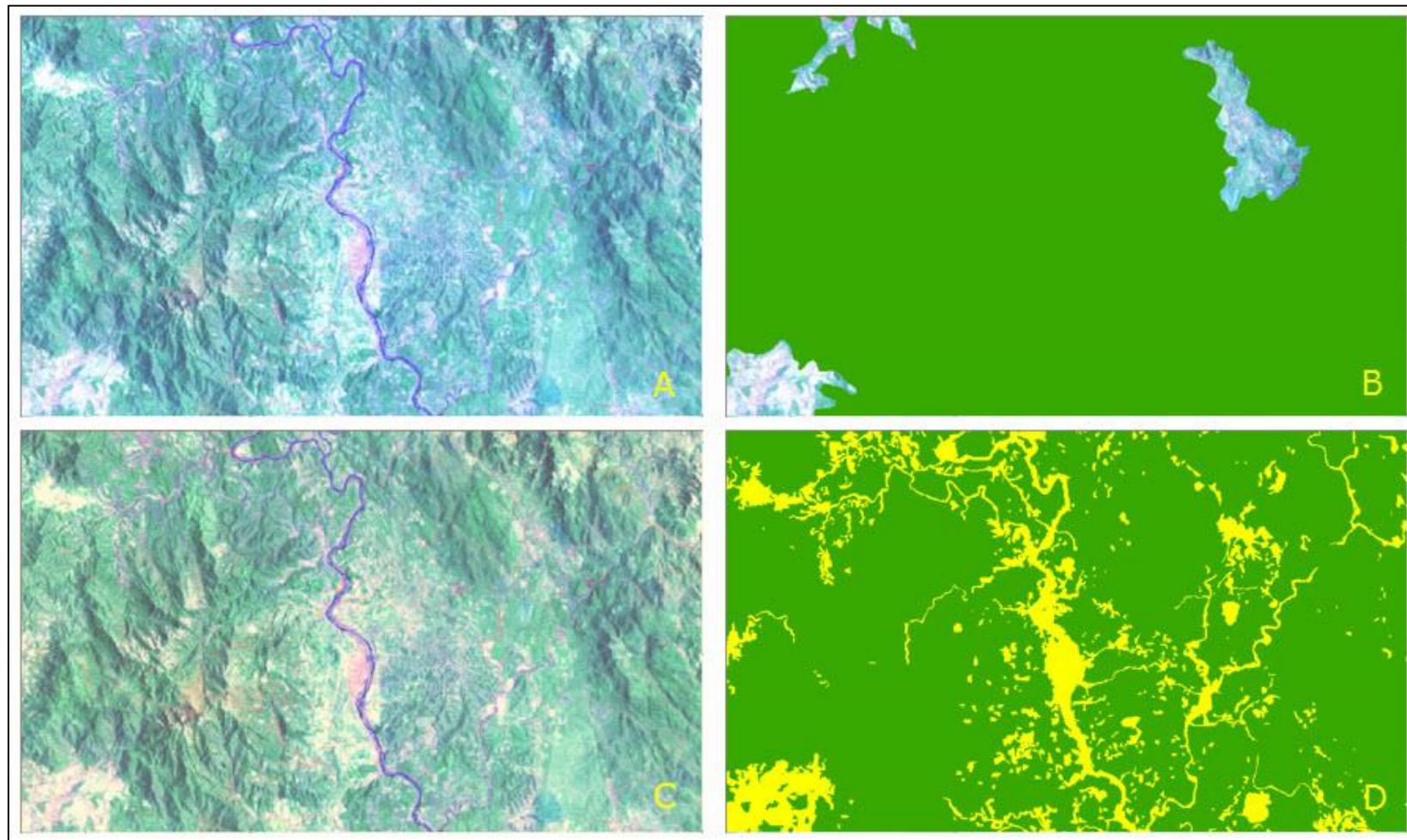


Figura 7.1. Imagen Landsat del año 1993 (A), cartografía oficial de bosques y selvas del año 1993 (B), imagen Landsat del año 1990 (C), cartografía de bosques y selvas del año 1990 y producto de este trabajo de investigación (D).

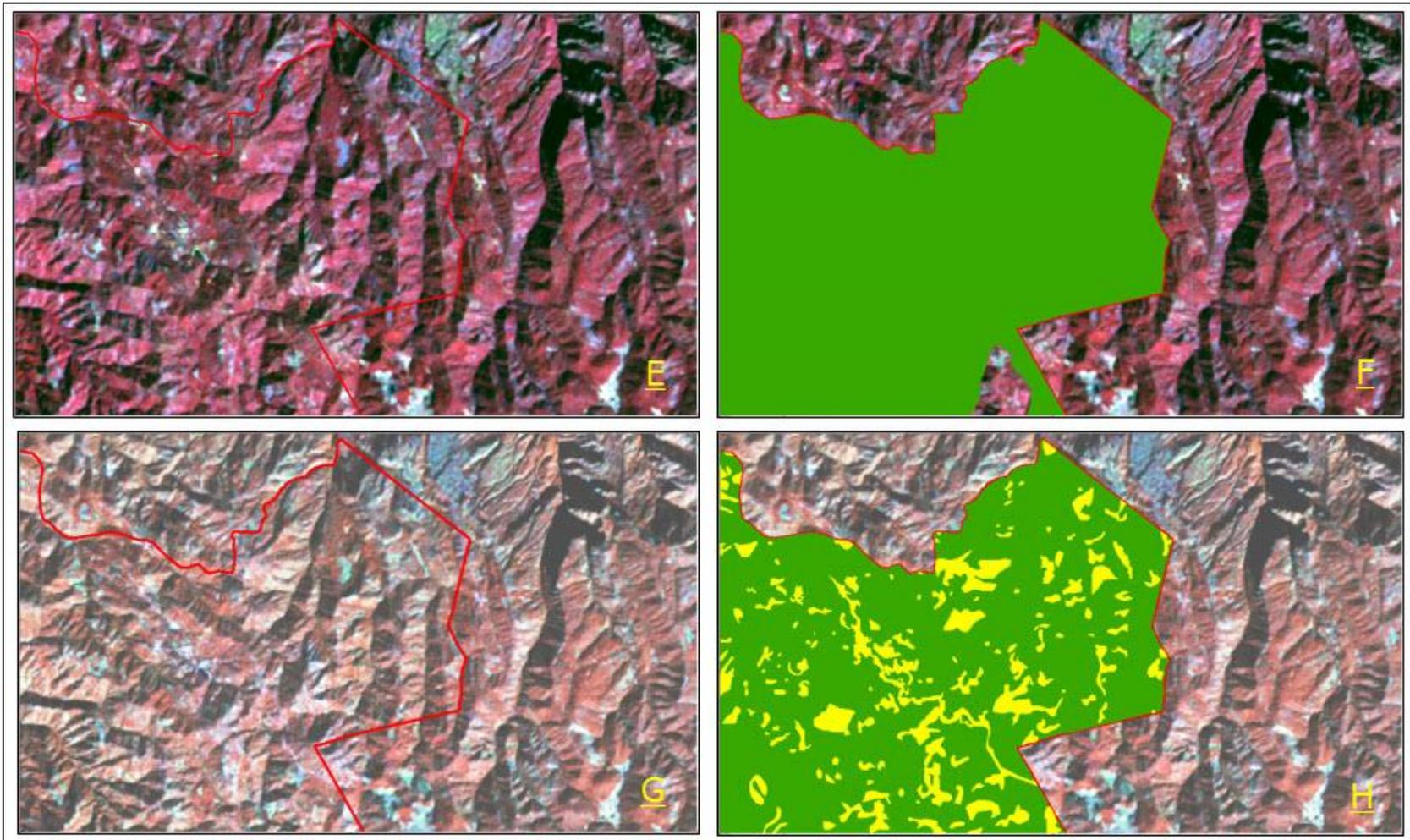


Figura 7.2. Imagen Landsat del año 2011 (E), cartografía oficial de bosques y selvas del año 2011 (F), imagen Landsat del año 2014 (G), cartografía de bosques y selvas del año 2014 y producto de este trabajo de investigación (H).

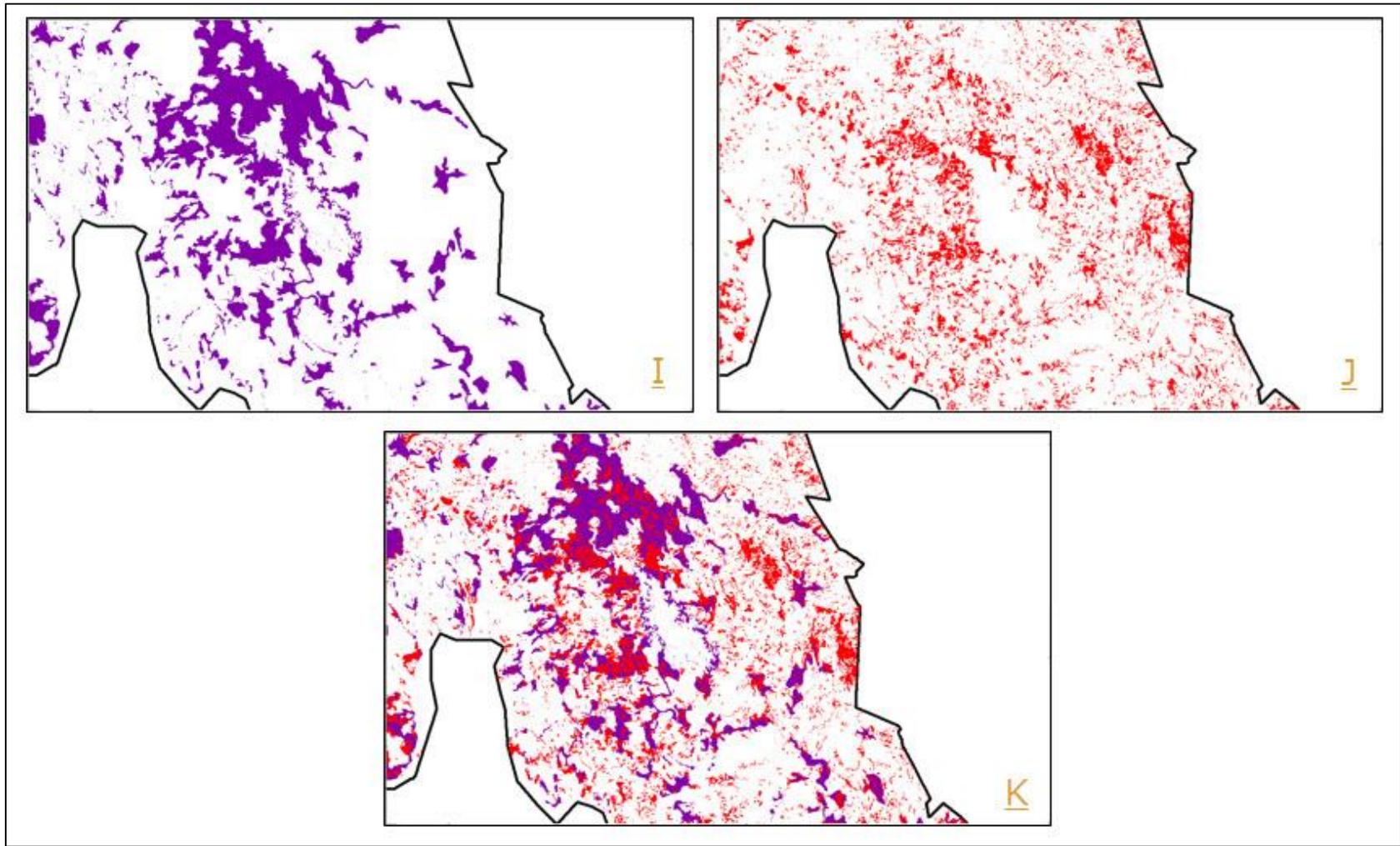


Figura 7.3. Deforestación producto del cruce de la cartografía oficial 1993-2011 (I), deforestación producto del presente trabajo 1990-2014 (J), sobre-posición de la deforestación de I y J (K).

De acuerdo a lo anteriormente mencionado y a las figuras 7.1, 7.2 y 7.3 se pone en evidencia que las cartografías oficiales de Uso de Suelo y Vegetación del INE y el INEGI a escala 1:250,000 sobre-estima o sub-estima la deforestación, como se muestra en los trabajos de Mas *et al.*, (2004) que realizó un estudio de los cambios de cobertura y uso de suelo para todo México, utilizando esta cartografía, obteniendo tasas de deforestación. De igual manera el trabajo de Corrales G., (2013), que estimó la deforestación para el estado de Sinaloa empleando los mapas del INE y el INEGI a escala 1:250,000, dando resultados aproximados de los procesos de pérdida de cobertura de bosques y selvas.

En este sentido, utilizando la cartografía oficial de los años 1993 y 2011 se obtuvieron cuatro áreas *hot spot* de deforestación, sus tasas medias anuales de deforestación fueron de **0.44%**, **0.80%**, **0.41%** y **0.52%** para las áreas **1**, **2**, **3** y **4**, respectivamente. Por dicha razón se procedió a evaluar el área número 2, que es la que presenta mayor pérdida de cobertura forestal.

En cuanto al análisis de las técnicas de mejoramiento espectral, clasificación digital y las metodologías que se utilizan para monitorear la deforestación se concluye que el Modelo Lineal de Mezclas Espectrales es una de las mejores técnicas para obtener valores puros de los pixeles que a su vez son asociados a variables biofísicas de las diferentes cubiertas de interés, sumándole a esto una clasificación de contexto espacial que incluye una segmentación y una clasificación visual de los segmentos obtenidos a las diferentes categorías, las cuales potencializan las técnicas para obtener la deforestación, produciendo resultados con mayor precisión. A razón de esto se decidió utilizar una adaptación de la metodología de Prodes Digital empleando el sistema TerraAmazon del INPE para determinar la deforestación del área *hot spot* 2.

El resultado de esta fue una pérdida de bosques y selvas de 4741.90 ha por año y una tasa media anual de deforestación de 0.60%, poniendo en evidencia que utilizando la cartografía oficial a escala 1:250,000 sobrestima la deforestación (ver tabla 7.1), así como también muestra que esta tasa media anual obtenida, es superior a la del país que es de 0.37%.

Tabla 7.1. Comparación de la deforestación sobre el área *hot spot 2*

Área <i>hot spot 2</i>	Bosques (km ²) Año (0)	Bosques (km ²) Año (1)	Deforestación (km ²)	Deforestación en ha/año	Tasa media anual de deforestación (%)
Mediante la cartografía del INE e INEGI	8,457.71 km ² (año 1993)	7,374.31 km ² (año 2011)	1,296.40 km ²	5,702.10 ha/año	0.80
Mediante el procesamiento digital de imágenes	7,898.05 km ² (año 1990)	6,759.99 km ² (año 2014)	1,192.99 km ²	4,741.90 ha/año	0.60

Por otra parte, la adaptación de la metodología de Geist y Lambin (2001); Pacheco *et al.*, (2011) que se utilizó para analizar los procesos de deforestación, mediante la consulta a expertos, permitió conocer a escala estatal, la interacción entre las causas principales y secundarias. De acuerdo con esto se concluye que la pérdida de bosques y selvas está dada por una combinación de causas principales y secundarias, siendo la expansión agrícola y la extensión de infraestructura las de mayor impacto en Sinaloa, estas a su vez impulsadas por los factores demográficos principalmente.

En tal sentido el presente trabajo permite conocer la situación de los cambios de la cobertura de bosques y selvas en los últimos 24 años. Donde la evaluación realizada confirmó y puso de manifiesto las altas tasas de deforestación que se presentan en el Estado de Sinaloa de manera constante durante el periodo de 1990 a 2014, lo cual reitera la necesidad de implementar un sistema de monitoreo de la cobertura boscosa a nivel municipal, estatal y nacional, todo ello encaminado para una futura estrategia de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques (REDD+).

Es importante señalar también la necesidad de generar cartografía de uso de suelo y vegetación de mayor precisión, escala 1:50,000, que permita estudiar este proceso con mayor certidumbre y generar mejores estimaciones, que coadyuven al planteamiento de estrategias locales y regionales para la protección y reforestación de las zonas forestales.

Por último, se concluye que el presente trabajo de investigación es el primero en identificar las áreas *hot spot* en Sinaloa, así como también es el primer estudio que evalúa la deforestación con las precisiones pertinentes que recomiendan los expertos en Sinaloa; al

igual, también es el primer intento por determinar un modelo causal de los procesos de pérdida de cobertura boscosa en el estado.

Como trabajo a futuro se pretende diseñar y elaborar escenarios de deforestación y reforestación que sirvan para generar una estrategia REDD+, utilizando las tecnologías de la información geográfica, en donde se pretende actualizar la cartografía de deforestación al año 2015, diseñar una metodología fundamentada en las estrategias REDD+ para monitorear la deforestación en Sinaloa, asimismo diseñar escenarios de deforestación y reforestación, y por último estimar los gases efecto invernadero apegándose a los lineamientos del IPCC y del INE bajo un módulo propio.

Anexos

1.- Encuesta

Proyecto “Análisis de la deforestación en el Estado de Sinaloa mediante Sistema de Información Geográfica y Percepción Remota, periodos 1990-2014”.

Dr. Carlos Pacheco, Universidad De los Andes, Mérida, Venezuela.

Dr. Wenseslao Plata Rocha, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Ing. Sergio Alberto Monjardín Armenta, Estudiante de la Maestría en Ciencias de la Información (Geomática), Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

La presente encuesta tiene como objetivo indagar sobre los procesos de deforestación en México y específicamente en el Estado de Sinaloa. Dicha indagación se enfoca en conocer la percepción de los expertos en la temática, sobre la información de la cobertura forestal y la deforestación, de esta última se pretende evaluar las causas principales y subyacentes que han conducido a estos procesos, de igual manera, la interacción de los mismos.

1) DATOS GENERALES

Sector al que representa el encuestado:

Gobierno____

Sector privado_____

Organización No Gubernamental (ONGs) ____

Sector académico / Investigación _____

Otro____ Indicar: _____

2) DIAGNÓSTICO DE LA INFORMACIÓN SOBRE COBERTURA FORESTAL

ENMÉXICO

2.1 ¿Está Ud. satisfecho con la información disponible sobre la dinámica de la cobertura forestal en México?

Extremadamente satisfecho_____

Muy satisfecho_____

Algo satisfecho_____

Poco satisfecho_____

Para nada satisfecho_____

Amplíe su respuesta (Cuadro de diálogo abierto):

2.2 ¿Con qué grado de facilidad encuentra Ud. información confiable sobre la dinámica forestal en México?

Extremadamente fácil_____

Muy fácil_____

Algo fácil_____

Un poco fácil_____

Nada fácil_____

2.3 ¿Cuál sería el uso que le daría Ud. a la información sobre cobertura forestal del país? (señale las opciones que crea más convenientes)

Inventario de la biodiversidad vegetal_____

Inventario de la biodiversidad animal_____

Régimen hidrológico_____

Uso de la tierra_____

Cambio Climático_____

Otra (señale):_____

2.4 ¿Cuál cree Ud. que sea la magnitud del problema de deforestación en México?

Muy grave ____

Grave ____

Poco grave ____

Nada grave ____

2.5 ¿En qué posición cree Ud. que se encuentra México a nivel mundial en cuanto a la tasa de deforestación?

Entre las posiciones del 01 - 10 ____

11 - 20 ____

21 - 30 ____

31 - 60 ____

2.6 ¿Cuál cree Ud. que sea la magnitud del problema de deforestación en el Estado de Sinaloa?

Muy grave ____

Grave ____

Poco grave ____

Nada grave ____

2.7 ¿En qué posición cree Ud. que se encuentra el Estado de Sinaloa a nivel nacional en cuanto a la tasa de deforestación?

Entre las posiciones del 01 al 10 ____

11 al 20 ____

21 al 32 ____

3) LAS CAUSAS PRINCIPALES DE DEFORESTACIÓN EN SINALOA

Partiendo de la literatura consultada, la deforestación a nivel global es generada por una serie de causas principales que directamente producen los procesos de deforestación, estas

son agrupados en cinco grandes elementos: la expansión agrícola, extracción de madera, explotación minera, extensión de infraestructura y desencadenamiento de eventos sociales. En este sentido, se plantean a continuación las siguientes preguntas, que están enmarcadas temporalmente desde la década de los noventas hasta la presente:

3.1. ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las causas principales de la deforestación en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Expansión agrícola ____

Extracción de madera ____

Explotación minera ____

Extensión de infraestructura ____

Desencadenamiento de eventos sociales ____

3.2. De la expansión agrícola ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las siguientes causas en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Cultivos permanentes (A gran y pequeña escala; subsistencia y comerciales) ____

Agricultura migratoria (Tala y quema, roza y quema) ____

Cría de ganado(A gran y pequeña escala) ____

Colonización (Transmigración, reasentamiento) ____

3.3. De la extracción de madera ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las siguientes causas en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Comercial (Estatad y privado) ____

Combustible (Uso doméstico) ____

Mejoramiento de fincas (Uso doméstico) ____

3.4. De la extensión de infraestructura; Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las siguientes causas en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Transporte (Carreteras, caminos, vías férreas, etc.) ____

Expansión de asentamientos (Urbanos y rurales) ____

Servicios públicos (Embalses, líneas eléctricas, etc.) ____

3.5. De la explotación minera; Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las siguientes causas en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Metálica (A pequeña y gran escala de oro, plata, cobre, plomo, etc.) ____

No metálica (A pequeña y gran escala de cal, caliza, granito, carbón, sal, etc.) ____

3.6. De los desencadenamientos de eventos sociales ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las siguientes causas en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Guerras (Independentistas) ____

Desplazamientos bruscos (Migraciones nacionales y países vecinos) ____

Desorden social (Poder de tierras) ____

4) CAUSAS SECUNDARIAS DE DEFORESTACIÓN EN SINALOA

Las causas principales son motivadas o impulsadas por una serie de causas secundarias o indirectas, estas según la literatura se pueden agrupar en cinco grandes factores: los demográficos, los económicos, los tecnológicos, los políticos e institucionales y los culturales. En este sentido se plantean a continuación las siguientes preguntas:

4.1. ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a las siguientes causas secundarias de deforestación en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de las causas debe sumar un 100%)

Factores demográficos ____

Factores económicos ____

Factores tecnológicos ____

Factores políticos e institucionales ____

Factores culturales ____

4.2. De los factores demográficos;Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a los siguientes factores en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de los factores debe sumar un 100%)

Incremento natural (Natalidad y mortalidad) ____

Migraciones (Regionales, nacionales e internacionales) ____

Incremento poblacional (Aumento de zonas urbanas, nuevos asentamientos) ____

4.3. De los factores económicos;Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a los siguientes factores en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de los factores debe sumar un 100%)

Crecimiento del mercado y comercialización (Exportación y consumo nacional) ____

Estructura económica (Industrias básicas) ____

Urbanización-industrias (Nuevas ciudades-industrias) ____

4.4. De los factores tecnológicos;Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a los siguientes factores en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de los factores debe sumar un 100%)

Obras estructurales (Modifican el terreno) ____

Cambios de agro-técnicas (Mecanización agraria) ____

Factor de producción agricultura (Técnicas para aumentar la producción) ____

4.5. De los factores políticos e institucionales ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a los siguientes factores en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de los factores debe sumar un 100%)

Políticas formales (Desarrollo económico, créditos) ____

Clima político (Corrupción, mala gestión) ____

Derecho a la propiedad (Titularidad de las tierras) ____

4.6. De los factores culturales ¿Cuál cree Ud. que es el porcentaje que le corresponde a los siguientes factores en el Estado de Sinaloa? (La sumatoria del porcentaje de los factores debe sumar un 100%)

Actitud pública, valores y creencias (Despreocupación por los bosques) ____

Comportamiento familiar e individual (Aprovechamiento del bosque) ____

5) UBICACIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN EN SINALOA

5.1 ¿En cuál de las siguientes cuatro áreas agrupadas cree Ud. que exista más deforestación? (Ver figura 1)

Área 1 (Choix, El Fuerte y Sinaloa de Leyva) ____

Área 2 (Culiacán, Badiraguato, Mocorito y Salvador Alvarado) ____

Área 3 (San Ignacio, Cosalá y Cruz de Elota) ____

Área 4 (Mazatlán, Concordia, El Rosario y Escuinapa) ____

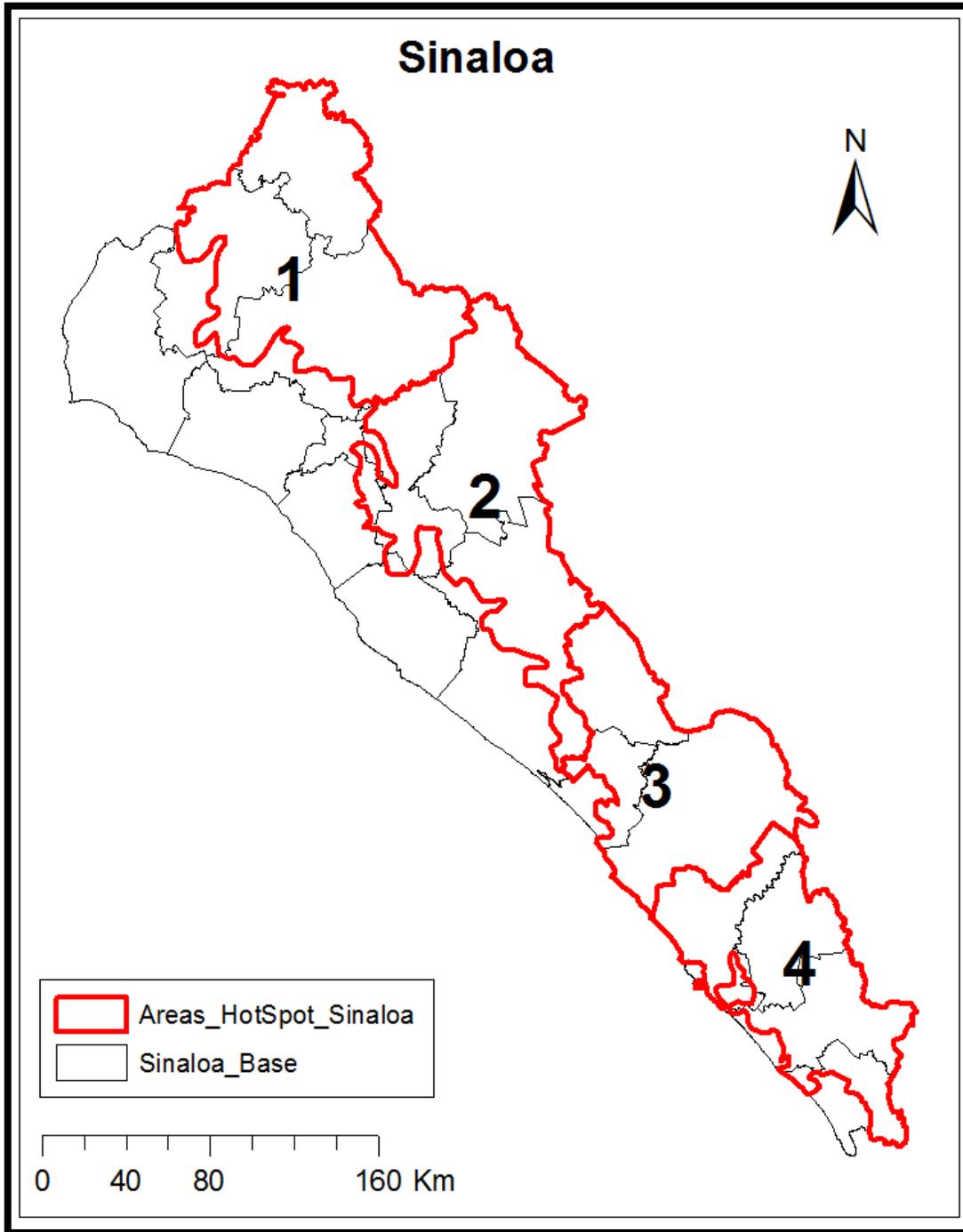


Figura 9.1. Mapa de Sinaloa.

6) RELACIÓN ENTRE LAS CAUSAS PRINCIPALES Y LAS CAUSAS SECUNDARIAS DE DEFORESTACIÓN

5.1 Relacione las causas secundarias que crea Ud. que interactúen con más frecuencia para que se produzcan las causas principales. (Puede relacionar más de una causa secundaria con una causa primaria)

Cusas principales	Causas secundarias
Expansión agrícola _____	a) Factores demográficos
Extracción de madera _____	b) Factores económicos
Explotación minera _____	c) Factores tecnológicos
Extensión de infraestructura _____	d) Factores políticos e institucionales
Desencadenamiento de eventos sociales _____	e) Factores culturales

3.13 Relacione las causas primarias que crea Ud. que interactúen con más frecuencia para que se produzcan las causas secundarias. (Puede relacionar más de una causa primaria con una causa secundaria)

Causas secundarias	Causas principales
Factores demográficos _____	a) Expansión agrícola
Factores económicos _____	b) Extracción de madera
Factores tecnológicos _____	c) Explotación minera
Factores políticos e institucionales _____	d) Extensión de infraestructura
Factores culturales _____	e) Desencadenamiento de eventos sociales

Revisión Bibliográfica

- Achard, F., Eva, H.D., Glinmi, A., Mayaux, P., Richards, T., Stibig, H.J., 1997. Identification of deforestation hot spot areas in the humid tropics. In, Report to the Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites. Join Research Center EC, Ispra, Italy, p. 99.
- Achard, F., Eva, HD., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., Malingreau, J.P., 2002, Determination of deforestation rates of the worlds humid tropical forest. *Science* 297, 999-1002.
- Achard, F., Mollicone, D., Stibig, H.J., Aksenov, D., Laestadius, L., Li, Z.Y., Popatov, P., Yaroshenko, A., 2006. Areas of Rapid forest-cover change in boreal Eurasia. *Forest Ecol Manag* 237, 322-334.
- Achard, F., Stibig H-J., Eva, H. D., Lindquist, E. J., Bouvet, A., Arino, O., Mayaux, P., 2010. Estimating tropical deforestation from Earth observation data. *Carbon Management* 1, 271-287.
- Adams J. B., Sabol, D. E., Kapos V., Almeida R., Roberts D. A., Smith M. O. Y Gillespie A. R. (1995). Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers, Application to Land –Cover Change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54, pp. 137-154.
- Alonso Pérez, F., Ruiz, L., Turner J., Berlanga R. y Mitchelson, J. (2003). “Land cover changes and impact of shrimp aquaculture on the landscape in the Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico”. *Ocean and Coastal Management* 46, pp. 583– 600.
- Alvarez, J. (2011). Situación de REDD en las negociaciones de la UNFCCC. Recuperado de: es.scribd.com/.../Situacion-de-REDD-en-las-negociaciones-de-la-UN.
- Angelsen A., (2010). La implementación de REDD+ Estrategia nacional y opciones de política. Recuperado de: www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BAngelsen1001.pdf
- Angelsen, A. et al., 2009. Realizing REDD+: National strategy and policy options. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Angelsen, A., (2009). Avancemos con REDD Problemas, opciones y consecuencias. Recuperado de: www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BAngelsen0901.pdf

- Arguelles Margarita, Benavides Carmen, Junquera Beatriz, 2006, The impact of economic activity in Asturias on greenhouse gas emissions: Consequences for environmental policy within the Kyoto Protocol framework, *Journal of Environmental Management* #81, pp 249–264.
- Aronoff, S., 2005. *Remote Sensing for GIS Managers*. Primera ed. Redlands: Environmental Systems Research Institute Inc.
- Arriaga V. (2012). Reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques (REDD+) en los países de América Latina. Recuperado de: www.eclac.cl/publicaciones/xml/0/47580/reducciondeemisiones.pdf.
- Asner G., Knapp D., Balaji A., Perez-Acosta G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite, *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 3.
- Bartalev S., Kissiyar O., Achard F., Bartalev S. A., Simonetti D. (2014). Assessment of forest cover in Russia by combining a wall-to-wall coarse-resolution land-cover map with a sample of 30 m resolution forest maps, *International Journal of Remote Sensing*, 35:7, 2671-2692, DOI: 10.1080/01431161.2014.883099
- Bartholomé, E., and A. S. Belward. 2005. “GLC2000: A New Approach to Global Land Cover Mapping from Earth Observation Data.” *International Journal of Remote Sensing* 26: 1959–1977.
- Basterra, I. (2010). Teledetección, imágenes satelitales, procesamiento digital de imágenes. Recuperado de ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/.../tdi.pdf.
- Beltrán C., 2013, Elaboración de cartografía de uso y cobertura del suelo para los Municipios de Culiacán y Navolato, Sinaloa, mediante la clasificación digital de imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mexico.
- Bins, S.A., Fonseca, L.M.G., Erthal, G.J., y Li, M., (1993). Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In, *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, Salvador, Brazil.
- Boardman J. B., Kruse F. A., Green R.O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, CA, NASA, Jet Propulsion Laboratory. Pp. 23-26.

- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). “La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación”, *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Num. 44*, pp. 18-38.
- Boege, E. 2008. El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México. Hacia la conservación in situ de la biodiversidad y agrobiodiversidad en los territorios indígenas. INAH, CDI, México.
- Bonilla-Moheno, M., Redo, D., Aide, M., Clark, M., Grau, R., 2013. Vegetation change and land tenure in Mexico: a country-wide analysis. *Land Use Policy* 39,355–364.
- Bosque Sendra, J. (1997): *Sistemas de información geográfica*. Madrid, Ediciones Rialp, 2ª edición corregida, 451 p.
- Broich M, Stehman S., Hansen M.C., Potapov P, Shimabukuro Y. (2009). A comparison of sampling designs for estimating deforestation from Landsat imagery: A case study of the Brazilian Legal Amazon, *Remote Sensing of Environment*. Vol. 113, pp 2448–2454.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Oxford.
- Büttner G., Maucha G., (2006). The thematic accuracy of Corine land cover 2000. Assessment using LUCAS (land use/cover area frame statistical survey) Technical report, 7 European Environment Agency, Copenhagen (2006) http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2006_7/en Accessed 11.6.09
- Caetano M. S., Mertes L. A. K., y Pereira J. M. C. (1994). Using spectral Mixture Analysis for fire severity mapping. *Proceedings of 2nd International Conference on Forest Fire Research*. Editorial Coimbra, pp. 667-677.
- Câmara, G., Valeriano, D., y Soares, J., (2006). Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal. In. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brazil, p. 13.
- Castillo S., M.A., García-Gil, G., March, I.J., Fernández, J.C., Valencia, E., Osorio, M. y A. Flamenco, (1998). Diagnóstico geográfico y cambios de uso del suelo en la Selva El Ocote, Chiapas. Informe Final. El Colegio de la Frontera Sur-Fondo Mundial para la

- Naturaleza WWF México, Biodiversity Support Program, U.S. AID. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México, pp. 121.
- Cebrián, Juan A. (1992): Información Geográfica y Sistemas de Información Geográfica. Univ. De Cantabria. p. 85. ISBN: 84-87412-81-5.
- Céspedes, F., Moreno, S., 2010. “Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México”. Revista INE. www.revista.ine.gob.mx/article/viewDownloadInterstitial/58/81
- Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring Global Environment
- Chuvieco E., 2008. Teledetección Ambiental. Barcelona: Ariel S.A.
- Chuvieco E., 2010. Teledetección Ambiental. 1.ª ed. Barcelona: Planeta, S.A.
- Chuvieco, E. and Justice, C. (2008): NASA Earth Observation Satellite Missions for Global Change Research, en Earth Observation and Global Change, New York, Springer: 23-47.
- Chuvieco, E., (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Segunda Edición. Ediciones Rialp S. A. Madrid, España. 449 p.
- Chuvieco, E., Huete, A., 2010. Fundamentals of Satellite Remote Sensing. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Chuvieco, E., Sancho, J. (1986): Tratamiento visual y digital de las imágenes espaciales: aplicaciones docentes, Didáctica Geográfica, 14: 17-28.
- CIAT (2007). Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano capítulo 3 teledetección. Recuperado de: ftp://ftp.ciat.cgiar.org/.../Teledeteccion/Teledeteccion_Modulo.pdf.
- CIFOR (2010). Sencillamente REDD. Recuperado de: www.cifor.org/publications/pdf.../MediaGuide_REDD_Spanish.pdf.
- Cihlar, J., Xiao, Q.; Chen, J.; Beaubien, J.; Fung, K. y La tificovic, R. (1998): Clasificación por generalización progresiva: una nueva metodología automatizada para el procesamiento de datos multicanal, International Journal of Remote Sensing , 19:26852704.
- Clarke, K.L. (1990): Analytical and computer cartography. Prentice Hall, New Jersey
- CLASlite, 2014. Carnegie Landsat Analysis System. Disponible; <http://claslite.carnegiescience.edu/en/about/science.html>.

- CONAFOR, 2010, VISION DE MÉXICO SOBRE REDD+ HACIA UNA ESTRATEGIA NACIONAL, Primera edición, Zapopan, Jalisco, México.
- Corrales G., 2013, Análisis de Cambio de Uso de Suelo en el Estado de Sinaloa utilizando Sistemas de Información Geográfica. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.
- Cortez, R. y Stephen, P. (2009). Curso Introductorio sobre la Reducción de las Emisiones de la Deforestación y Degradación (REDD). Recuperado de: unfccc.int/files/.../participant_resource_manual_final_spanish.pdf.
- Couturier, S., Núñez, J.M., Kolb, M., 2012. Measuring tropical deforestation with error margins: a method for REDD monitoring in South Eastern Mexico. In: Sudarshana, P., Nageswara-Rao, M., Soneji, J.R. (Eds.), Tropical Forests. InTech, <http://dx.doi.org/10.5772/31523>, ISBN: 978-953-51-0255-7, (on line).
- Denman, K.L., Et al. 2007. "Couplings between Changes in the Climate System and Biogeochemistry". In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, United Kingdom, USA.
- Desclee, B. and Simonetti, D. and Mayaux, P. and Achard, A. (2013). Multi-Sensor Monitoring System for Forest Cover Change Assessment in Central Africa, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 6, pp.110-120.
- Dirzo, R. y García, M.C. (1991). "Rates of deforestation in Los Tuxtlas a Neotropical Area in Southeast Mexico". Conservation Biology 6: pp. 84-90.
- Domínguez, Javier B, (2000) "Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)".
- Dupuy, R.J.; González, I.J.; Iriarte, V.S.; Calvo, I.L.; Espadas, M.C.; Tun, D.F. y Dorantes, E.A. (2007). "Cambio de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo". Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Num. 62, pp.104-124.

- ECOTicias (2010). Los gráficos vitales del cambio climático para América Latina y el Caribe muestran tanto la urgencia de acción, como los beneficios significativos que pueden acarrear acciones tempranas dirigidas a la adaptación y reducción de la vulnerabilidad regional frente al cambio climático. Recuperado de: www.ecoticias.com/.../Cambio-Climatico-para-America-Latina-y-el-C.
- Europapress (2013). En órbita Landsat 8, el nuevo centinela de la deforestación. Recuperado de: www.europapress.es/.../noticia-orbita-landsat-nuevo-centinela-deforestaci.
- European Commision (1993). Corine Land Cover: Guide Technique, Luxemburgo, oficina de Publicaciones Oficiales en la Unión Europea.
- FAO (2005). Bosques, clima y Kyoto. Recuperado de www.fao.org/forestry/es/
- FAO (2011a). Situación de los bosques del mundo 2011. Recuperado de: www.fao.org/docrep/013/i2000s/i2000s.pdf
- FAO (2011b). Medir la degradación del bosque. Recuperado de www.fao.org/forestry/es/
- FAO (2012a). Preparación de una estrategia a largo plazo para el programa de evaluación de los recursos forestales mundiales. Recuperado de www.fao.org/forestry/es/
- FAO, 1993. Forest Resources Assessment 1990. Tropical countries. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p.122.
- FAO, 2001. Global Forest Resources Assessment 2000. Main Report. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p.140.
- FAO, 2006. Global Forest Resources Assessment 2005. Main Report. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p.135.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p.378.
- FAO, 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nation. Disponible: <http://www.fao.org/forestry/fra/53123/es/>.
- FAO. (2006a). Global forest resources assessment 2005 Progress towards sustainable forest management Resources Assessment Working Paper 147. Rome.
- FIELD (2011). REDD-plus. Documento Informativo. Recuperado de: www.field.org.uk/files/fieldreddbriefingpaper032011_sp.pdf.
- Ford, J. P., (1980): Seasat Views Noth America, the Caribbean, and Western Europe with Imaging Radar, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory Publications.

- Franco M, S., Regil García, H.H. y Ordoñez, J.A.B. (2006b). “Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca”, *Madera y Bosques*, 12 (1), pp. 17-28
- Friedl, M. A., D. K. McIver, and J. C. F. Hodges. 2002. “Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results.” *Remote Sensing of Environment* 83: 287–302.
- FSI, 2009. State of Forest Report 2009, In Ministry of Environment and Forest, Government of India, Dehradun, India, p. 226.
- FSI, 2013. State of Forest Report 2009, In Ministry of Environment and Forest, Government of India, Dehradun, India, p. 226.
- FSI, 2014. Forest Survey of India. Disponible: http://fsi.nic.in/details.php?pgID=sb_6.
- Gálmez V. y Kómetter R. (2009). Perspectivas y posibilidades de REDD+ en Bosques Andinos. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION. Serie de Investigación y Sistematización N° 11. Editor: Intercooperacion Fundación Suiza para el Desarrollo y la Cooperación Internacional. 121 p.p.
- García, N.H., López, J., Moreno, R., Villers, M. y García, R. (2000). “Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato”, *Terra* Vol. 18 Num. 1.
- García, R.G., Schmook, B. y Espejel C.I. (2005). “Dinámica en el uso del suelo en tres ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo”. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Num. 58*, pp. 122-139.
- Geist, H., Lambin, E., 2001. What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence. In. LUC International Project Office, Louvain-la-Neuve, Belgium, p. 116.
- GOFC-GOLD, 2010, A sourcebook of method and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and deforestation. In GOFC-GOLD Report version COP16-1. GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.

- GOFC-GOLD. 2013. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOFC-GOLD Report version COP19-1. (GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands).
- Gómez, D., Barredo, J.C., (2005). “Sistemas de la Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio”.
- González, C. (2009). Conservando nuestros recursos naturales. Calentamiento global /Cambio climático. Recuperado de: academic.uprm.edu/gonzalezc/id22.htm - Puerto
- Goodchild, M. F., Gouquing, S. y Shiren, Y, 1992, Development and test of an error model for categorical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6, 87-104.
- Green R. Timothy , Taniguchi Makoto, Kooi Henk, Gurdak J. Jason, Allen M. Diana, Hiscock Kevin M. , Treidel Holger, Aureli Alice, Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater, *Journal of Hydrology*, Volume 405, Issues 3–4, 5 August 2011, Pages 532-560, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>.(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002988>)
- Guerra, M.V. y Ochoa, G.A., 2006. “Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990- 2000)”. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Num. 59, pp.7-25.
- Gutiérrez Puebla, Javier; Gould, Michael (1994): *SIG, sistema de información geográfica*. Editorial Síntesis, S.A. Madrid. p. 251. ISBN: 84-7738-246-8.
- Hansen M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, J. R. G. Townshend, 2013, High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science* 342, DOI: 10.1126/science.1244693.
- Hansen M.C., S.V. Stehman, P.V. Potapov, T.R. Loveland, J.R.G. Townshend, R.S. DeFries, K.W. Pittman, B. Arunarwati, F. Stolle, M.K. Steininger, M. Carroll, C. DiMiceli Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using

- multitemporal and multiresolution remotely sensed data, Proceedings of the National Academy of Sciences, 105 (2008), pp. 9439-9444
- Hernández (2008). Cambio global y su relación con la conservación y el uso de los bosques neotropicales. Recuperado de: www.saber.ula.ve/dspace/items-bysubject?subject=Deforestación.
- Herold y Skutsch (2010). Medición, reporte y verificación de REDD+ Objetivos, capacidades e instituciones. En Angelsen, (2010). Editor. La implementación de REDD+ Estrategia nacional y opciones de política. Recuperado de: www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BAngelsen1001.pdf
- Hlavka C. A. y Spanner M. A. (1995). Unmixing AVHRR imagery to assess clearcuts and forest regrowth in Obregon. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 33, pp. 788-795.
- Holben B. N., Shimabukuro Y. E., (1993). Linear Mixing Model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensor. International Journal of Remote Sensing, Vol. 14, pp. 2231-2240.
- Honty (2012). Contenidos y perspectivas tras la COP18 en Doha. Recuperado de: www.intercambioclimatico.com/2012/.../contenidos-y-perspectivas-tras-l.
- Houghton RA., 2012, Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics, CurrOpin Environ Sustain (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.006.htm>.
- IDEAS (2010). Reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal.
- INE, 2013, Instituto Nacional de Ecología. Disponible: <http://www.inecc.gob.mx/>
- INEGI, 2013, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible: <http://www.inegi.org.mx/>
- INPE, 2010. Monitoring of the Brazilian Amazonia; Projeto PRODES In, <http://www.obt.inpe.br/prodes/inex.html>, Brazil.
- IPCC (2001a). Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Recuperado de: www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml.
- IPCC (2001c). Tercer Informe de Evaluación Cambio climático 200. La base científica. Recuperado de: www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

- IPCC (2007a). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de IPCC 2007. Climate change 2007: the physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC, 2013. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Recuperado Agosto de 2013, de <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml#UgvWt5LVAt>
- Jay Gao, Yansui Liu. (2012). Deforestation in Heilongjiang Province of China, 1896–2000: Severity, spatiotemporal patterns and causes, *Applied Geography*, Volume 35, Issues 1–2, Pages 345-352, ISSN 0143-6228, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.08.001>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622812000823>)
- Jensen, J. R., 2000. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- Jones, H. G., Vaughan, R. A., 2010. Remote Sensing of Vegetation. New York: Oxford.
- Kanninen, M., Brockhaus, M., Murdiyarsa, D., Nabuurs, G., 2010. Harnessing forest for climate change mitigation through REDD+. In: Series, I.W. (Ed.), International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). IUFRO, Vienna, Austria, pp. 43-54.
- Köhl, M., Magnussen, S., Marchetti M. 2006. Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory. ISBN: 3-540-32571-9
- Labrandero, J. L. (1978): Aplicación de métodos digitales al reconocimiento de suelos mediante sensores remotos, Departamento de Geología, Madrid, Universidad Autónoma de Madrid.
- Lambin, E. F., Meyfroidt, P. (2010). Land Use Transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economics change. *Land Use Policy* 27, 108-118.
- Lamolda, H. (2008). Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes LANDSAT ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales. Recuperado de www.geo.upm.es/userfiles/file/.../memoria-PFC-74.pdf
- Landis, J.R., y Koch, G.G., (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33, 159-174.

- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., Sholes, R.J., 2005, A Synthesis of information on Rapid Land-Cover Change for the Period 1981-2000. *BioScience* 55, 115-124.
- Lesschen, J., P., V., Staal, S. (2005). Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. LUCR Report Series 7. In. The international Livestock Research Institute Nairobi, Kenya y LUCR focus 3 office, Wageningen University the Netherlands.
- Martinez Julia, Fernandez Bremaunts Adrian, Osnaya Patricia, 2004, Cambio climático: Una visión desde México, 1ra (edición), México.
- Mas J. F., Velázquez A., Reyes J., Mayorga R., Alcántara C., Bocco G., Castro R, Fernández T, Pérez A., Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for Mexico, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 5, Issue 4, October 2004, Pages 249-261, ISSN 0303-2434, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243404000339>)
- Masera, O., 1996, Deforestación y degradación forestal en México, Documentos de trabajo # 19, GIRA A. C. Pátzcuaro, México.
- Masera, O.R. (1995). "Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forests: Methodological Considerations and Results". *Interciencia* 20(6), pp 388-395.
- Maslin, M. (2004). Historia sobre el efecto invernadero y calentamiento global de la tierra. Recuperado de: www.lenntech.es/efecto-invernadero/historia-calentamientoglobal.
- Mayaux, P., Eva, H.D., Brink, A., Achard, F., Belward, A., (2008). Remote Sensing of Land-Cover and Land-Use Dynamics. In: Chuvieco, E. (Ed.), *Earth Observation of Global*
- Mendoza, M., Bocco, G., López, E. y Bravo, M. (2002). "Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán". *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Num. 49, pp.92-117.
- Merchán, J. (2001). Las negociaciones internacionales sobre el cambio climático: una encrucijada para la economía y la política. Recuperado de: www.revistaasturianadeeconomia.org/raepdf/21/P101-128.pdf

- Meyfroidt, P., Rudel, T.K., Lambin, EF. (2010). Forest transitions, trade and the global displacement of land use. *PNAS* 107, 20917 – 20922.
- Myers, N., 1992. Future operational monitoring of tropical forests: an alert strategy. In. *Join Research Center EC, Ispra, Italy.*
- NASA, 1977, *Skaylab Explores the Earth*, Washington, D. C., NASA, SP 380.
- NASA, 2013. The Landsat Program. [En línea] Available at: <http://landsat.gsfc.nasa.gov> [Último acceso: 28 Febrero 2013].
- O Conell, K. M., Hilgenberg, G. (2001), U. S. Remote Sensing Programs and Polices, en *Commercial Observation Satellites. At the Leading edge of Global Trasparency.* Santa Monnica, RAND – ASPRS: 139-163.
- O.T.A. (1994): *Remotely Sensed Data: Techonology Management and Marckets*, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office – U. S. Congress, Office of Techonology Assessment, OTA-ISS-604.
- OTCA, 2014. *Monitoreo de la Deforestación, Aprovechamiento Forestal y Cambios de Uso del Suelo en el Bosque Pan-amazónico.* Disponible: http://www.otca.org.br/portal/admin/_upload/publicacoes/folder_monitoreo_esp.pdf
- Pacheco C., 2014, Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images, *ACTA AMAZONICA*, VOL. 44, p. 185 – 196, Brazil.
- Pacheco, C. (2011). *Análisis de la deforestación en Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+.* Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá.
- Pacheco, C., Aguado, I. y López, J. (2013). Comparación de los métodos utilizados en el monitoreo de la deforestación tropical, para la implementación de estrategias REDD+, caso de estudio los Llanos Occidentales Venezolanos. Recuperado de: www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0445.pdf
- Pacheco, C., Aguado, I. y Mollicone, D. (2011a). Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos, *Interciencia*, 36, 578-586.
- Pacheco, C., Aguado, I. y Mollicone, D. (2011b). Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo, *Biollania*, 10, 281-292.
- Pacheco, C., Aguado, I., Vilanova, E. y Martínez, S. (2012). Utilización de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el desarrollo de un sistema de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de emisiones de CO2 en tres áreas “hot spot” de

- deforestación en Venezuela. Recuperado de: agetig.es/2012_Madrid/ponencia1/Pacheco_final_imp.pdf
- Pacheco, C., Mollicone, D. y Aguado, I. (2011c). Identificación de las áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela, en: INPE (Ed.), Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, p. 2779.
- Panduro, M. (2012). Percepción remota. Recuperado de: www.unapiquitos.edu.pe/.../CAP%20VII-PERCEPCION%20REMOT.
- Parker, C., Mitchell, A., Trivedi, M., Mardas, N. (2009). El Pequeño Libro de REDD. Recuperado de: www.theredddesk.org/sites/default/files/lrb_es.pdf
- Pérez, U. (2005). La percepción remota. Recuperado de: desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home_1/.../arc_5995.pdf
- Pernía, J. (2001). Sensores espaciales para estudios ambientales, a las puertas del siglo XXI.
- Phillips, O.L., et al. 1998. “Changes in the Carbon Balance of Tropical Forest: Evidence from Long-Term Plots”. In: Science, 16 october: Vol 282, No. 5388: 439-442.
- Pineda, N., (2010), DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE PROCESOS FORESTALES EN EL ESTADO DE MÉXICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, Tesis Doctoral, Universidad Alcalá de Henares, Madrid.
- Pinedo, A. (2008), Modelación de atributos de bosques templados con LANDSAT TM Y SPOT-HRV e Índice de Sitio como indicador de productividad. Recuperado de: eprints.uach.mx/114/1/ZOO-TP-00047.pdf
- Potapov, P., Hansen, M.C., Stehman, S.V., Loveland, T.R., Pittman, K., 2008. Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss, remote Sensing of Environment 112, 3708-3719.
- ProForest (2011). Que es RED plus. Recuperado de: www.efi.int/files/attachments/.../flegt_redd_bn_2_spanish_web1.pdf
- Quarmby N. A., Townshend J. R. G., Settle J. J., White K. H., Milnes, M., Hindle T. L. y Silleos N. (1992). Linear Mixture Modeling Applied to AVHRR data for crop area estimation. International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, pp. 415-425.
- Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chhabra, A., DeFries, R.S., Foley, J.A., Gesit, H., Houghton, R.A., Klein Goldewijk, K., Lambin, E.F., Millington, A.,

- Rasmussen, K., Reid, R.S., Tumer, B.L., 2006. Global land-cover change: recent progress, remaining challenges. In Lambin, E.F., Geist, H. (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change* Springer, Berlin, pp. 9 – 40.
- Ramírez, R.I. y Zubieta, R. (2005). Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca. México D.F.
- Reiche, J. and Souza, C.M. and Hoekman, D.H. and Verbesselt, J. and Persaud, H. and Herold, M. (2013). Feature Level Fusion of Multi-Temporal ALOS PALSAR and Landsat Data for Mapping and Monitoring of Tropical Deforestation and Forest Degradation, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 6, pp.2159-2173.
- Reuter, F. (2009). Plataformas orbitales y sensores. Recuperado de: fcf.unse.edu.ar/.../SD-34-Plataformas-orbitales-y-sensores-REUTER.
- Reyes Díaz, G.J., García, G.G., Castillo, A.O. y March, M.I. (2001). “Uso del suelo y transformación de selvas en un ejido de la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, México”. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Num. 44, pp.39-53.
- Riaño D., Chuvieco E., Ustin S.L., Zomer R., Dennison P., Roberts D., Salas J. (2002). Assessment of vegetation regeneration after fire through multispectral analysis of AVHRR images in the Santa Monica Mountains. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 79, pp. 60-71.
- Roberts D., Smith G. M., Adams M. L. (1993). Green Vegetation, Non photosynthetic vegetation and soils in AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 44, pp.255-269.
- Robinson, C., (1981), The logic of Multi-espectral classification and mapping the land, *Remote Sensing of Environment*, 11:231-244.
- Rubio, J. (2005). Las negociaciones internacionales sobre cambio climático. Recuperado de: dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1221938.
- Rudel, T.K., DeFries, R., Asner, G.P., Laurance, W.F., 2009. Changing Drivers of Deforestation and New Opportunities for Conservation. *Conserv Biol* 23, 1396-1405.

- Samaniego, J. (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Recuperado de: www.pnuma.org/forodeministros/14.../pan10nfe- Cambio Climatico.
- Schlesinger, W.H. 1997. Biogeochemistry: An analysis of global change. New York: National Academy Press.
- Seebach L., McCallum I., Fritz S., Kindermann G., Leduc S., Böttcher H., Fuss S., Choice of forest map has implications for policy analysis: A case study on the EU biofuel target, *Environmental Science & Policy*, Volume 22, October 2012, Pages 13-24, ISSN 1462-9011, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2012.04.010>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901112000676>)
- SEMARNAT. 2009. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5107404&fecha=28/08/2009.
- SEMARNAT-INE. 2009. Cuarta Comunicación Nacional ante la CMNUCC. México. <http://cc2010.mx/assets/001/5140.pdf>.
- Settle, J. J. y Drake, N. A. (1993): Linear Mixing and the estimation of ground cover proportion. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, pp 1159-1177.
- Shanmugam P., Ahn Y., Shanmugam S. (2006). A comparison of the classification of wetland characteristics by linear spectral mixture modelling and traditional hard classifiers on multispectral remotely sensed imagery in southern India, *Ecological Modelling*, Volume 194, Pages 379-394, ISSN 0304-3800.
- Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Aragao, L.E.O., Huete, A. (2006). Using Fraction Images to Study Natural Land Cover Changes in the Amazon, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2103-2106.
- Short, N. M. (1982): *The Landsat Tutorial Workbook: Basics of Satellite of Remote Sensing*, Washington, D.C., NASA Scientific and Technical Information Branch. 2006: *The Remote Sensing Tutorial (An Online Handbook)*
- SIB (2005). Pre-procesamiento de imágenes. Recuperado de: www.sib.gov.ar/archivos/Protocolo_Landsat.pdf
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al., (2007). Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth*

- Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Press, C. U. (Ed.), Cambridge, UK.
- SRA. 2007. Programa Sectorial de Desarrollo Agrario 2007-2012. SRA. México.
- Stephens, B. B., et al., 2007. Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon uptake from Vertical Profiles of atmospheric Co₂. *Science*, Vol. 316. no. 5832, pp. 1732-1735. DoI: 10.1126/science.1137004.
- Tomlinson, R.F., (2005) "Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers". ESRI Press. 328 pp.
- Torres, J., Magaña, O., Moreno, F., 2008. Determinantes del cambio de uso/cobertura arbolada en México: un enfoque a través de probabilidades de transición. CIDE, Documento de Trabajo 450.
- TsendbazarN.E., Bruin S., HeroldM., Assessing global land cover reference datasets for different user communities, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Available online 17 March 2014, ISSN 0924-2716, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.008>.(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000458>)
- Turner, B., Moss, R., Skole, D. (1993). Relating land use and global land cover change. A proposal for IGBP-HDP core project (IGBP Report: 5). In Programme, I. G. B. P. a. t. H. D. –s. o. G. E. C. (Ed.) Stockholm.
- UNFCCC, 1998, PROTOCOLO DE KIOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, Kioto, Japón.
- UNFCCC, 2013. United Nations Framework Convention on Climate Change, disponible: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. (Consultado: 2013, Junio 05).
- UNFCCC, 2014. 20ª Conferencia de las Partes, Lima, Perú. Recuperado de: (http://unfccc.int/meetings/lima_dec_2014/meeting/8141.php)
- Vallejo, P. (2012). Los satélites en la actualidad. Recuperado de: www.scribd.com/doc/84501714/Los-Satelites-en-la-Actualidad
- Velázquez, A., Mas, J.F., Bocco, G., Palacio-Prieto, J.L., (2008). Mapping land coverchanges in Mexico, 1976–2000 and applications for guiding environmental man-agement policy. *Singapore Journal of Tropical Geography* 31, 152–162.

- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz, G.J., Mayorga, S. R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J.L. (2002a). “Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México”, *Gaceta Ecológica*, Num. 62. INE, México, pp. 21-37.
- Velázquez, A., Mas J.F., J.L. Palacio, J.R. Díaz, R. Mayorga, C. Alcántara, R. Castro y T. Fernández 2002. “Análisis de cambio de uso del suelo”. Informe técnico. Convenio INE Instituto de Geografía, UNAM.
- Verbesselt, J. and Kalomenopoulos, M. and Souza, C. and Herold, M. (2012). Near real-time deforestation monitoring in tropical ecosystems using satellite image time series, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, pp. 2020-2023.
- Vilanova, E. (2011). Adaptación de los bosques tropicales al cambio climático: una oportunidad para la investigación interdisciplinaria. *Revista Forestal Venezolana*, 55(1), pp. 93-101. Recuperado de: www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/33490/1/ensayo1.pdf
- Villar, A. (2008). Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes. Recuperado de: ocw.upm.es/.../TELEDETECCION/Teledeteccion/microsoft-word-teledete.
- Viola M. Flavio, Paiva L.D. Susana, Savi A. Marcelo, 2010, Analysis of the global warming dynamics from temperature time series, *Ecological Modelling* # 221 pag. 1964–1978.
- White, D. y Minang, P. (2011). Estimación de los Costos de Oportunidad de REDD+. Manual de capacitación. Recuperado de: finanzascarbono.org › Centro de Conocimiento › Biblioteca.
- Xie, Y., Z. Sha, and M. Yu. 2008. “Remote Sensing Imagery in Vegetation Mapping: A Review.” *Journal of Plant Ecology* 1: 9–23.
- Zambrano, E. (2009). Calentamiento global y cambio climático en Venezuela. Recuperado de: es.scribd.com/.../CALENTAMIENTO-GLOBAL-Y-CAMBIO-CLIMATICO
- Zapata, B y Anaya, J. (2011). Los sensores remotos en los proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero. Recuperado de: entornogeografico.com/index.php/EntornoGeografico/article/view/66.