



Universidad
de Alcalá

**Análisis de la deforestación en Venezuela: bases para
el establecimiento de una estrategia REDD+**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR:

Carlos Eduardo Pacheco Angulo

BAJO LA DIRECCIÓN DE LA

Dra. Inmaculada Aguado Suárez

Programa de doctorado en Tecnologías de la Información Geográfica

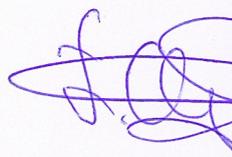
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA

Alcalá de Henares, Septiembre 2011

Dra. Inmaculada Aguado Suarez, profesora Titular de Universidad de la Universidad de Alcalá, en calidad de directora:

Informa que la tesis doctoral **“Análisis de la deforestación en Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD +”**, elaborada por D. Carlos Eduardo Pacheco Angulo, reúne las características adecuadas para su exposición y defensa pública en cuanto a rigor científico, aportaciones novedosas y aplicación adecuada de la metodología. Por ello, doy mi visto bueno para que se proceda al depósito y registro de esta Tesis Doctoral.

Alcalá de Henares, 22 de septiembre de 2011



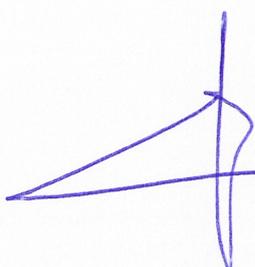
Fdo.: Inmaculada Aguado Suarez
Directora de Tesis

Dr. José Sancho Comíns, Catedrático de Análisis Geográfico Regional y Director de Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá:

Informa que el texto adjunto corresponde a la tesis de por D. Carlos Eduardo Pacheco Angulo, cuyo título es **“Análisis de la deforestación en Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD +”**.

Esta tesis reúne los requisitos propios de este tipo de trabajo: rigor científico, aportaciones novedosas y aplicación adecuada de la metodología. Por ello, doy mi visto bueno a dicha Tesis Doctoral.

Alcalá de Henares, 22 de septiembre de 2011



Fdo.: José Sancho Comíns
Director de Departamento

Agradecimientos

En primer lugar esta tesis está dedicada a mi familia, especialmente a mi abuela y mi madre, quienes con sus oraciones, bendiciones y ánimos me dieron las fuerzas suficientes para afrontar y lograr este gran reto en mi vida. Asimismo, a Ana Isabel que me brindó mucho ánimo y apoyo durante mis estudios doctorales.

La presente Tesis doctoral no hubiese sido posible sin el aporte de algunas instituciones y personas. De esta manera quiero agradecer a la Universidad de Los Andes por la beca otorgada, a la Dirección de Asuntos Profesorales y su personal administrativo de la sección de Becas y Años Sabáticos. Al Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, por su acogida y apoyo brindado.

A mi directora de tesis la Dra. Inmaculada Aguado Suárez quien en el momento más necesario de mi investigación me brindo su orientación y aportes para elaborarla. Le agradezco sinceramente sus acertadas correcciones y sugerencias, y el haberme tomado como uno de sus estudiantes. Y al Dr. Danilo Mollicone por haberme iniciado en esta línea de investigación necesaria para mi país y el planeta.

A la gran familia del sótano, Vanesa, Diego, John, Mariano, Ricardo, Raúl, Juan Pablo, Dante, Fernando, Pepe, Paco, Dani, Gorka, Marc, Stijn, Mavi, Wenses, Patricia, Carolina, Teresa, Verónica, Pablo Barreira, Lucrecia y Eva. Gracias el apoyo que me dieron de alguna u otra manera durante la tesis, por hacer que mi estancia en tierras ibéricas, fuera muy alegre y amena, siempre los recordaré y los llevaré en mi corazón.

A mis compatriotas y grandes amigos en España, la familia Roulue Montes: Ana, Michael, Michele y Marc, muchas gracias por el gran apoyo, consejo y ánimos, necesarios, durante mi investigación, los aprecio y estimo.

A las personas que me brindaron apoyo científico y de datos necesarios para llevar a cabo la tesis: Leonardo Lugo, Américo Catalán y Jean Carlos Marquina de la Dirección General de Bosque del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente; Otto Huber de la Fundación Instituto Botánico de Venezuela; Hugh Eva y Frédéric Achard de la JRC

de la Comunidad Europea; John Clark del Institución Carnegie para la Ciencia; Mariela Loaiza, Omar Márquez y Lisandro Ramírez de la Coordinación Técnico Científico Ambiental del Ministerio Público; Emilio Vilanova, Ernesto Arends, Ernesto Flores, Alexander Parra, José Lozada, Kicke Gámez, Omar Carrero, Arturo Osorio y Hernán Maldonado de la Universidad de los Andes; Ramiro Salcedo del Laboratorio de Procesamiento Avanzado de Imágenes de Satélite (LPAIS) de Venezuela.

Y por último quisiera dar las gracias a los profesores Ennio Pozzobon, Alex Barrios, Elvecio Pernía, Guzmán García † y Juan López, quienes me iniciaron en el mundo de los sensores remotos y los sistemas de la información geográfica, dándome buenas bases científica y académicas necesarias para el desarrollo de mi vida profesional.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Resumen..... | 1 |
| Abstract..... | 3 |
| Introducción..... | 5 |
| Estructura de la tesis..... | 9 |
| Referencias..... | 19 |
| Capítulo I. Las Causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo..... | 23 |
| Resumen..... | 25 |
| Abstract..... | 25 |
| 1. Introducción..... | 25 |
| 1.1. Área de estudio..... | 28 |
| 1.2. Historia de los cambios del bosque en Venezuela..... | 28 |
| 1.3. Datos..... | 31 |
| 2. Metodología..... | 32 |
| 3. Resultados..... | 33 |
| 3.1. Causas principales..... | 34 |
| 3.2. Causas subyacentes..... | 37 |
| 4. Conclusiones..... | 41 |
| 5. Agradecimientos..... | 42 |
| 6. Referencias..... | 42 |
| Capítulo II. Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos..... | 45 |
| Resumen..... | 47 |
| Abstract..... | 47 |
| 1. Introducción..... | 48 |
| 2. Materiales y métodos..... | 49 |
| 2.1. Área de estudio..... | 49 |
| 2.2. Datos..... | 50 |
| 2.3. Métodos..... | 52 |
| 2.3.1. Homogenización de los datos..... | 52 |
| 2.3.2. Detección de cambios en la cobertura vegetal..... | 53 |
| 2.3.3. Validación..... | 54 |
| 3. Resultados..... | 56 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1. Evolución de las superficies de vegetación boscosa..... | 56 |
| 3.2. Detección de cambios en la cobertura vegetal..... | 58 |
| 4. Discusión..... | 61 |
| 4.1. Dinámica de la deforestación..... | 61 |
| 4.2. Validación..... | 63 |
| 5. Conclusiones..... | 64 |
| 6. Agradecimientos..... | 65 |
| 7. Referencias..... | 66 |
| Capítulo III. Delimitación y caracterización de aéreas “hot spot” de deforestación en Venezuela, a partir de imágenes de satélite y consulta a expertos..... | 69 |
| Resumen..... | 71 |
| Abstract..... | 71 |
| 1. Introducción..... | 72 |
| 2. Materiales y métodos..... | 75 |
| 2.1. Área de estudio..... | 75 |
| 2.2. Materiales..... | 75 |
| 2.2.1. Imágenes MODIS..... | 75 |
| 2.2.2. Imágenes Landsat..... | 76 |
| 2.2.3. Información auxiliar..... | 76 |
| 2.3. Metodología..... | 76 |
| 2.3.1. Identificación y delineación de las áreas hot spot con imágenes MODIS..... | 77 |
| 2.3.1.1. Compuestos Anuales..... | 78 |
| 2.3.1.2. Clasificación basada en árboles de decisión (2005-2010)..... | 78 |
| 2.3.2. Definición de áreas hot spot a partir de la consulta a expertos..... | 80 |
| 2.3.3. Validación con imágenes Landsat..... | 81 |
| 2.3.3.1. Corrección del efecto de desenfoque de la imagen..... | 81 |
| 2.3.3.2. Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME)..... | 82 |
| 2.3.3.3. Segmentación de las imágenes de fracción suelo..... | 82 |
| 2.3.3.4. Clasificación supervisada..... | 83 |
| 2.3.4. Criterios de validación..... | 83 |
| 3. Resultados..... | 83 |
| 3.1. Cartografía de áreas hot spot a partir de datos MODIS..... | 83 |
| 3.2. Cartografía de áreas hot spot derivada de la consulta a expertos..... | 87 |
| 3.3. Validación..... | 88 |
| 4. Discusión..... | 89 |

| | |
|---|------------|
| 5. Conclusiones..... | 94 |
| 6. Agradecimientos..... | 96 |
| 7. Apéndice..... | 97 |
| 8. Referencias..... | 99 |
| Capítulo IV. Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD+: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolanos..... | 101 |
| Resumen..... | 103 |
| Abstract..... | 103 |
| 1. Introducción..... | 104 |
| 2. Caracterización de las metodologías utilizadas en el monitores de la deforestación..... | 107 |
| 3. Materiales y métodos..... | 109 |
| 3.1. Área de estudio..... | 109 |
| 3.2. Datos..... | 111 |
| 3.2.1. Imágenes Landsat..... | 111 |
| 3.2.2. Imágenes Spot..... | 111 |
| 3.2.3. Información Auxiliar..... | 111 |
| 3.3. Métodos..... | 112 |
| 3.3.1. Definición de criterios para la comparación..... | 112 |
| 3.3.2. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con PRODES..... | 113 |
| 3.3.3. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con FSI..... | 114 |
| 3.3.4. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con FRA RSS – TREES 3..... | 114 |
| 3.3.5. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con CLASlite..... | 115 |
| 3.4. Validación de resultados..... | 116 |
| 4. Resultados..... | 118 |
| 4.1. Mejoramiento espectral y segmentación de imágenes..... | 118 |
| 4.2. Cartografía de bosque – no bosque y deforestación..... | 121 |
| 4.3. Validación de la cartografía de bosque – no bosque y deforestación. A partir de la matriz de confusión..... | 123 |
| 4.4. Validación de la cartografía de deforestación a partir de técnicas de regresión..... | 125 |

| | |
|--|-----|
| 5. Discusión..... | 126 |
| 6. Conclusiones..... | 128 |
| 7. Agradecimientos..... | 130 |
| 8. Referencias..... | 130 |
| Capítulo V. Estimación de las emisiones de CO₂ procedentes de la deforestación y degradación del bosque en la reserva forestal de Caparo, Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+ | 135 |
| Resumen..... | 137 |
| Abstract..... | 138 |
| 1. Introducción..... | 139 |
| 2. Área de estudio..... | 143 |
| 3. Materiales y métodos..... | 144 |
| 3.1. Material..... | 144 |
| 3.1.1. Imágenes Landsat..... | 144 |
| 3.1.2. Información Cartográfica Auxiliar..... | 145 |
| 3.1.3 Datos de campo..... | 145 |
| 3.2. Métodos..... | 146 |
| 3.2.1. Datos de actividad..... | 147 |
| 3.2.1.1. Cartografía de deforestación..... | 148 |
| 3.2.1.2. Cartografía de Degradación..... | 150 |
| 3.2.1.3. Validación de la cartografía..... | 151 |
| 3.2.2. Factores de emisión..... | 153 |
| 4. Resultados y discusión..... | 154 |
| 4.1. Cartografía de la deforestación y degradación del bosque..... | 154 |
| 4.2. Validación de la cartografía de bosques..... | 157 |
| 4.3. Estimación de biomasa del bosque y emisiones de CO ₂ | 158 |
| 4.4. Bases para el establecimiento de una estrategia REDD+ en la RFC..... | 161 |
| 5. Conclusiones..... | 163 |
| 6. Agradecimientos..... | 164 |
| 7. Referencias..... | 165 |
| Conclusiones y futuras líneas de investigación..... | 173 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura I.1. Mapa de vegetación de Venezuela 2010..... | 27 |
| Figura I.2. Regiones identificadas para el análisis retrospectivo de las causas de la deforestación en Venezuela..... | 32 |
| Figura I.3. Causas principales y subyacentes identificadas para el análisis de los cambios del bosque en Venezuela..... | 34 |
| Figura I.4. Frecuencias porcentuales de las causas principales y subyacentes en las épocas y regiones analizadas..... | 35 |
| Figura I.5. Los patrones causales y la dinámica de este sistema, comúnmente, conducen a la deforestación en Venezuela..... | 39 |
| Figura II.1. Regiones identificadas en Venezuela para el análisis de la dinámica de la deforestación..... | 50 |
| Figura II.2. Cobertura de los bosques en Venezuela en la serie de tiempo analizada. Distribución espacial (a) y su superficie forestal en miles de ha, en las distintas regiones (b)..... | 57 |
| Figura II.3. Pérdidas, ganancias y cambios netos, generados de las matrices de confusión, para cada par de mapas secuencialmente y tomando como referencia la primera fecha de la serie temporal. Datos expresados en miles de ha..... | 59 |
| Figura II.4. Tasa anual de deforestación, en porcentaje, para cada par de series de tiempo analizadas..... | 59 |
| Figura II.5. Dinámica porcentual acumulada de las pérdidas y ganancias de los bosques, en cada par de series de tiempo, tomando como referencia la primera fecha (1920). Datos para todo el país, y por regiones..... | 60 |
| Figura II.6. Pérdidas, ganancias y bosques estables en Venezuela, durante los periodos de 1920-2008..... | 61 |
| Figura III. 1. Esquema metodológico..... | 77 |
| Figura III. 2. Árboles de Decisión utilizados en los compuestos anuales de 2005 y 2010..... | 79 |
| Figura III.3. Composición falso color de las bandas (521) de los compuestos anuales para el año 2005 (3a) y 2010 (3b); y mapa de cobertura vegetal 2005 (3c) y 2010 (3d)..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura III. 4. a) Mapa de áreas “hot spot” obtenido con datos MODIS (2005-2010); b) Zonas de validación: 1. Cuenca alta del río Grita; 2. Reserva Forestal de Caparo; 3. Cuenca alta del Caura; 4. Yacimiento minero, Las Cristalinas; 5. Asentamiento minero, Icabarú..... | 86 |
| Figura III. 5. Localización de las áreas hot spot, obtenidas mediante la consulta a expertos, sobre la composición falso color (521) de los compuestos anuales de 2005 | 87 |
| Figura III.6. Zona 2 de validación (Reserva forestal de Caparo); 6a y 6b composiciones falso color (453) de Landsat ETM+ en los años 2004-6a y 2009-6b; 6c y 6d imágenes sintéticas de fracción suelo, 6e y 6f imágenes clasificadas: bosque (verde oscuro), arbustales (verde claro), sabanas (amarillo); y 6g y 6h imágenes bosque (verde oscuro) y no bosque (blanco)..... | 91 |
| Figura IV.1. Ubicación del área de estudio..... | 110 |
| Figura IV.2. Ubicación de las parcelas de muestras en la Reserva Foresta de Caparo..... | 117 |
| Figura IV.3. Composición en falso color (453) del extremo oeste del área de estudio (a) 2007 y (b) 2009, imagen de fracción de Suelo (c) 2007 y (d) 2009 y Vegetación Fotosintética (e) 2007 y (f) 2009..... | 119 |
| Figura IV.4. Composición RGB (Suelo, Vegetación, Sombra) para PRODES 2007 (a) y 2009 (b) y RGB (Vegetación Fotosintética, Vegetación No Fotosintética y Superficie descubierta) para CLASlite 2007 (c) y 2009 (d)..... | 120 |
| Figura IV.5. Segmentación: Fracción Suelo 2007 (5a) y 2009 (5b), de la imagen multitemporal sobre la composición 453 2007 (5c) y 2009 (5d), y unión de los segmentos de bosque - no bosque de 2007 (5e) y 2009 (5f)..... | 121 |
| Figura IV.6. Bosques obtenidos mediante PRODES (a y b), FSI (c y d), FRA RSS - TREES 3 (e y f) y CLASlite (g y h), respectivamente, para los años 2007 y 2009..... | 122 |
| Figura IV.7. Pérdida del bosque (rojo) con PRODES (a), FSI (b),- FRA RSS - TREES 3 (c) y CLASlite (d)..... | 122 |
| Figura IV.8. Precisión global e índice kappa de la cartografía de bosques en 2007, 2009 y de pérdida del bosque..... | 123 |
| Figura IV.9. Errores de comisión y omisión, para bosque y no bosque de la cartografía 2007 y 2009, y para pérdida y no pérdida de la cartografía de | |

| | |
|---|-----|
| deforestación entre 2007 y 2009..... | 124 |
| Figura IV.10. Regresión lineal entre los datos porcentuales de la validación (imágenes SPOT) y la cartografía de deforestación según los distintos métodos..... | 126 |
| Figura V. 1. Ubicación del área de estudio. Imagen Landsat del 2011..... | 144 |
| Figura V. 2. Esquema metodológico utilizado en este trabajo..... | 148 |
| Figura V. 3. Distribución aleatoria de los puntos muestrales en la categoría bosque (rojo) y no bosque (azul) para el año de 1990, sobre el mapa reclasificado de 1987..... | 152 |
| Figura V. 4. Bosques y degradación del bosque para 1990, 2000 y 2010 en la RFC..... | 155 |
| Figura V. 5. Deforestación para los periodos 1990-2000 y 2000-2010 en la RFC..... | 156 |
| Figura V. 6. Áreas deforestadas y número de incendios activos detectados por MODIS dentro de la RFC para el período 2000-2010..... | 157 |
| Figura V. 7. Dinámica temporal de la biomasa aérea y carbono en bosques de la RFC. El carbono corresponde al 50% de la biomasa aérea..... | 159 |

Lista de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Lista de publicaciones derivada de la tesis..... | 15 |
| Tabla II.1. Homogenización de la leyenda y sistemas cartográficos de los mapas utilizados en la comparación..... | 52 |
| Tabla II.2. Estudios sobre deforestación realizados en Venezuela, utilizados en la validación..... | 55 |
| Tabla III.1. Elaboración propia. Descripción de los procesos de cambio en cada área hot spot. Datos obtenidos a partir de la consulta a expertos..... | 97 |
| Tabla III.2. Resultado de las zonas de validación..... | 88 |
| Tabla IV.1. Resumen de las características de las metodologías para el monitoreo de la deforestación..... | 109 |
| Tabla V. 1. Índices de fiabilidad de los mapas de bosque de 1990, 2000 y 2010..... | 158 |
| Tabla V.2. Valores base de la biomasa, carbono y equivalentes para el cálculo de las emisiones..... | 160 |
| Tabla V.3. Emisiones anuales de CO ₂ para los periodos 1990-2000 y 2000-2010 en la RFC..... | 160 |

Resumen

Los bosques a lo largo del tiempo han proporcionado servicios a los seres humanos, desde el suministro de alimentos, fibras, medicamentos, y similares, hasta elementos menos evidentes en nuestras vidas como las influencias culturales y recreativas. Estas actividades han generado tanto procesos de deforestación donde las tierras forestales han pasado a ser superficies no forestales como de degradación, donde los bosques se deterioran por el establecimiento de carreteras rurales, caída de árboles, incendios forestales ó usos locales de la madera.

Estos procesos han ocasionado problemas ambientales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la sostenibilidad de la agricultura, el sumidero de agua potable ó las alteraciones en el ciclo de carbono. Los impactos de dichos problemas son globales y están siendo considerados por la comunidad científica internacional, mediante el establecimiento de políticas que mitiguen el efecto de dichos impactos.

En tal sentido, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), considerando que los bosques son sumideros importantes de carbono y que su deforestación y degradación producen emisiones considerables de carbono a la atmosfera, ha puesto en marcha el programa de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+), con el objetivo de investigar los elementos técnicos capaces de minimizar estas emisiones, en los países en vía de desarrollo.

Venezuela es uno de los diez países tropicales que según la FAO ha poseído mayor tasa de deforestación en las última dos décadas. Situación esta preocupante ya que más del 50% de su territorio está cubierto por bosque, de estos más del 90% se encuentran en la Amazonía venezolana, que representa un 5,6% del total de la Amazonía. Estos datos hacen que Venezuela sea considerada como uno de los 17 países con mayor índice de biodiversidad de la Tierra.

Es por ello, que en esta tesis doctoral se planteó como objetivo realizar un análisis de la deforestación en Venezuela, con el fin de generar las bases para el establecimiento de una estrategia REDD+, en el marco de la UNFCCC. Para esto se establecieron cinco capítulos: en el Capítulo I, se identificaron las causas de la deforestación en Venezuela, mediante un estudio retrospectivo, desde la época precolombina hasta

nuestros días; en el Capítulo II, se realiza una reconstrucción histórica para evaluar la dinámica de los bosques en Venezuela desde 1920 hasta 2008; en el Capítulo III, se identificaron, las áreas “hot spot” de deforestación en los bosques de Venezuela, áreas que representaron un cambio rápido en la cobertura del bosque en los últimos 5 años (2005-2010); en el Capítulo IV, se determinó cuál de las metodologías disponibles para el monitoreo de pérdidas de bosques tropicales, se adapta mejor a las características de los Llanos venezolanos; y en el Capítulo V, se realizó dentro del marco metodológico del IPCC, un análisis de la deforestación y degradación del bosque, así como una estimación de la cantidad de emisiones de CO₂ procedentes de la pérdida de bosques.

Abstract

For a long time forests have provided services for the human being, from supplying food, fibers, medicines, and so on, to less evident elements in our lives like cultural influences and recreational activities. All these activities have generated deforestation processes, in which forests have been replaced by other land uses, and degradation processes, that deteriorate forests due to the creation of new rural roads, tree felling, wildfires or local wood uses.

These processes have created environmental issues like climate change, lost of biodiversity, agriculture sustainability, drinking water sink or alterations in the carbon cycle. The impacts of these issues are global and are being managed by the global scientific community by implementing policies that mitigate the effect of these impacts.

In this sense, the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) considering that forests are an important carbon sink and its deforestation and degradation produce considerable carbon emissions into the atmosphere, has put in place the The United Nations Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries (REDD+), with the goal of researching techniques capable of minimizing this emissions in developing countries.

Venezuela is one of the ten tropical countries, according to the FAO, with the highest deforestation rates in the last two decades. This situation is worrying due to the fact that 50% of its territory is covered with forests, 90% part of the Venezuelan Amazonia, which represent 5,6% of the whole Amazonia. These facts make Venezuela one of 17 countries with the highest biodiversity index in the Earth.

This is the reason why this doctoral thesis decided to set its goal in the deforestation analysis in Venezuela, with the purpose of generating the basis for the implementation of a REDD+ strategy in the framework of the UNFCCC. To accomplish this five chapters were made: in Chapter 1, the deforestation causes for Venezuela were identified, following a retrospective study, from pre-Columbian era to the present day; in Chapter II, historical reconstruction to evaluate the forests dynamics in Venezuela from 1920 to 2008; Chapter III, hot spot deforestation areas in Venezuela's forests

were identified, areas in which a fast change in forest land cover was detected during the last 5 years (2005-2010); in Chapter IV, it was determined which of the available methodologies for monitoring deforestation in tropical forest adapted better to the characteristics of the 'Llanos venezolanos'; and in Chapter V, an analysis of deforestation and forest degradation in the framework of the IPCC was carried out, as well as an estimation of the CO₂ emissions due to forest lost.

Introducción

Según los resultados de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales del 2010, más conocido como FRA2010 (FAO, 2010), los bosques cubren el 31% del área total de tierras emergidas (algo más de 4.000 millones de ha). A pesar, de que en el último período del 2000-2010 los bosques muestran señales de recuperación, su tasa de deforestación continúa siendo alarmante. Ejemplo de ello, Suramérica y África, que experimentaron las mayores pérdidas netas anuales de bosques, con 4 y 3,4 millones de ha, respectivamente durante ese período. La causa principal más importante, es la conversión de los bosques tropicales en tierras agrícolas y pecuarias (Geist and Lambin, 2002; Rudel *et al.*, 2009; DeFries *et al.*, 2010).

Esta situación es inquietante, ya que en estos ecosistemas tropicales se almacena la mayor cantidad de carbono en la vegetación, a escala global, con una biomasa aérea que promedia cerca de 300 a 600 Mg de carbono ha⁻¹, valores muy superiores a otros bosques en el mundo (Brown, 1997; Malhi *et al.*, 1999). Los bosques tropicales funcionan como sumideros importantes de captura de carbono, aproximadamente el 15% de las emisiones antrópicas de carbono a escala global (Trumper *et al.*, 2009). Sin embargo, debido a estos procesos de deforestación, aproximadamente 1,6 billones de toneladas de carbono son emitidas, añadiendo a la atmósfera una cantidad de carbono equivalente entre el 10 y 20% del total de las emisiones globales (IPCC, 2007; Houghton, 2010; Kanninen *et al.*, 2010). Esta deforestación viene acompañada, inicialmente de procesos de degradación del bosque, que a pesar de no producir 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 explotación forestal selectiva (camino forestales, patios de acopios o la caída de árboles, entre otras), los incendios forestales ó la sobreexplotación de leña u otros usos locales de la madera (GOFC-GOLD, 2010).

Tanto la deforestación como la degradación de los bosques tropicales han comenzado a ser consideradas, por la comunidad científica internacional del cambio climático, como un factor de mucha 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 2005, en la COP-11 (11^a

Conference of Parties), celebrada en Montreal, allí se puso un marcha un mecanismo para investigar los elementos técnicos capaces de reducir estas emisiones, originando el programa REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Degradation*) para los países en vías de desarrollo. Posteriormente, en la COP-15, celebrada en Copenhague (2009), se discutieron los elementos metodológicos del mecanismo para dar inicio a las iniciativas REDD+ con apoyo financiero por parte de los países desarrollados (FCCC/CP/2009/11/Add.1, 2009). En la última COP-16, celebrada en Cancún (2010), se incluyeron nuevos enfoques políticos para gestionar lo relativo a las reducciones de las emisiones, considerando el papel fundamental de la conservación, gestión sostenible de los bosques y el aumento de las existencias de carbono forestal en los países en desarrollo (Draft/decision/CP.16, 2010).

Adicionalmente a este esfuerzo internacional, la comunidad científica debe proporcionar elementos importantes para conocer los factores causales y la dinámica histórica de la deforestación a nivel nacional. En tal sentido, para analizar los factores causales existen métodos basados en el estudio de casos a nivel local, que explican el modelo causal de la deforestación tropical (Wibowo and Byron., 1999; Mather and Needle., 2000). Los estudios de casos a nivel local identifican las causas de las pérdidas de la cobertura vegetal, a través de análisis estadísticos, como el exploratorio de datos, regresión, estadísticas bayesianas y redes neuronales artificiales (Lesschen *et al.*, 2005), o a través del análisis de la literatura (Lambin *et al.*, 2003; Lambin and Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010). Mientras, para analizar la dinámica histórica, existen métodos consistentes en aplicar análisis de detección de cambios en la cobertura, a partir de mapas históricos (Petit and Lambin, 2001, 2002). Petit y Lambin (2002) realizaron la reconstrucción histórica de los cambios en la cubierta terrestre en la población de Lierneux Ardennes (Bélgica) en los últimos 225 años, a partir de una serie temporal de datos heterogéneos. En dicho estudio se utilizó un método de integración de datos que consistió, por un lado, en la generalización de la leyenda de los mapas y, por otro, en la agregación espacial de cada mapa, llevando a una resolución espacial de 400 m. Esta metodología permitió cuantificar, la tasa anual de deforestación en un 1,40%.

De igual manera, la comunidad científica debe proporcionar métodos que estimen con precisión los porcentajes de emisión de CO₂, ya que éstos tienen una 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 garantizar

mayor precisión y así disminuir estas incertidumbres, las estimaciones tienen que apoyarse en la creciente disponibilidad de datos e información a escala global (Ramankutty *et al.*, 2006). Tal es el caso de los datos procedentes de imágenes de satélite, que combinándolos con medidas de campo proporcionan un elemento clave, en la determinación de la pérdida de la cubierta forestal y en consecuencia, en las estimaciones de carbono. En la actualidad, estos datos se utilizan para estimar las tendencias de la deforestación, siguiendo cuatro enfoques principalmente (Achard *et al.*, 2010).

El primer enfoque se basa en la identificación de áreas “hot spot” de deforestación, que son áreas que tuvieron un cambio rápido en la cobertura vegetal en los últimos años, a escala global (Lepers *et al.*, 2005) ó a escala regional (Achard *et al.*, 1997; Achard *et al.*, 2006). El segundo, es un enfoque anidado, que utiliza imágenes de baja resolución espacial para realizar un análisis de cobertura wall-to-wall y así identificar las zonas deforestadas, y posteriormente, en estas áreas determinar la pérdida del bosque a partir de imágenes de resolución espacial media (Morton *et al.*, 2005; Potapov *et al.*, 2008; Bontemps *et al.*, 2009). El tercer enfoque, es realizado mediante un muestreo estadístico sistemático, a partir de imágenes de resolución espacial media (Achard *et al.*, 2010; Eva *et al.*, 2010). El cuarto, es un enfoque de análisis de cobertura wall-to-wall, con imágenes de resolución espacial media, que cubre la extensión boscosa total de un país ó región (FSI, 2009; INPE, 2010).

Conocer los factores causales y la dinámica histórica de los procesos de deforestación a nivel nacional, así como la utilización de los datos de sensores remotos para realizar estimaciones más precisas de estos procesos, es clave para aquellos países en desarrollo que estén dispuestos a realizar un inventario nacional de GEI (Gases de Efecto Invernadero), teniendo en cuenta las recientes decisiones sobre REDD+. Por su parte, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) ofrece en su guía de buenas prácticas un marco metodológico para llevar a cabo estas estimaciones (IPCC, 2003, 2006). No obstante, en el momento actual no existe una visión clara sobre cómo abordar los mecanismos REDD+ desde el punto de vista científico y metodológico (Maniatis and Mollicone, 2010).

En este sentido, Venezuela es uno de los diez primeros países tropicales que posee una de las mayores tasas de deforestación con -0,61% equivalente a -288.000 ha/año de bosque para el período 2005-2010 (FAO, 2010), estas deforestaciones junto a los

cambios de uso de la tierra son los responsables, de la actual situación del deterioro de la vegetación del país. Históricamente este país ha poseído mayor superficie de bosque, puesto que las únicas áreas desprovistas de vegetación boscosa se ubicaban en los Andes y en los Llanos Centrales (Munder, 2003). Esta situación es preocupante, en virtud que Venezuela posee, según el informe FRA 2010 (FAO, 2010) un 50,49% de su superficie ocupada por bosque (46.275.000ha). De estos bosques, el 91,37% pertenecen a la Amazonía venezolana, que ocupa el 5,6% del total de los bosques Amazónicos (JRC, 2005). Todo ello hace que Venezuela se sitúe entre los 45 países del mundo que poseen una superficie forestal superior al 50% de su territorio y entre los 15 países con mayor área de bosques primarios y quinto con mayor superficie de bosques en Suramérica. Por otro lado, se sitúa en el quinto lugar, a nivel mundial, en cuanto a diversidad de especies vegetales, con unas 21.073 especies inventariadas (Aguilera *et al.*, 2003).

Por otro lado, Venezuela en la actualidad no cuenta con cifras globales sobre el potencial de captura de carbono. Sin embargo, algunos estudios han estimado un rango de biomasa aérea entre 70 a 179 toneladas (t/ha) para individuos arbóreos con un diámetro > 10 cm (diámetro a la altura de pecho (D) = 1,3 m por encima del suelo) en cinco biomas del país (Delaney *et al.*, 1997). Asimismo, a escala regional, se ha estimado una biomasa aérea de $237 \pm 49 \text{ Mg ha}^{-1}$, para la cuenca del río Caura, en la Guayana venezolana (Hernández, 2001). De igual manera se ha incluido información acerca de los bosques venezolanos en investigaciones hechas a escala regional por Malhi *et al.* (2006).

Con respecto a las emisiones de GEI, Venezuela en su primera comunicación sobre el cambio climático (MARN, 2005), estimó que el 44,62% de las emisiones de CO₂, para el año 1999 provenían de la industria energética (petróleo, gas y generación hidroeléctrica), el 32,09% del sector transporte (terrestre y aéreo), el 14,13% de la industria manufacturera (hierro, acero, pulpa y papel, alimentos), el 5,18% del sector residencial, el 2,43% de las fugas y venteos, el 1,17% del sector comercial y el 0,37% de los sectores agrícola, forestal y pesquero (cambio de uso de la tierra, principalmente). Recientemente, según información oficial (MinAmb, en línea¹) se indica que las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) presentaron fluctuaciones entre 1997 hasta 2006, con un valor mínimo de 131,8 millones de

¹ <http://www.minamb.gob.ve/files/planificacion-y-presupuesto/IndicadoresAmbientales.htm>

toneladas métricas (MtC) en 1997 y un máximo de 172,5 MtC en 2003. Entre 2004 y 2006 se observó un incremento en las emisiones, al pasar de 135,9 MtC en 1999 a 171,5 en 2004, lo que representa un incremento del 26%.

Existen otras estimaciones que han asignado un mayor porcentaje de emisiones a los procesos procedentes de cambios en el uso de la tierra, principalmente por los intensos procesos de deforestación que han existido en Venezuela. En este sentido, se estimó que un 44% de las emisiones nacionales de CO₂ para el período de 1980-1990, es debido a la pérdida de 520.000 ha/año de bosques (Bonduki and Swisher, 1995). Asimismo, para el período 2000-2005 se estimaron 46,1 MtC /año de emisión global de CO₂ (Murray and Olander, 2008), esto representaría un poco más de la mitad de las emisiones nacionales del año 2000. Mientras, otro estudio presentado indica que para el periodo 1990-2000 hubo una disminución de casi un 3,5% anual de estas emisiones (CAIT, 2008).

En este contexto, se plantea como objetivo de esta tesis doctoral realizar un análisis de la deforestación en Venezuela, con el fin de generar las bases para el establecimiento de una estrategia REDD+, en el marco de la UNFCCC, que contemplan el establecimiento sólido y transparente de un sistema de vigilancia de los bosques, adoptado a nivel nacional, que utilice una combinación de sensores remotos y de inventarios de carbono de los bosques para estimar las emisiones de los GEI.

Estructura de la tesis

Esta tesis doctoral se plantea en cinco capítulos básicos, con formato de artículos, precedidos de este capítulo introductorio, y seguidos por el capítulo final de conclusiones y líneas futuras de investigación. Esta colección de artículos tienen un hilo conductor que apunta los primeros pasos necesarios para que cualquier país en desarrollo pueda establecer una estrategia REDD+. En este sentido, la tesis se inspira en la decisión 4/CP.15 generada en el COP-15 de Copenhague (2009), en la cual se establecieron los siguientes aspectos: *“Orientación metodológica para las actividades relacionadas con la reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques y el papel de la conservación, gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas forestales de carbono en los países en desarrollo”* (FCCC/CP/2009/11/Add.1, 2009).

Es por ello, que el **Capítulo I** titulado “*Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo*” se inicia con la identificación de las causas de la deforestación en Venezuela. Este objetivo es abordado mediante un estudio retrospectivo de las causas principales y subyacentes que han conducido a los procesos de deforestación en Venezuela, en función de una la delimitación espacio-temporal, definida desde la época precolombina hasta nuestros días y siguiendo una demarcación del país en cuatro regiones diferentes. Los criterios adoptados para la identificación de las diferentes causas, fueron tomados de Geist y Lambin (2001) que explicaron el modelo causal de la deforestación en los bosques tropicales. Estos criterios sirvieron para definir y analizar las actividades humanas que afectan directamente al medio ambiente. Las actividades identificadas se reunieron en cinco grandes grupos de causas principales, estos fueron: la expansión agrícola, la extensión de infraestructuras, la explotación maderera, la explotación minera y la presencia de conflictos sociales. De igual manera, se definieron las fuerzas subyacentes que sustentan o motivan las causas principales de la deforestación en Venezuela. De esta forma, se han encontrado cinco grandes grupos de factores: demográficos, económicos, tecnológicos, políticos e institucionales, y culturales.

Tanto las causas principales como las subyacentes fueron identificadas en la revisión bibliográfica y posteriormente se analizaron y cuantificaron conforme a la frecuencia de su aparición en las distintas fuentes analizadas y en los tiempos y en los espacios definidos en el estudio. Estas frecuencias, fueron expresadas porcentualmente de acuerdo a su presencia sobre el total de veces que se observó. Esto permitió realizar un análisis individual para cada grupo de causas principales y subyacentes, para determinar de acuerdo a su porcentaje, la influencia en los procesos de deforestación.

Una vez determinados los elementos causales de la deforestación en Venezuela, fue necesario evaluar, desde un punto de vista histórico, cuáles han sido las pérdidas y ganancias de los bosques del país. Es por ello, que se planteó como objetivo en el **Capítulo II**: “*Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos*”, realizar una reconstrucción histórica para evaluar la dinámica de los bosques en Venezuela. El estudio se llevo a cabo utilizando técnicas de detección de cambios aplicadas a una serie de seis mapas históricos, que abarcaron el período de 1920 hasta 2008. La combinación de estos mapas requirió una generalización del contenido temático, donde las categorías de cada mapa se agruparon en dos categorías, bosque y no bosque. Posteriormente, se realizó una

homogenización de formato y de proyección cartográfica, mediante la transformación a un formato digital único, ya que los mapas se encontraban en diferentes formatos (analógico y digital) y en diferentes referencias cartográficas (proyecciones y esferoide).

Una vez homogeneizados los datos, se identificaron las áreas de bosque en Venezuela, entre 1920 y 2008, y se aplicó un análisis de detección de cambios en la cobertura vegetal, por medio de una tabulación cruzada, que se efectuó mediante dos enfoques, propuestos por Petit y Lambin (2002): el primero compara cada par de mapas de la serie temporal y el segundo toma como referencia el mapa de la primera fecha (1920), y a partir de éste se realiza la detección de cambios con los demás mapas de la serie. Este doble enfoque permitió obtener una matriz de confusión por cada detección de cambios, y a partir de éstas se derivaron las pérdidas, ganancias y cambios netos, mediante las ecuaciones planteadas por Pontius *et al.* (2004). De igual manera, se calcularon las tasas de deforestación a través de la ecuación planteada por Sader y Armond (1988). Con el propósito de contrastar los cambios identificados en la cobertura forestal en Venezuela a través de la detección de cambios, y conocer la magnitud de estos cambios mediante sus respectivas tasas, se consultaron estudios locales sobre deforestación.

Después de conocer los elementos causales de la deforestación y la dinámica de los bosques en Venezuela se tiene una idea más clara de la problemática inherente a los procesos de deforestación en el país, así como las áreas que históricamente se han visto más afectadas. Esto es fundamental para el establecimiento de los mecanismos REDD+, ya que a partir de este conocimiento serán más efectivas las estrategias que se implanten para hacer frente a estos procesos de deforestación.

Otro de los aspectos a considerar a la hora de generar las bases en el establecimiento de las estrategias REDD+. Es la creación de un sistema de monitoreo sólido y transparente para vigilancia del bosque, en este sentido, la utilización de los datos procedentes de los sensores remotos es fundamental. La aplicación de estos datos para el monitoreo de la deforestación se realiza a través de dos técnicas de análisis: el wall-to-wall y el muestreo (GOFC-GOLD, 2010). El análisis wall-to-wall cubre la superficie total de la zona boscosa a evaluar, es decir, toda la vegetación de un país ó región, mientras que el muestreo se realiza sólo en algunas áreas boscosas, de

manera sistemática y a intervalos regulares ó de manera estratificada y concentrada, sólo en las áreas de deforestación.

En este contexto, un país en desarrollo que esté dispuesto a realizar un inventario nacional de GEI, tomando en cuenta los procesos de deforestación y degradación del bosque, tiene que considerar su extensión territorial, ya que dependiendo de ésta, variará el numero de imágenes satelitales a utilizar, y el tipo de análisis a definir para el monitoreo. En tal sentido, para abarcar todo el territorio venezolano se requieren 75 imágenes Landsat, si se considerara realizar un análisis wall-to-wall; es por ello, que en Venezuela cobra valor el análisis de muestreo, ya que la información cartográfica de los bosques y su potencial captura de carbono, poseen muchas deficiencias.

Con vistas a cubrir estas carencias en el **Capítulo III** de la tesis titulado: *“Delimitación y caracterización de aéreas “hot spot” de deforestación en Venezuela, a partir de imágenes de satélite y consulta a expertos”* se plantea como objetivo la identificación de las áreas “hot spot” de deforestación en los bosques de Venezuela. Para ello se diseñó un muestreo estratificado. Los “hot spot” son áreas que presentaron la conversión directa de tierras forestales a tierras no forestales en los últimos 5 años (2005-2010). La identificación y delineación de las áreas “hot spot” de deforestación en la cubierta forestal se llevó a cabo a través de dos vías. En la primera se aplicó una clasificación digital a las imágenes procedentes del sensor MODIS y la segunda se basó en la consulta a expertos, donde la identificación de áreas “hot spot” se aborda visualmente sobre dichas imágenes. Este último procedimiento permitió describir, además, los procesos que condujeron y que potencialmente pueden seguir conduciendo los cambios en la cobertura del bosque (Achard *et al.*, 2002; Achard *et al.*, 2006). Para validar estas áreas “hot spot” generadas en la clasificación digital y en la consulta a expertos, se seleccionaron 5 zonas, donde los cambios atienden a causas distintas. En esta parte del estudio se han utilizado imágenes Landsat. Tras la validación se han cuantificado las pérdidas de bosque.

Una vez identificadas las áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela y continuando con la creación de las bases para un sistema de monitoreo sólido y transparente de vigilancia de los bosques, en el establecimiento de las estrategias REDD+. Se tomó una de las áreas “hot spot” de deforestación delimitada en el último capítulo, con el objetivo de aplicar sobre esta, los procedimientos metodológicos

necesarios para la estimación de las emisiones de CO₂ por procesos de deforestación y degradación del bosque.

El área “hot spot” seleccionada fue la Reserva Forestal Caparo, área emblemática de los Llanos Occidentales venezolanos que ha experimentado intensos procesos de pérdida de ecosistemas naturales a lo largo de los últimos años. En esta área se desarrollaron los dos últimos capítulos de la tesis, capítulos IV y V.

En el **Capítulo IV** de la tesis titulado: “*Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD+: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolanos*” se reveló de interés determinar cuál de las metodologías disponibles para el monitoreo de pérdidas de bosques tropicales, se adapta mejor a las características de los Llanos venezolanos, de cara a evaluar la deforestación y las emisiones de CO₂ en Venezuela, dentro de las estrategias REDD+. Para ello se planteó como objetivo de esta investigación ensayar un análisis comparativo de las metodologías PRODES, FSI, FRA RSS – TREES 3 y CLASlite, métodos que actualmente se están aplicando a nivel nacional, regional y global.

La metodología PRODES (*Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia*), se aplica anualmente y ha sido desarrollada por el INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*) de Brasil, mediante técnicas digitales, a través del software SPRING (Câmara *et al.*, 1996). La metodología FSI (*Forest Survey of India*) fue desarrollada en la India, se aplica con carácter bianual, mediante una interpretación híbrida digital y manual (FSI, 2009). La metodología FRA RSS – TREES 3, desarrollada en el proyecto RSS (*Remote Sensing Survey*) de la FAO, dentro del programa FRA 2010, en colaboración con el JRC de la Comisión Europea (*Joint Research Center*), a través del proyecto TREES 3 (*Tropical Ecosystem Environment observation by Satellites 3*), esta metodología utiliza técnicas digitales bajo el enfoque multidato planteado por Desclée *et al.*, (2006), aplicada a una imagen con bandas de las diferentes fechas. Finalmente, se contrasta la metodología CLASlite, del Instituto Carnegie de la Universidad de Stanford, se lleva a cabo mediante técnicas digitales, a través del software CLASlite (Carnegie Landsat Analysis System).

El análisis comparativo se realizó con datos multiespectrales de Landsat ETM+, de 2007 y 2009 y se validó con datos pancromáticos de SPOT 4 y 5. Para ser comparables las metodologías fue necesario establecer, por un lado, dos categorías

bosque y no bosque. Se identificaron como bosques lo definido en el Protocolo de Kioto (Protocolo 17), a través de los Acuerdos de Marrakech (UNFCCC, 2001) (superficie mínima de bosque 1 ha, altura mínima de la cubierta 2 m y cobertura mínima de copa 10 %). Mientras, el resto de categorías que se encuentran en el área de estudio y que no cumplen estas características se definieron como no bosque. Por otro lado, para generar la cartografía por medio de cada metodología se utilizaron, por defecto, los parámetros originales de las mismas. De igual manera, para obtener la cartografía de deforestación de los bosques entre estas dos fechas, se emplearon técnicas de detección de cambios; a través de la diferencia de los mapas obtenidos en las metodologías PRODES y FSI (metodologías que tienen definido un enfoque unitemporal), mientras que para obtener la cartografía de deforestación de FRA RSS – TREES 3 y de CLASlite, se utilizaron las metodologías propias de cada uno de ellos, como la segmentación multiescalar y los algoritmos matemáticos, respectivamente.

Una vez conocida la metodología de monitoreo de pérdidas de bosques tropicales, que más se adapta a los ambientes de los Llanos venezolanos, se utilizó en el **Capítulo V**, titulado: “*Estimación de las emisiones de CO₂ por procesos de deforestación y degradación del bosque en la reserva forestal Caparo, Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+*”. El objetivo de este último capítulo es analizar la deforestación y degradación del bosque, en forma conjunta, en los últimos 20 años (1990-2000 y 2000-2010), y estimar la cantidad de emisiones CO₂ producidas en consecuencia, dentro del marco metodológico del IPCC.

El enfoque metodológico seguido en esta investigación combina un análisis espacial multitemporal a partir de imágenes Landsat con datos de la biomasa aérea almacenada en el bosque, tomados de parcelas permanentes monitoreadas en ese mismo período. Este enfoque proviene de la guía de buenas prácticas del IPCC (IPCC, 2003, 2006), la cual utiliza una ecuación básica donde se combina, los *Datos de Actividad*, que se refiere a la extensión de las áreas de la deforestación y la degradación, con los *Factores de Emisión*, que se refieren a los coeficientes que cuantifican la cantidad de carbono (en términos de CO equivalente, emitido o absorbido por unidad de superficie). El cálculo de estas emisiones se realizó utilizando como nivel de referencia los últimos 20 años, tal y como lo sugiere el IPCC (2003, 2006).

Los objetivos específicos de la tesis, planteados en cada uno de los capítulos se han cumplido. Algunos artículos se encuentran ya publicados (capítulo I y II). Para estos dos primeros trabajos se seleccionaron dos revistas de difusión científica nacional, debido a que la investigación desarrollada en los mismos tenía un interés más local. Las revistas elegidas tienen una amplia distribución en Venezuela, estando una de ellas, *Interciencia*, indexada con un índice de impacto de 0,391. Por su parte, el capítulo III fue enviado a la revista *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, que actualmente tiene un índice de impacto de 1,557. En el momento de presentación de la tesis se han efectuado ya las correcciones sugeridas por los revisores. Finalmente, los dos últimos capítulos, recientemente concluidos se enviarán a las revistas: *Remote Sensing of Environment* (capítulo IV) y *Forest Ecology and Management* (capítulo V) (Tabla 1). De igual manera, una investigación preliminar y los primeros resultados del capítulo III, se encuentran publicados en los *Anales del XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, realizado en Curitiba - Brasil, del 30 de abril a 05 de mayo de 2011, INPE (p.2779- 2787) (<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/>).

Tabla 1. Lista de publicaciones derivada de la tesis.

| Capítulo | Artículo |
|----------|--|
| 1 | Pacheco C, Aguado I, Mollicone D (2011). Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. <i>Biollania</i> , Edición Especial 10, 281-292. |
| 2 | Pacheco C, Aguado I, Mollicone D (2011). Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos. <i>Interciencia</i> : 36 (8) 578-586. |
| 3 | Pacheco C, Mollicone D, Aguado I (en revisión). Identification of deforestation hot spot areas in Venezuela from satellite images and expert opinion. <i>International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation</i> . |
| 4 | Pacheco C, Aguado I, López J (en preparación). Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD+: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolano. |
| 5 | Pacheco C, Vilanova E, Aguado I (en preparación). Estimación de las emisiones de CO ₂ por procesos de deforestación y degradación del bosque en la reserva forestal Caparo, Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+. |

Finalmente, se presentan en el último apartado de la tesis las principales **Conclusiones** de la investigación, así como las posibles líneas de investigación a desarrollar en el futuro.

El doctorando Carlos Pacheco es el autor principal en los cinco artículos generados de la tesis. Además de estos manuscritos el doctorando es autor o coautor, en otras publicaciones que se presentan a continuación:

Carlos Pacheco y Alex Barrios (2004). *Evaluación de métodos de interpolación en la construcción de un modelo digital de elevación con fines hidrológicos: aplicación en una cuenca andina de montaña*. *Revista Forestal Venezolana*, Numero 48 Volumen 2. Año 2004, p. 118-126. En esta investigación se evaluaron, los métodos de interpolación disponibles para la construcción de un modelo digital de elevación (MDE) con fines hidrológicos: TIN, INTERCON, IDW, kriging, spline (regularizado y con tensión). Los resultados permitieron concluir que cualquiera de los métodos de interpolación evaluados pueden ser utilizados para generar un MDE en cuencas de montaña con propósitos hidrológicos, excepto el método IDW debido a la magnitud del error obtenido.

Alex Barrios, **Carlos Pacheco** y Juan López. (2005). *Modelo digital de elevación con fines hidrológicos a partir de curvas de nivel en una cuenca de montaña: evaluación de factores de escala*. *Revista Forestal Venezolana*, Numero 49 Volumen 1. Año 2005, p. 7-15. Con el propósito de evaluar el efecto de la escala del mapa topográfico, la equidistancia entre curvas de nivel y el tamaño del píxel del modelo raster, en el modelo digital de elevaciones (MDE) generado, incluyendo los parámetros hidrográficos y topográficos que de él se deriven, se construyeron 72 MDE, a partir de planos topográficos, previamente escaneados y vectorizados en pantalla, aplicando como técnica de interpolación el método TIN. Los resultados permitieron recomendar la construcción del MDE con fines hidrológicos, a partir de curvas de nivel derivadas de cartas a escala 1:25.000, píxel de 30 m ó menos y equidistancia de 40 y 20 m.

Clifford Peña, **Carlos Pacheco**, Edgar Romero, José Suniaga, Jorge Vásquez, Mario Dávila y Jesús Rojas. (2006). *Clasificación de Suelos con Fines Agrícolas. Un ejemplo de aplicación del reglamento parcial de la Ley de Tierras y Desarrollo Rural*. *Revista Agricultura Andina*, Volumen 11, Extraordinario. Año 2006, p. 9-27. Con el objetivo de clasificar los suelos de la finca Tempé, de acuerdo con el sistema propuesto en el reglamento de la ley de tierras y desarrollo agrario, se generó una metodología que permitió encontrar que las principales cualidades que definen la clase de suelo fueron la topografía y la pedregosidad. Un 72% de suelos fueron clasificados en la clase VI (Pecuaria) y el resto un 28% se clasificaron como clase VII (Forestal).

Carlos Pacheco, Ramón Osorio, Ana I. Méndez, Ernesto Flores y Juan Y. López. (2006). *Determinación del uso de la tierra bajo un enfoque de cobertura con imagen ETM+ de Landsat. Cuenca Alta del Río Grita 2006*. Estado Táchira – Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, Numero 40, p. 85-106. Con el propósito de determinar el uso actual de la tierra, se emplearon los criterios de la UGI, una imagen Landsat, un SPDI, un SIG y un GPS. Esto permitió conocer que la cuenca alta tiene una aptitud agrícola representada por la horticultura y una predominancia de vegetación arbórea – arbustiva alta, superior a 15 m de altura con 11.219,74 ha, seguida de la combinación de usos entre afloramientos rocosos, vegetación de páramo y cuerpos de aguas naturales con 4.252,24 ha.

Carlos E. Pacheco A. y Ennio N. Pozzobon B. (2006). *Manual de Ejercicios de Laboratorio Fotogrametría y Fotointerpretación*. Depósito Legal LF23720056343495; ISBN 980–11–0913–0. Comisión de Desarrollo del Pregrado (CODEPRE). Vicerrectorado Académico. Universidad de los Andes. El presente manual guía por dos caminos, uno, el conocimiento de las técnicas que permiten elaborar mediciones sobre fotografías aéreas y mapas topográficos, y dos, la interpretación de estas mediciones. Así, el libro consta de dos módulos, uno de fotogrametría y otro de fotointerpretación.

Carlos Pacheco, Alex Barrios y Juan Y. López. (2007). *Comparación de métodos de digitalización para el ingreso de información espacial a los sistemas de información geográfica*. *Revista Forestal Latinoamericana*, Numero 41. Año 2007, p. 57-74. El objetivo del estudio es la comparación de métodos de digitalización (tableta, pantalla, semi-automático y automático) utilizado en la actualidad para introducir información espacial a los SIG. Los resultados señalaron que el método de digitalización manual en pantalla, aunque consume cerca del 25% más de tiempo que la digitalización en tableta, arroja errores medios cuadráticos cuatro veces menores y similares al obtenido con el método de digitalización semi-automático.

Oscar Noguera, **Carlos Pacheco**, Miguel Plonczak, Mauricio Jerez, Ana Moret, Ana Quevedo, Omar Carrero G. (2007). *Planificación de la explotación de impacto reducido como base para un manejo forestal sustentable en Venezuela*. *Revista Forestal Venezolana*, Numero 51 Volumen 1. Año 2007, p. 67-78. El presente estudio consistió en planificar el aprovechamiento de un bosque natural, estableciendo el marco general para la aplicación de técnicas que generen un menor daño. Se concluye que la realización de un mapa topográfico, un muestreo silvicultural antes de la explotación

forestal, un censo sobre las características de la masa comercial y su ubicación en el mapa, permite decidir qué árboles deben ser aprovechados y planificar un sistema vial de extracción y transporte acorde con la concentración y densidad arbórea, lo que contribuirá a disminuir los daños causados durante la explotación.

Carlos Pacheco, Ernesto Flores y Ana Méndez. (2007). *Implantación de las bases físicas del catastro rural: experiencia del Municipio Rangel, Mérida – Venezuela*. *Revista Forestal Latinoamericana*, Numero 42. Año 2007, p. 85-104. El objetivo de esta investigación fue realizar por primera vez en Venezuela la implantación del componente físico, como base para establecer un sistema rural catastral, siguiendo la normativa legal vigente del IGVS. Los resultados demostraron que el uso de las imágenes de satélite y el GPS, junto con intensos chequeos de campo y la modificación de la ficha catastral propuesta por el IGVS, son fundamentales para la implantación del componente físico de un catastro rural.

Ana Méndez, Ernesto Flores y **Carlos Pacheco**. (2008). *Catastro Rural Multiutilitario y Ordenación del Territorio*. *Revista Forestal Latinoamericana*, Numero 43. Año 2008, p. 133-154. La investigación aborda el desarrollo teórico y metodológico de la ordenación del territorio, como política del Estado y de la sociedad, en relación con el catastro rural multiutilitario (componente ambiental, social, jurídico y político administrativo), herramienta clave aplicada al municipio como unidad orgánica catastral. La importancia de estos elementos ha sido reconocida en la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela de 1999 y en el contexto de la dinámica social, económica y ambiental del país que exige al Estado y a sus instituciones actuar en función de lograr el desarrollo integral y sostenible de la nación.

Carlos Pacheco, Inmaculada Aguado y Héctor Nieto. (2009). Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular". Madrid España. *GeoFocus*. Numero 9, p. 232-249. El objetivo de esta investigación es predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios por causa natural (rayo) para la España peninsular mediante el ajuste de un modelo logístico. Los resultados muestran que el DMC medio, los rayos totales y los climas oceánico y mediterráneo de montaña son las variables más explicativas en el proceso. El modelo ofrece una precisión global aceptable (64,12%). Esto demuestra que las condiciones climáticas, el grado de humedad del combustible y la actividad de tormentas están relacionadas con la probabilidad de ocurrencia de incendios ocasionados por rayo.

Referencias

- Achard, F., Eva, H.D., Glinni, 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, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., Malingreau, J.P., 2002. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *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.
- Aguilera, M., Azócar, A., González, E., 2003. Biodiversidad en Venezuela. Fundación Polar, Caracas, Venezuela.
- Asner, G.P., Powell, G.V.N., Mascaró, J., Knapp, D.E., Clark, J.K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., Hughes, R.F., 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 16738-16742.
- Bonduki, Y., Swisher, J., 1995. Options for mitigation greenhouse gas emissions in Venezuela's forest sector: a general overview. *Interciencia* 20, 380-387.
- Bontemps, S., Langner, A., Defourny, P., 2009. Monitoring forest changes in Borneo on a yearly basis by an object-based change detection algorithm using SPOT-VEGETATION time series. *Int J Remote Sens*, 1-31.
- Brown, S., 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. In: PAPER, F.F. (Ed.), Roma, Italy, p. 235.
- CAIT, 2008. Climate Analysis Indicators Tool Version 5.0. . In: Institute, W.R. (Ed.), Washington, DC.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 1996. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20, 395-403.
- DeFries, R.S., Rudel, T., Uriarte, M., Hansen, M., 2010. Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nat Geosci* 3, 178-181.
- Delaney, M., Brown, S., Lugo, A., Torres-Lezama, A., Bello-Quintero, N., 1997. The distribution of organic carbon in major components of forests located in five life zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 13, 697-708.
- Desclée, B., Bogaert, P., Defourny, P., 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment* 102, 1-11.
- Draft/decision/CP.16, 2010. Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on long-term Cooperative Action under the Convention - C. Policy approaches and positive incentives on issues relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries; and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries In.
- Eva, H., Carboni, S., Achard, F., Stach, N., Durieux, L., Faure, J.-F., Mollicone, D., 2010. Monitoring forest areas from continental to territorial levels using a sample of medium spatial resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 191-197.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p. 378.

- FCCC/CP/2009/11/Add.1, 2009. UNFCCC Decision 4/CP.15. Methodological guidance for activities relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries In.
- FSI, 2009. State of Forest Report 2009. . In. Ministry of Environment and Forests, Government of India, Dehradun, India, p. 226.
- 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.
- Geist, H., Lambin, E., 2002. Proximate cause and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52, 143-150.
- GOFC-GOLD, 2010. A sourcebook of methods 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 forestation. In, GOFC-GOLD Report version COP16-1. GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
- Hernández, L., 2001. Densidad de biomasa aérea en bosques extensos del Neotrópico húmedo. Caso de la Cuenca del Río Caura, Venezuela. *Revista Forestal Iberoamericana* 1, 24-34.
- Houghton, R.A., 2010. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change? *Tellus B* 62, 337-351.
- INPE, 2010. Monitoring of the Brazilian Amazonian: Projeto PRODES In, <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>, Brazil.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). In, p. 632.
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4 -Agriculture, Land Use and Forestry (AFOLU). In.
- IPCC, 2007. 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 Expertos sobre el Cambio Climático. In: (Ippc), I.P.C.C. (Ed.), Ginebra, Suiza, p. 104.
- JRC, 2005. A Proposal for Defining the Geographical Boundaries of Amazonia. . In: Eva, H., Huber, O., (Ed.). Joint Research Center, Ispra, Italy. , p. 38.
- Kanninen, M., Brockhaus, M., Murdiyarso, D., Nabuurs, G., 2010. Harnessing forests for climate change mitigation through REDD+. In: Series, I.W. (Ed.), International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). IUFRO, Vienna, Austria, pp. 43-54.
- Lambin, E.F., H., G., Lepers, E., 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28, 205-241.
- Lambin, E.F., Meyfroidt, P., 2010. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy* 27, 108-118.
- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., Scholes, 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. LUC Report Series 7. In. The International Livestock Research Institute Nairobi, Kenya y LUC Focus 3 Office, Wageningen University the Netherlands.
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D., Jarvis, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell & Environment* 22, 715-740.
- Malhi, Y., Wood, D., Baker, T.R., Wright, J., Phillips, O.L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Monteagudo, A., Neill, D.A., Vargas, P.N., Pitman, N.C.A., Quesada, C.A., Salomão, R., Silva, J.N.M., Lezama, A.T., Terborgh, J., Martínez, R.V., Vinceti, B.,

2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology* 12, 1107-1138.
- Maniatis, D., Mollicone, D., 2010. Options for sampling and stratification for national forest inventories to implement REDD+ under the UNFCCC. *Carbon Balance and Management* 5, 9.
- MARN, 2005. Primera comunicación nacional en cambio climático de Venezuela. In: Naturales, M.d.A.y.d.I.R. (Ed.), Caracas, Venezuela, p. 164.
- Mather, A., Needle., C., 2000. The relationships of population and forest trends. *The Geographical Journal* 166, 2-13.
- Meyfroidt, P., Rudel, T.K., Lambin, E.F., 2010. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *PNAS* 107, 20917-20922.
- Morton, D.C., DeFries, R.S., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Del Bon Espirito-Santo, F., Hansen, M., Carroll, M., 2005. Rapid Assessment of Annual Deforestation in the Brazilian Amazon Using MODIS Data. *Earth Interactions* 9, 1-22.
- Munder, S., 2003. Oil wealth and the fate of the forest. A comparative study of eight tropical countries. . Taylor & Francis Group, London United Kingdom: Routledge.
- Murray, B., Olander, L., 2008. A Core Participation Requirement for Creation of a REDD+market. Nicholas School of the Environment and Earth Sciences. In. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, p. 2.
- Petit, C., Lambin, E., 2001. Integration of multisource remote sensing data for land cover change detection. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 15, 785-803.
- Petit, C., Lambin, E., 2002. Impact of data integration technique on historical land-use/landcover change: Comparing historical maps with remote sensing data in the Belgian Ardennes. *Landscape Ecol.* 17, 117-132.
- Pontius, R., Shusas, E., McEachern, M., 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistenc. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101, 251–226.
- 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.
- 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., Turner, 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, Berlín, pp. 9 - 40.
- 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.
- Sader, S., Armond, 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20, 11-19.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et, a., 2007. Technical summary. 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.* In: Press, C.U. (Ed.), Cambridge, UK.
- Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., van Der Heijden, G., Jenkins, P., Manning, P., 2009. ¿La solución natural? El papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático. Una evaluación rápida del Pnuma. In: *Ambiente, P.d.I.N.U.p.e.M.* (Ed.), Cambdridge, United Kingdom. , p. 39.
- UNFCCC, 2001. COP-7: The Marrakech accords. In: *Secretariat, U.* (Ed.), Bonn, Germany, p. 245.
- Wibowo, D., Byron., R., 1999. Deforestation Mechanisms. A survey. *International Journal of Social Economics* 26, 455-474.

Capítulo I. Las Causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo

Publicación derivada:

Pacheco C, Aguado I, Mollicone D (2011). Las Causas de la Deforestación en Venezuela: Un Estudio Retrospectivo. *Biollania*, Edición Especial 10, 281-292

Resumen

Se realizó un estudio retrospectivo para evaluar las causas principales y subyacentes que han conducido a los procesos de deforestación en Venezuela, desde la época precolombina hasta nuestros días. Se efectuó un estudio de casos, a nivel local, que permitió identificar en diferentes fechas y regiones, la frecuencia de los factores causales y las interacciones que condujeron a la deforestación. Los resultados muestran que la deforestación es producto de la combinación de diferentes causas, las cuales cambian según el contexto geográfico e histórico. El factor causante, con mayor influencia, es la expansión agrícola y el factor subyacente, más importante, fue el crecimiento demográfico, cada uno, con un 41,8% de influencia. El patrón de interacción de los factores causales más frecuente, se derivó de las migraciones regionales, nacionales e internacionales que fomentaron la ocupación de las regiones boscosas para su posterior deforestación.

Palabras claves: deforestación, causas, dinámica, estudio de casos, Venezuela.

Abstract

A retrospective study was conducted to assess the main and underlying causes that have led to the processes of deforestation in Venezuela, from pre-Columbian times to the present day. Cases were studied at the local level, which allowed identifying, at different dates and regions, frequent causal factors and interactions leading to deforestation. The results show that deforestation is a product of the combination of different factors, which vary in a geographical and historical context. The causative factor with greater influence is agricultural expansion, and the most important underlying factor is population growth, each with 41.8% of influence. The most frequent causal factors interaction pattern was derived from regional, national and international migrations that fostered the occupation of land.

Key words: Deforestation, causes, dynamics, study cases, Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

La deforestación se define como “la conversión directa, inducida por el hombre de tierras forestales a tierras no forestales” (UNFCCC, 2001). Este proceso se genera de

manera local o regional, afectando 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 and Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010). Un estudio reciente, realizado por Denman *et al.* (2007), estimó que la deforestación en los bosques tropicales, contribuye con un 20% a la emisión de gases de efecto invernadero en el mundo, principalmente por las emisiones de CO₂.

La deforestación es estimada periódicamente, por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), y publicada a través de informes a nivel regional o mundial, desde 1948 hasta el 2010, cada 5 o 10 años. Los resultados para la última evaluación, publicados en 2010, arrojaron, que en la última década, los bosques muestran señales de recuperación, pero, su tasa de deforestación continúa siendo alarmante, principalmente, por la conversión de los bosques tropicales en tierras agrícolas. Tal es el caso de Suramérica y África, que experimentaron las mayores pérdidas netas anuales de bosques, con 4 y 3,4 millones de hectáreas, respectivamente. Con respecto a Venezuela, en la última evaluación de la FAO (2010), la deforestación en las dos últimas décadas ha sido de -288.000 ha/año, con una tasa de -0,57 (1990-2000), -0,59 (2000-2005) y -0,61 (2005-2010). Estos resultados sitúan a Venezuela, en los primeros puestos a nivel mundial, en cuanto a tasas de deforestación, y son los responsables junto a los cambios de la tierra, de la actual situación del deterioro de la vegetación del país (Figura I.1); la cual históricamente poseía cobertura boscosa en casi todo el territorio nacional, (Munder, 2003). Esta situación es preocupante, en virtud que Venezuela posee, según el JRC ("Join Research Center", de la Comisión Europea), el 5,6% de los bosques de la Amazonía (JRC, 2005), la región con la mayor extensión de bosques primarios originales, que goza de la quinta parte de las disponibilidades mundiales de agua dulce, el mayor río del planeta, con más de 1.000 afluentes, 2.400 especies de peces (Santamarta, 1999) y ca. 11.210 especies de árboles (Hubbell *et al.*, 2008).

Para analizar y comprender los factores causales de estos procesos de deforestación, existen metodologías que se basan en el estudio de casos a nivel local, las cuales explican el modelo causal de la deforestación (Wibowo and Byron., 1999; Mather and Needle., 2000). Los estudios de casos, a nivel local, identifican las causas de las pérdidas en la cobertura vegetal, a través de análisis estadísticos, como el exploratorio de datos, regresión, estadísticas bayesianas y redes neuronales artificiales (Lesschen

et al., 2005); ó a través del análisis de la literatura (Lambin *et al.*, 2003; Lambin and Meyfroidt, 2010; Meyfroidt *et al.*, 2010).

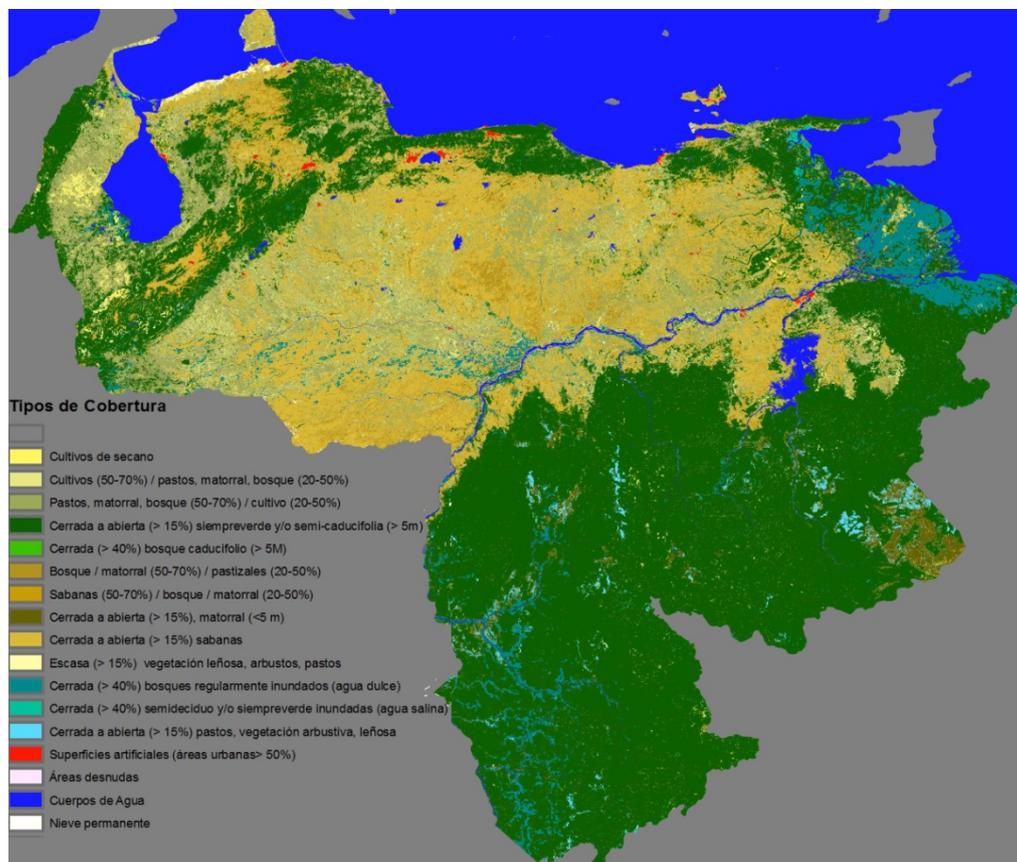


Figura I.1. Mapa de vegetación de Venezuela 2010, extraído y adaptado por el primer autor a partir del producto Global de Cobertura del Suelo (“GlobCover-2009”), publicado por la European Space Agency (ESA) & The Université Catholique de Louvain - Belgium (Bontemps *et al.*, 2010).

El estudio de casos a través de la literatura permite identificar, por un lado, las causas principales que son representadas por las actividades humanas y 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 fuerzas motrices subyacentes que sustentan las causas más obvias o inmediatas de la deforestación. Éstas suelen constituir un conjunto de variables sociales, políticas, económicas, tecnológicas o culturales que explican las condiciones iniciales en la relación hombre-medioambiente, dichas variables tienen carácter estructural y se desarrollan a escala local, nacional o incluso mundial (Geist and Lambin, 2001; Geist and Lambin, 2002).

Un interesante ejemplo de este análisis de literatura fue el realizado por Geist & Lambin (2001), autores que analizaron la frecuencia de la aparición de fuerzas motrices subyacentes y causas directas de la deforestación tropical y sus interacciones. El trabajo se basó en el análisis de 152 casos de estudio, a nivel subnacional, demostrando que la deforestación tropical es impulsada por variaciones regionales en la sinérgica combinación causa/conducción, donde los factores económicos, institucionales, las políticas nacionales e influencias externas son los componentes destacados.

En este sentido, se plantea como objetivo principal realizar un estudio retrospectivo de las causas de la deforestación en Venezuela, a través del estudio de casos a nivel local, mediante el análisis de la literatura desde la época precolombina hasta nuestros días. Los resultados de este estudio, pueden ser considerados como un primer avance para la modelización futura de los procesos de deforestación.

1.1. Área de estudio

La República Bolivariana de Venezuela se encuentra enmarcada, dentro de las coordenadas 00° 38' 53'' - 12° 12' 00'' latitud norte y 59° 47' 50'' - 73° 22' 38'' longitud oeste, posee una superficie de 916.445 Km². Se caracteriza por un clima tropical, con una temporada seca marcada por la presencia de la alta presión del Atlántico y una temporada de lluvias, afectada por la Zona de Convergencia Intertropical. Posee una precipitación que oscila desde valores inferiores a 40 mm anuales, en las zonas áridas y semiáridas de las regiones centrales y costeras, hasta precipitaciones superiores a 4.000 mm en las regiones del sur. Sus temperaturas medias diarias varían entre los 24 a 28 °C en zonas bajas continentales hasta valores negativos en los páramos andinos.

1.2. Historia de los cambios del bosque en Venezuela

Según los hallazgos arqueológicos, en Venezuela hay indicios de presencia de asentamientos humanos desde hace 15.000 años (Munder, 2003). Las primeras comunidades fueron nómadas, posteriormente, se transformaron en sedentarias con la introducción de la agricultura. Esto originó la instalación de distintos sistemas de manejo de la tierra; así se puede hablar de una agricultura extensiva a través de la roza y quema, y de una agricultura intensiva, mediante las obras de irrigación, la

construcción de andenes y de las terrazas agrarias o campos elevados (Zucchi and Denevan, 1979).

Posteriormente, con la llegada de los colonizadores en 1498, el sistema indígena fue sustituido por un sistema de explotación intensivo, desarrollándose nuevas unidades productivas, denominadas “haciendas coloniales”. Esta actividad junto con la explotación de maderas y la explotación del oro y diamantes, fueron las que marcaron los cambios más significativos de la destrucción del bosque en el país (Abarca, 2006).

El período de creación de la República, en 1811, llevó consigo conflictos armados, abandonándose amplias extensiones agrícolas y pecuarias, lo cual permitió que se expandieran los bosques al norte del río Orinoco (Veillón, 1977). Una vez independizado el país, en 1821, se convierte en un Estado nacional, bajo la dirección de la oligarquía agropecuaria, heredera de la economía agraria colonial (Abarca, 2006). Durante este período se desarrollaron tres sistemas agrarios para abastecer las exportaciones: las haciendas, los latifundios ganaderos, extensivos o intensivos según la región y los conucos, que estuvieron asociados a los sistemas anteriores con fines de subsistencia (Rojas, 2008). Junto a estos usos, se inició la actividad forestal, a través del aprovechamiento selectivo de las especies de mayor valor económico (Cunill, 1995; Torres, 2008). En esa época también se modifica el uso del territorio con la construcción de estructuras viales en diferentes regiones del país y se mantuvo la explotación minera de oro y diamante en la Guayana venezolana (Cunill, 1995; Olivo, 2008).

En 1920, con el inicio de la exploración petrolera, se sustituye en gran parte la exportación agropecuaria por la exportación de petróleo. Esto produjo un incremento en los ingresos económicos, que el Estado utilizó para implementar nuevas acciones políticas y económicas, destinadas a movilizar y transformar el territorio (Rojas, 2008). Una de estas acciones fue la modernización de la agricultura mediante inversiones en los sistemas de riego, vialidad, saneamiento ambiental, vivienda, salud y educación. A pesar de estas inversiones, la actividad petrolera no pudo evitar el abandono de las actividades agrícolas, a través del éxodo, desde el medio rural hacia las áreas petroleras y urbanas. Este proceso, originó la descomposición de las haciendas productoras de café, tabaco, cacao y un debilitamiento de los sistemas de hatos, que se manifestó en la disminución de la producción pecuaria y en la presión hacia los bosques. Sin embargo, surgieron y se acentuaron otras actividades que causaron

pérdidas de superficies boscosas, como la construcción de infraestructuras viales y embalses. Mientras en algunas regiones, se incrementó el aprovechamiento forestal bajo la figura de permisos anuales (Torres, 2008). Durante este período, otras regiones introdujeron cambios en la tecnología de la explotación minera, afectando así a las masas forestales mediante la ampliación de mayores superficies explotadas (Olivo, 2008).

A partir de 1950, se inicia el periodo que marcó el rumbo hacia las extensas deforestaciones en Venezuela (Veillón, 1977). El proceso acelerado y agresivo de pérdida de la masa boscosa estuvo motivado por los ingresos petroleros que permitieron la construcción de infraestructuras, como los 30 embalses, en diferentes regiones del país (MINAMB, 2009), así como distintas vías de comunicación. Junto a estas políticas de creación de nuevas infraestructuras, el estado promulgó la Ley de Reforma Agraria (1960) para estimular al sector y a la economía del país. Bajo este escenario, se generaron movimientos migratorios con el fin de desarrollar actividades agropecuarias y forestales. Por otro lado, se desarrolló la explotación de la minería no metálica, a pequeña escala y la minería metálica (hierro, oro y diamante) a pequeña y gran escala.

Debido al continuo incremento en el uso de la tierra desde la época precolombina, actualmente existe una desaparición casi absoluta de los bosques de las tierras bajas de los estados Barinas, Portuguesa y Cojedes, así como la mayoría de los bosques de la región sur del Lago de Maracaibo en el estado Zulia. De igual manera, existe una fuerte intervención en los bosques de Los Andes y de la Sierra de Perijá (región Noroccidental) así como también en la región Centro-Norte y Nororiental. Mientras que en la región al sur del Río Orinoco, las pérdidas se extendieron con mayor proporción en la subregión occidental de Guayana (Sierra de Imataca) y cuenca baja el río Caura. Los factores demográficos y el clima político de corrupción y mala gestión incentivaron el acceso directo a las tierras forestales desde el inicio de la época petrolera en 1920. Ejemplos de ello, fueron las invasiones para el establecimiento de sistemas agropecuarios en las reservas forestales de los Llanos Occidentales y en la zona sur del Lago de Maracaibo (Catalán, 1992). Otro fenómeno observado fue la expansión de la frontera agrícola hacia aéreas de bosques primarios en las laderas y riberas de ríos en los Andes y en las Cordilleras Coste-ras. También, se incrementaron y consolidaron los asentamientos campesinos en los estados Amazonas y Bolívar (Bevilacqua *et al.*, 2007; Aymard *et al.*, 2009).

Con respecto a la influencia de la minería en las deforestaciones, tenemos por ejemplo, la explotación del carbón en la Cordillera de Perijá desde 1987, lo cual ha originado la deforestación de ex-tensiones considerables de bosques premontanos, cuya composición florística y diversidad se desconoce (Olivo, 2008). Asimismo, la nacionalización de las industrias básicas del estado Bolívar, en 1975, incrementó la minería metálica a pequeña y a gran escala, estableciéndose nuevas carreteras y núcleos poblacionales dentro de bosques prístinos para la explotación de oro de aluvión (Aymard, 1987).

Esta secuencia histórica nos ilustra, como se han ido acabando los bosques de tierras bajas al norte del Río Orinoco, los que quedan están en zonas montañosas y en el Escudo Guayanés, representando el 51,95% del territorio (Figura I.1).

1.3. Datos

En Venezuela se dispone de bibliografía sobre diferentes casos de estudio a escala local. A partir de ellos, se puede llegar a una comprensión general de las causas principales y subyacentes de la deforestación (Geist and Lambin, 2001; Geist and Lambin, 2002). En este sentido, se examinaron publicaciones científicas en libros, capítulos de libros, tesis, artículos científicos, mapas, datos estadísticos oficiales de la FAO y del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MINAMB), así como información procedente de internet. A partir de esta información, se analizaron los diferentes usos de la tierra y sus cambios, lo cual nos permitió identificar los tiempos y los espacios geográficos más significativos en los procesos de cambio del bosque.

Respecto a los tiempos, en este estudio se identificaron y analizaron seis épocas: la precolombina (antes de 1498), la colonial (1498-1820), la pre petrolera (1820-1920) y la petrolera, la cual, a su vez, se divide en tres períodos; de 1920 hasta 1950, de 1950 hasta 1975 y de 1975 hasta la actualidad. En cuanto a los espacios geográficos, hemos definido cuatro regiones: Noroccidental, Centro-Norte, Nororiental y Sur.

Para realizar esta delimitación se ha tomado como referencia la división del país en nueve regiones naturales: los Andes, la depresión del Lago de Maracaibo, la región Insular, la Cordillera de la Costa, el sistema de colinas Lara-Falcón, la región Costera, el Delta del Orinoco, la región de Los Llanos y la Guayana, que incluye la porción de la

Amazonía venezolana (IGVSB, 1999; MINAMB, 2005), la cual se presenta en la Figura I.2.

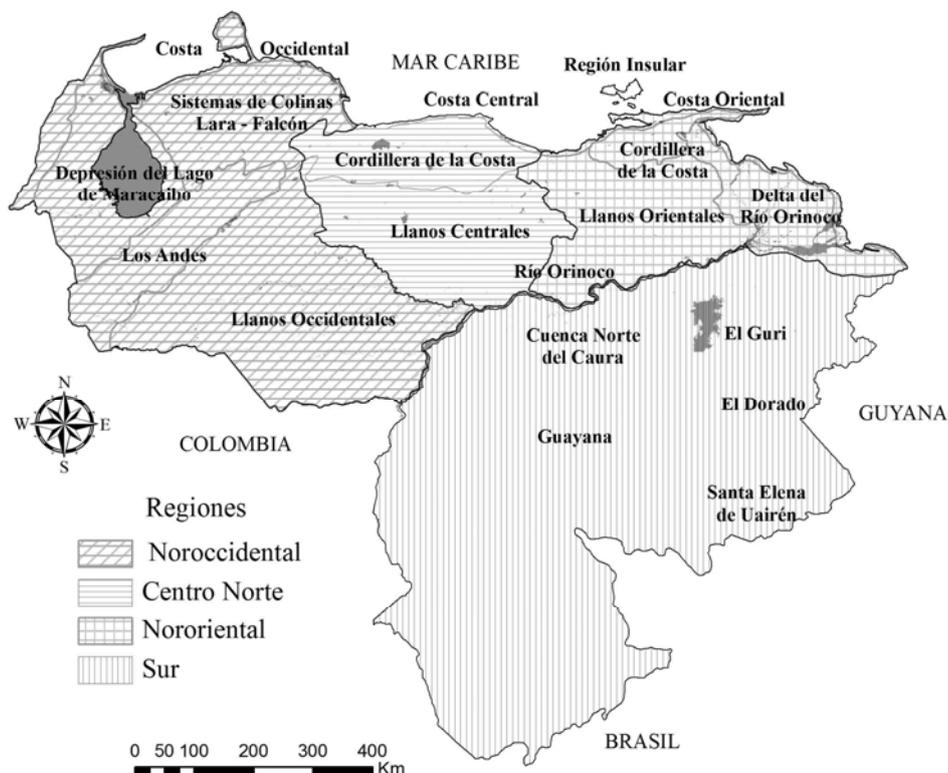


Figura I.2. Regiones identificadas para el análisis retrospectivo de las causas de la deforestación en Venezuela.

2. METODOLOGÍA

En función de la delimitación espacio-temporal definida y del análisis de la información disponible, se determinaron las causas principales y subyacentes de los procesos de cambio.

En este estudio, hemos adoptado los criterios identificados por Geist & Lambin (2001) para explicar un modelo causal de la deforestación en los bosques tropicales. Estos criterios sirven para definir y analizar las actividades humanas que afectan directamente al medio ambiente. Las actividades identificadas se reunieron en cinco grandes grupos de causas principales, estos son: la expansión agrícola, la extensión de infraestructuras, la explotación maderera, la explotación minera y la presencia de conflictos sociales. De igual manera, se definen las fuerzas subyacentes que

sustentan o motivan las causas principales de la deforestación en Venezuela. De esta forma, se han encontrado cinco grandes grupos de factores: demográficos, económicos, tecnológicos, políticos e institucionales, y culturales.

Tanto las causas principales como las subyacentes fueron identificadas en la revisión bibliográfica y posteriormente se analizaron y cuantificaron conforme a la frecuencia de su aparición en las distintas fuentes analizadas y en los tiempos y en los espacios definidos en el estudio. Estas frecuencias, fueron expresadas porcentualmente de acuerdo a su presencia sobre el total de veces que se observó. Esto permitió realizar un análisis individual para cada grupo de causas principales y subyacentes, 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 determinar cómo interactúan las causas subyacentes sobre las principales y sus “feedbacks”, es decir, cómo interactúan las causas principales sobre las subyacentes. Este análisis reveló, la dinámica de los sistemas que condujeron a la deforestación en las diferentes épocas y regiones del país.

3. RESULTADOS

En la figura I.3, se observan las causas principales y subyacentes identificadas en el análisis de casos de estudio, a nivel local, desde la época precolombina hasta nuestros días. Estas causas se reunieron en cinco grandes grupos, y se analizaron cada una de ellas individualmente; de este modo, la explotación minera se subdivide en minería metálica a pequeña y gran escala y minería no metálica y así sucesivamente con el resto de las principales causas.

Por su parte, las causas subyacentes fueron analizadas también en detalle, por ejemplo, el factor demográfico influye en el crecimiento natural de la población, explicado por la natalidad, mortalidad, migraciones regionales, nacionales e internacionales, o bien el crecimiento urbano que responde al aumento de las zonas urbanas o a la aparición de nuevos asentamientos.

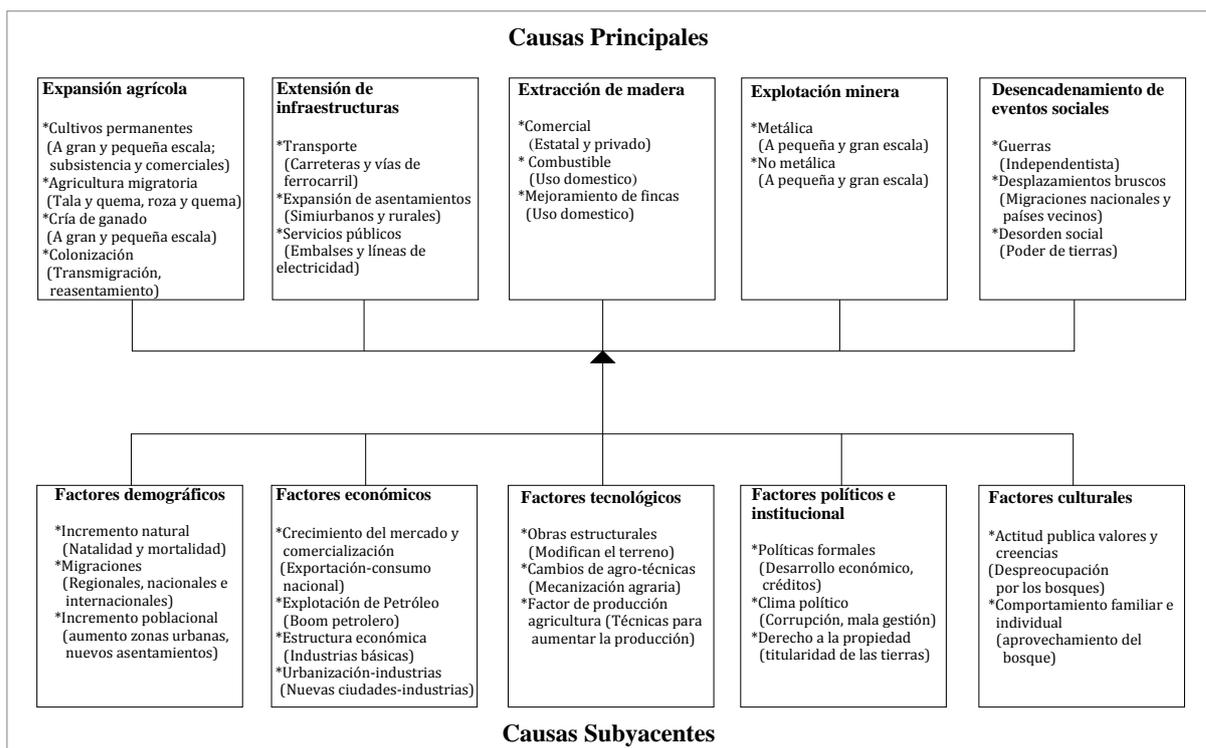


Figura I.3. Causas principales y subyacentes identificadas para el análisis de los cambios del bosque en Venezuela (adaptado de Geist & Lambin, 2002).

3.1. Causas principales

La frecuencia de aparición de las causas principales y subyacentes en cada uno de los períodos y regiones considerados en el estudio se cuantificaron porcentualmente. Los resultados obtenidos de este análisis se presentan en la figura I.4. En esta figura se revela que en Venezuela, la causa principal de pérdida de cobertura boscosa ha sido la expansión agrícola (41,8%). Esta causa, se encuentra ya des-de la época precolombina, cuando las comunidades humanas introdujeron la agricultura (Abarca, 2006). Este proceso se ha prolongado hasta nuestros días, cuando el Estado ha establecido políticas de dotación de tierras, créditos y tecnología para impulsar el sector, mediante la Ley de Reforma Agraria de 1960 y la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario de 2005.

Estos usos agrarios se han estado desarrollando hasta la actualidad, de esta manera se encontró sistemas de agricultura permanente como itinerante en Los Andes y Los Llanos, o usos ganaderos, por ejemplo, en las reservas forestales de los Llanos Occidentales de la región Noroccidental. También, han desarrollado una agricultura de

colonización, diferentes comunidades indígenas de la Sierra de Périja, en la región Noroccidental (Rojas, 2008) ó en la Guayana venezolana (Bevilacqua *et al.*, 2007).

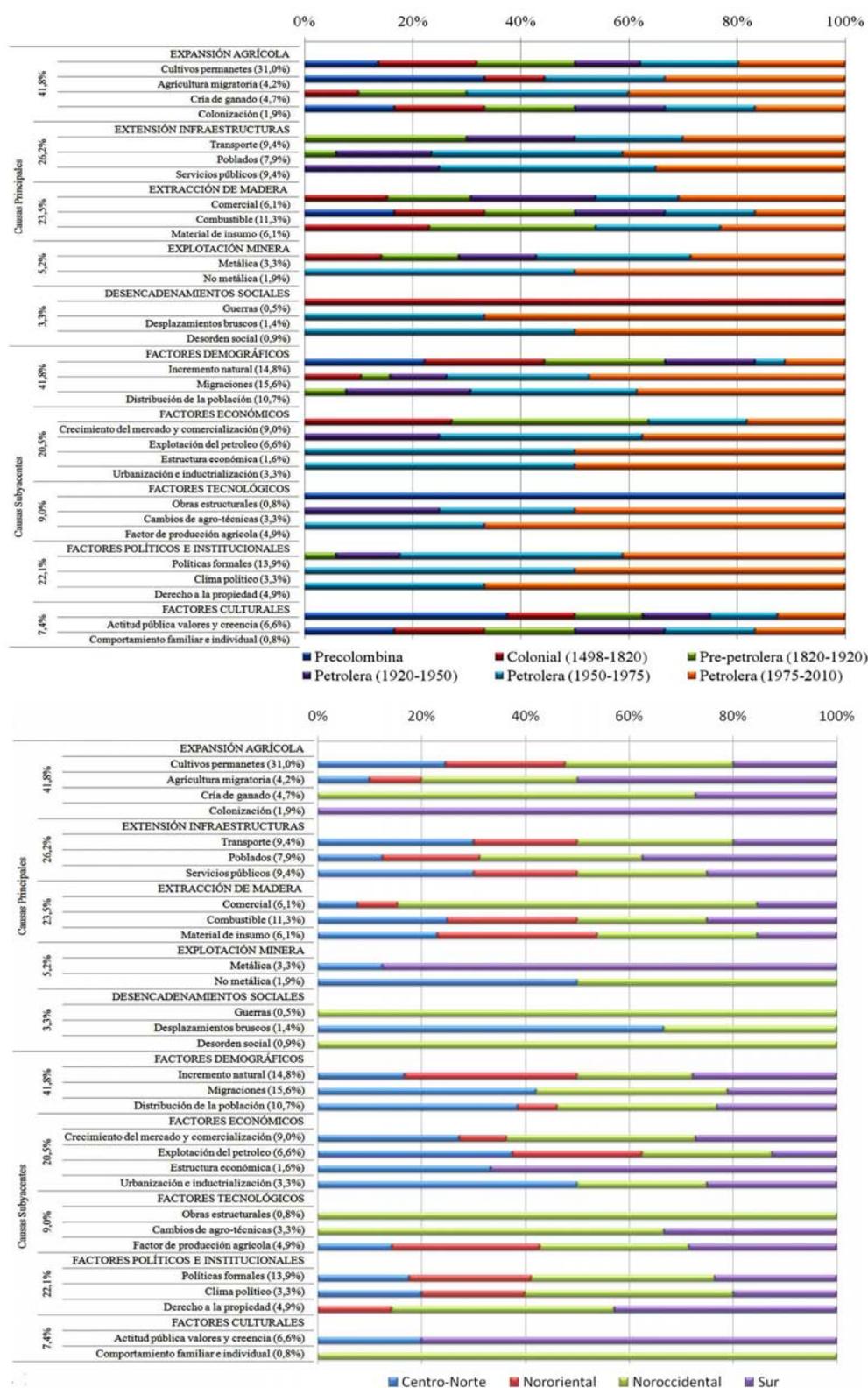


Figura I.4. Frecuencias porcentuales de las causas principales y subyacentes en las épocas y regiones analizadas

Otra de las causas principales de la deforestación fue la relacionada con la construcción de infraestructuras (26,2%), que se acentuó en la época pre petrolera, con la construcción de carreteras para extraer los productos agrícolas, madereros y mineros. En la época petrolera se reafirmó esta tendencia, con el incremento de la red de carreteras, la construcción de ferrocarriles, la expansión de asentamientos semiurbanos y rurales, la instalación de líneas eléctricas y la construcción de embalses. Respecto a los embalses, desde 1920 hasta nuestros días, se cuenta con 87 presas, distribuidas en diferentes regiones del país. Su construcción ha afectado a 606.340,51 ha, (0,7% del territorio nacional), en su gran mayoría bosques primarios (MINAMB, 2009).

Por su parte, la explotación de madera representó el 23,5% de las causas principales de deforestación. Esta materia prima se ha utilizado, como fuente de energía, en todas las regiones, desde la época precolombina hasta nuestros días. En la época colonial, en la región Centro-Norte y Noroccidental se explotaron los bosques, como un beneficio local para el mejoramiento de la infraestructura de fincas, a partir del aprovechamiento forestal selectivo (Torres, 2008).

Otra de las causas principales de deforestación fue la explotación minera, que ocasionó el 5,2% de la pérdida de bosques originales. Comenzó en la época colonial, mediante la explotación de oro, en la región Centro-Norte y de manera intermitente en la Guayana venezolana (Cunill, 1995). En la época pre petrolera, mediante la consolidación y establecimiento de poblados mineros en la región, se explotaron oro y diamante a través de técnicas artesanales. En la época petrolera, hubo cambios importantes de la tecnología de extracción, se descubrieron nuevos yacimientos, se crearon y modernizaron pueblos mineros y a partir de 1975, se nacionalizaron las industrias básicas para la minería metálica. Mientras, en la región Centro-Norte y Noroccidental, a partir de 1958, se inició el aprovechamiento de la minería no metálica como el feldespato, níquel y carbón (Olivo, 2008).

Finalmente, el desencadenamiento de conflictos sociales, supone el 3,3% de los casos de deforestación. En este sentido, a finales de la época colonial, sucedieron movimientos independentistas que afectaron, principalmente, a las regiones del Centro-Norte y Noroccidental (Veillón, 1977; Lindorf, 2008). Posteriormente, con el inicio de la actividad petrolera se iniciaron desplazamientos masivos de la población hacia los centros urbanos. En la segunda fase de este período petrolero (1950), el

establecimiento de las nuevas políticas agrarias, provocó un desplazamiento de la población, principalmente, hacia la región Noroccidental. Esto ha traído hasta el presente un desorden público y ha afectado la calidad de los servicios, propiciado por el acceso no planificado de las tierras del Estado (Rojas, 2008).

3.2. Causas subyacentes

La causa subyacente que más ha sustentado e impulsado la deforestación ha sido el factor demográfico (41,8%). Se encuentran distintos elementos que permiten explicar la importancia de este elemento. Por un lado, el crecimiento natural de la población desde época precolombina hasta nuestros días. Por otro, las migraciones que se han su-cedido desde el período colonial hasta la actualidad. En época de la colonia, hay evidencias de la llegada de mineros al estado Bolívar procedentes de las colonias inglesas, para explotar el oro y diamante (Olivo, 2008). Posteriormente, en la época pre petrolera la aparición de movimientos migratorios regionales hacia las zonas de producción agraria (Centro-Norte y Noroccidente) para incrementar la producción en este sector. En la época petrolera, comienzan acelerados movimientos migratorios principalmente entre la frontera colombiana, la región andina del país, las zonas urbanas del Centro-Norte, rurales de la región Noroccidental y Guayana (Álvarez, 2004), con el objetivo de incrementar la explotación minera. Estos movimientos demográficos han producido una nueva distribución de la población con la aparición de nuevos centros urbanos, como los enclaves mineros, en el estado Bolívar (Aymard, 1987 ; Bevilacqua *et al.*, 2007), o los agropecuarios y madereros en la región noroccidental del país (Catalán, 1992; Torres, 2008).

Mientras, los factores políticos e institucionales que ocasionaron el 22,1% de los procesos de deforestación, comienzan a actuar desde la época colonial, cuando los colonos establecieron una política de explotación agrícola para el abastecimiento de parte del mercado europeo (Abarca, 2006). Posteriormente, en la época pre petrolera, la oligarquía agraria de la nueva república, mantiene esa política de exportación. En la época petrolera, el Estado, implanta una política de desarrollo económico basado en los ingresos petroleros, que afectó a los sectores agrario, maderero y minero del país, mediante la creación de leyes e instituciones (Rojas, 2008).

Otro factor a tener en cuenta para explicar los cambios en la cobertura boscosa, es el económico, con una importancia relativa del 20,5%. Este factor influye desde la época colonial y pre petrolera, donde el crecimiento económico está basado en la exportación

de productos agrícolas. Posteriormente, desde la época petrolera, la comercialización principal que ha tenido el país se ha basado en la venta de esta materia prima. Con los ingresos de este recurso, el Estado, impulsó el desarrollo del país, mediante el otorgamiento de créditos, la construcción de infraestructuras y la instalación de industrias básicas de procesamiento (Rojas, 2008).

Por su parte, los factores tecnológicos ocasionaron el 9% de los cambios en la cubierta forestal. Ya en la época precolombina, mediante la construcción de infraestructuras para ampliar y mejorar las zonas de cultivos agrícolas, en las diferentes regiones del país (Sanoja and Vargas, 2007). Luego desde la época petrolera, el Estado ha realizado distintas acciones para modernizar la agricultura, a través, de inversiones en maquinaria y productos agroquímicos.

Finalmente, los factores culturales explican el 7,4% de las superficies deforestadas. Este factor ha tenido una importancia similar, a lo largo de distintas épocas. En este sentido, las comunidades que viven en contacto con los bosques, han aprovechado históricamente ese recurso, mediante usos y costumbres tradicionales. Un ejemplo lo encontramos en los grupos indígenas de la región de la Guayana y Amazonía, quienes cultivan la tierra y luego la dejaban descansar, durante un tiempo para conseguir la recuperación de nutrientes (Jordan, 1989). Estos usos ancestrales se vieron modificados en el tiempo, a partir del crecimiento de estas poblaciones indígenas que desembocó en usos más sedentarios, al tiempo que se sucedió un proceso de transculturación, cuando estas poblaciones indígenas tomaron contacto con el mundo civilizado. Estos hechos han provocado que en la actualidad, el comportamiento individual y familiar de estos grupos se asocie con el uso intensivo de los recursos forestales, convirtiéndose en una amenaza para los bosques (Bevilacqua *et al.*, 2007).

Interacciones y “feedback” de las causas principales y subyacentes

No solo los factores, de manera individual, conducen a la deforestación, sus múltiples interacciones, también conducen a estos procesos, por lo que es importante conocer la dinámica de este sistema. En este sentido, se señalan en la figura 1.5, los principales porcentajes de interacción entre las causas principales y subyacentes que motivaron la deforestación. En la mayoría de los casos, de tres a cinco factores causales subyacentes influyeron en las causas primarias, estos patrones de interacción variaron según las épocas y regiones.

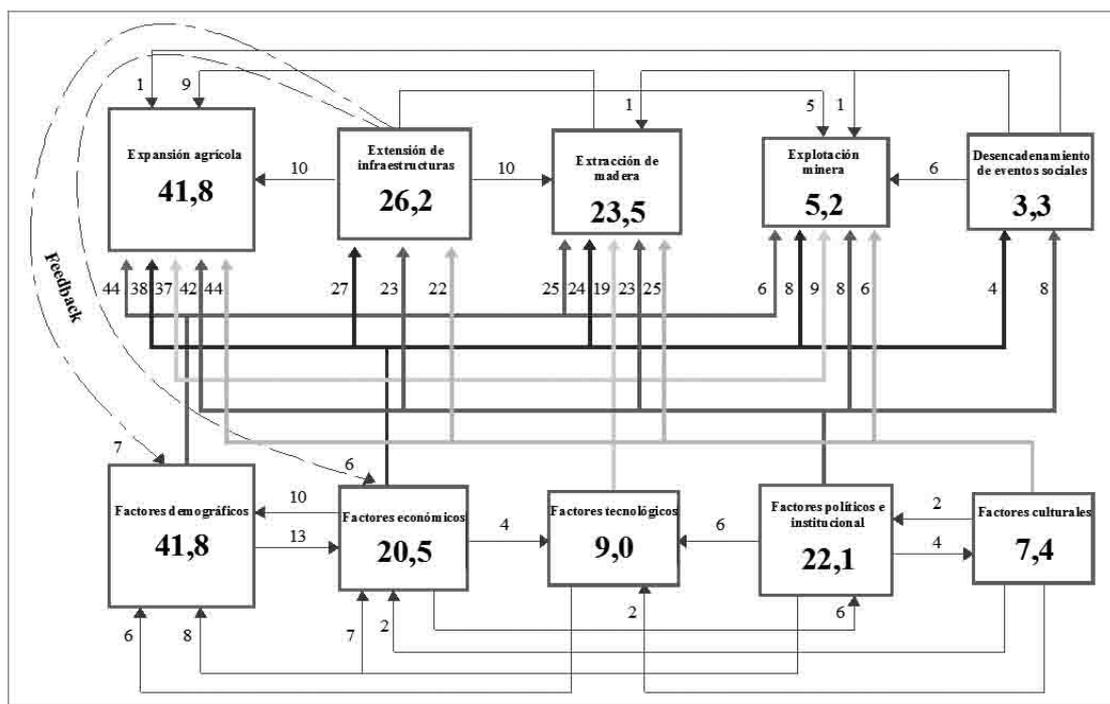


Figura I.5. Los patrones causales y la dinámica de este sistema, comúnmente, conducen a la deforestación en Venezuela. Ninguna variable única, actúa unilateralmente, las causas subyacentes actúan sobre las causas principales para que se produzca la deforestación. Por ejemplo, el 44% del factor demográfico, actúa en la expansión agrícola, o el 23% del factor político institucional actúa en la extracción de madera.

Así tenemos que el 44% de los factores demográficos interactúa con la expansión agrícola a través de tres vías:

1) *Las migraciones*, generadas por la población de escasos recursos, que provienen principalmente, de otras regiones del país o de la frontera colombiana o brasileña. Estos movimientos han generado deforestación en distintas zonas del país (ej. zona sur del Lago de Maracaibo y los Llanos Occidentales), debido a la necesidad de tierras para el establecimiento de la agricultura y ganadería (Catalán, 1992; Rojas, 2008). Estos procesos están ligados a factores políticos, el boom petrolero ó cuando se crearon las leyes agrarias.

2) *El crecimiento demográfico y la distribución poblacional*, es otro elemento del factor demográfico que ha propiciado la aparición de nuevas áreas urbanas y ha expandido la frontera agrícola. Este proceso ha afectado, en numerosas ocasiones, a las tierras boscosas que se encuentran protegidas bajo la figura jurídica de parques nacionales. Ejemplos de ello los encontramos, en el sector de Los Andes, en la región Noroccidental o en la Cordillera Costera de la región Centro-Norte (Lozada, 2007).

3) Otro aspecto a considerar dentro del factor demográfico es el *incremento de la población indígena*, en la región de la Guayana, y su contacto con el mundo occidental. Como se comentó anteriormente, estos cambios en la población indígena han generado un proceso de transculturación, que ha creado nuevas necesidades de bienes y servicios. Ello implica la extracción de mayores recursos del bosque. De este modo, los sistemas agrícolas de pequeña producción se han transformado en sistemas agrícolas comerciales o semi-comerciales. Asimismo, la explotación minera a pequeña escala de oro y diamantes, ha aumentado su producción para satisfacer estas necesidades. Estos procesos, en muchos de los casos se han originado bajo los valores y creencias de estas poblaciones indígenas.

Otra interacción entre factores, identificada a través de la consulta bibliográfica, se refiere a los factores políticos e institucionales, que han estado asociados a los factores económicos, representados por los ingresos que ha percibido el país. Este superávit económico, se ha utilizado para incentivar el crecimiento económico y modernizar el país, mediante la promulgación de leyes o la aparición de nuevas instituciones.

Estos factores políticos y económicos han interactuado respectivamente, en un 42% y 38% con la expansión agrícola, en un 23% y 24% con la explotación maderera y en un 8% y 8% con la explotación minera. Un ejemplo, es el sector agrario, donde la Ley de Reforma Agraria (1960) y su sucesora la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario (2005), han generado programas de dotación de tierras, créditos y cambios tecnológicos, con la finalidad de aumentar la producción agropecuaria del país. A pesar de estas buenas intenciones, el clima político de corrupción institucional y la mala gestión de estas leyes, ha llevado a conflictos sociales en la región Noroccidental del país. Se confirman, desplazamientos bruscos, hacia las reservas forestales, con el fin de acceder a la propiedad de las tierras. Como consecuencia de este proceso, actualmente se aprecia en esta región, la desaparición casi absoluta de los bosques (Lozada, 2007).

Algunos “feedback” amplifican los procesos de deforestación. Por ejemplo, la extensión de infraestructuras ha interactuado en un 6% con el factor demográfico y en un 7% con el económico, Encontramos un ejemplo de ello en la construcción de la carretera troncal 005 en la década de los sesenta, para mejorar la comunicación entre los estados Táchira y Barinas. Esta infraestructura facilitó la accesibilidad a los

bosques primarios de Los Llanos occidentales (Rojas, 2008), lo que generó movimientos de población importantes, como consecuencia, se comenzaron a explotar sin control, bienes y servicios del bosque para su manutención y generación de recursos económicos.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio representa el primer intento para determinar las causas de la deforestación en Venezuela, lo cual no se había abordado a nivel nacional. Los trabajos que existen se han realizado a escala local o regional, éstos se han concentrado, específicamente, en la estimación de las tasas de deforestación, más no en evaluar los factores causales de las mismas.

La adaptación de la metodología de Geist & Lambin (2001) utilizada para estudiar la deforestación de los bosques tropicales, permitió conocer, a escala nacional, la compleja interacción entre causas principales y subyacentes, identificadas en la deforestación. No existe ningún vínculo universal, o ninguna causa principal está relacionada únicamente con una causa subyacente o viceversa. De este modo, la disminución de los bosques venezolanos está determinada por diferentes combinaciones de causas principales y fuerzas motrices subyacentes que tienen mayor o menor fuerza dependiendo de su contexto geográfico e histórico. No obstante, se puede señalar que la causa principal y subyacente con mayor influencia en la deforestación ha sido la expansión agrícola y el crecimiento demográfico, respectivamente, ambas con el 41,8% de participación.

El patrón más frecuente de interacción entre causas principales y subyacentes de las diferentes épocas y regiones, se derivó de las migraciones regionales, nacionales e internacionales que fomentaron la ocupación de tierras para el establecimiento de la agricultura. A su vez, este proceso de ocupación, estuvo alentado por factores políticos e institucionales, que aumentaron la actividad económica debido a la presión demográfica y a factores de tipo cultural.

Los resultados de este estudio pueden ser considerados como un primer avance para la modelización futura de los procesos de deforestación y nuevos planes de manejo forestal. La información actualizada sobre los procesos de deforestación ayudaría en la elaboración y publicación de inventarios sobre las emisiones antropogénicas de

gases de efecto invernadero y en la formulación de planes para reducir y controlar dichas emisiones. La conservación de la masa boscosa y el establecimiento de nuevos bosques en el país servirán de sumidero del CO₂ (el gas más común del efecto invernadero). Todo ello dentro de los compromisos adquiridos por Venezuela ante el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC), el cual fue firmado por 155 países en la “Cumbre de la Tierra”, con el propósito de estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero que producen el calentamiento global.

5. Agradecimientos

El primer autor quiere agradecer a la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, por la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado en la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), Madrid, España, A G. Romero-González (Harvard University) por la ayuda en la elaboración del re-sumen en inglés, a Gerardo Aymard (UNELLEZ-Guanare), José Lozada (ULA) y Nidia Cuello (UNELLEZ-Guanare) por los comentarios y sugerencias a la primera versión del manuscrito.

6. Referencias

- Abarca, K., 2006. Economía agraria en América Latina: Del ecologismo prehispánico a la modernidad globalizadora *Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura* 12 195-206.
- Álvarez, R., 2004. La dinámica migratoria Colombo-Venezolana: evolución y perspectiva actual. *Geoenseñanza* 9, 191-202.
- Aymard, G., 1987 Observaciones sobre el estado de la vegetación en las concesiones mineras, al noroeste de La Clarita (06° 13' N; 61° 26' O) Distrito Sifontes, Estado Bolívar, Venezuela. *Bol. Téc. Programa de R.N.R. (UNELLEZ-Guanare)* 13 39-59.
- Aymard, G., Schargel, R., Berry, P., Stergios, B., 2009. Estudio de los suelos y la vegetación (estructura, composición florística y diversidad) en bosques macrotérmicos no-inundables, estado Amazonas Venezuela (aprox. 01° 30'-05° 55' N; 66° 00'- 67° 50' O). *Biollania (Edic. Esp.)* 9, 6-251.
- Bevilacqua, M., Medina, J.D., Cárdenas, L., 2007. Situación de los bosques en la Guayana, Venezuela: La Cuenca del Río Caura como caso de estudio In. *Asociación Venezolana para la Conservación de Áreas Naturales ACOANA, Caracas Venezuela.*
- Bontemps, S., Defourny, P., van Bogaert, E., 2010. GlobCover 2009 Products description and validation report. In, European Space Agency (ESA) & The Université Catholique de Louvain, Belgium.

- Catalán, A., 1992. El proceso de deforestación en Venezuela entre 1975-1988. In. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas, Venezuela.
- Cunill, P., 1995. Ciudad venezolana y medio ambiente en el siglo XIX. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 15, 247-256.
- Denman, K., Brasseur, G., 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. In. Cambridge University Cambridge Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- FAO, 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report*. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p. 378.
- 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. LUCC International Project Office, Louvain-la-Neuve, Belgium, p. 116.
- Geist, H., Lambin, E., 2002. Proximate cause and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52, 143-150.
- Hubbell, S.P., He, F., Condit, R., Borda-de Agua, L., J., K., H., t.S., 2008. How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct?. *PNAS* 105, 11498-11504.
- IGVSB, 1999. *Mapas de regiones naturales de Venezuela*. In, Caracas - Venezuela.
- Jordan, C.F., 1989. An Amazonian rain forest (The structure and function of a nutrient stressed ecosystem and the impact of Slashand burn agriculture). In: 2., M.a.t.B.s.V. (Ed.). UNESCO, Carnforth, U.K.
- JRC, 2005. A Proposal for Defining the Geographical Boundaries of Amazonia. . In: Eva, H., Huber, O., (Ed.). Joint Research Center, Ispra, Italy. , p. 38.
- Lambin, E.F., H., G., Lepers, E., 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28, 205-241.
- Lambin, E.F., Meyfroidt, P., 2010. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy* 27, 108-118.
- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., Scholes, 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. LUCC Report Series 7. In. The International Livestock Research Institute Nairobi, Kenya y LUCC Focus 3 Office, Wageningen University the Netherlands.
- Lindorf, H., 2008. Historia de las exploraciones botánicas en Venezuela. In: O. Hokche, P.B.y.O.H.F.I.B.d.V.D.T.L. (Ed.), *Nuevo Catálogo de la Flora Vasculare de Venezuela*, Caracas, Venezuela, pp. 17- 40.
- Lozada, J.R., 2007. Situación actual y perspectivas del manejo de recursos forestales en Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 51, 195-218.
- Mather, A., Needle., C., 2000. The relationships of population and forest trends. *The Geographical Journal* 166, 2-13.
- Meyfroidt, P., Rudel, T.K., Lambin, E.F., 2010. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *PNAS* 107, 20917-20922.
- MINAMB, 2005. *Información forestal*. In. Dirección General de Bosque. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Caracas, Venezuela.
- MINAMB, 2009. *Embalses de Venezuela*. In. Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Caracas, Venezuela.
- Munder, S., 2003. Oil wealth and the fate of the forest. A comparative study of eight tropical countries. . Taylor & Francis Group, London United Kingdom: Routledge.

- Olivo, B., 2008. Geografía de la minería. In: Polar, F. (Ed.), Geo Venezuela. Tomo 4 Caracas, Venezuela, pp. 28-149.
- Rojas, J., 2008. Venezuela. Cambios y desafíos territoriales desde la geodiversidad de la agricultura. Medio humano, establecimientos y actividades. In: Polar, F. (Ed.), Geo Venezuela. Tomo 3, Caracas, Venezuela, pp. 302-381.
- Sanoja, M., Vargas, I., 2007. El legado territorial y ambiental prehistórico e histórico. In: Polar, F. (Ed.), Geo Venezuela. Tomo 1, Caracas, Venezuela, pp. 73-129.
- Santamarta, S., 1999. La situación actual del Bosques en el Mundo. In, Historia de los Bosques. España Celeste, España, pp. 481-506.
- Torres, A., 2008. La cuidada movilización de los recursos forestales. La industria forestal. Medio humano, establecimientos y actividades. In: Polar, F. (Ed.), Geo Venezuela. Tomo 3, Caracas, Venezuela, pp. 382-438.
- Turner, B., Clark, W., Kates, R., Richards, J., Mathews, J., Meyer, W., 1990. The earth as transformed by human action. Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. In: University, C.U.P.w.C. (Ed.), Cambridge.
- Turner, B., Moss, R., Skole, D., 1993 Relating land use and global land-cover change. A proposal for IGBP-HDP core project (IGBP Report; 24/HDP Report; 5). In: Programme, I.G.-B.P.a.t.H.D.-s.o.G.E.C. (Ed.), Stockholm.
- UNFCCC, 2001. COP-7: The Marrakech accords. In: Secretariat, U. (Ed.), Bonn, Germany, p. 245.
- Veillón, J., 1977. Las deforestaciones en los Llanos Occidentales de Venezuela desde 1950 a 1975. In: Venezuela, C.d.I.B.H.d. (Ed.), Caracas, Venezuela, pp. 97-110.
- Wibowo, D., Byron., R., 1999. Deforestation Mechanisms. A survey. International Journal of Social Economics 26, 455-474.
- Zucchi, A., Denevan, W.M., 1979. Campos elevados e historia cultural prehispánica de los llanos Occidentales de Venezuela Ediciones de la Universidad Católica Andrés Bello Caracas.

Capítulo II. Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos

Publicación derivada:

Pacheco C, Aguado I, Mollicone D (2011). Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos. *Interciencia*: 36 (8) 578-586.

Resumen

En este trabajo se evalúa la dinámica de los bosques de Venezuela, mediante técnicas de detección de cambios aplicadas a una serie de mapas históricos. El análisis permite identificar la superficie boscosa, las ganancias, pérdidas, cambios netos, tasas anuales de deforestación y porcentajes de pérdida del bosque en diferentes períodos entre 1920 y 2008. El estudio muestra que el mayor avance del bosque se produjo entre 1920-1960 con una ganancia de 8.699.600ha, mientras que las mayores pérdidas y cambios netos se presentaron entre 1960- 1982, con -15.168.200ha y -10.877.800ha, respectivamente. Asimismo, para todo el periodo evaluado (1920-2008), se perdieron el -26,43% (-17.935.800ha) de los bosques venezolanos, con una tasa promedio anual de -0,30%, siendo las zonas más afectadas la región Noroccidental, específicamente los Llanos occidentales y el sur del Lago de Maracaibo. El período entre 1982 y 1995 ha sido el más crítico para todo el país, por presentar la tasa promedio anual de pérdida más alta del período con -0,93% (-528.522ha). A pesar de que en la última década ha habido una recuperación del bosque de 3,27% (1.631.600ha), debido principalmente al proceso de expansión natural, la deforestación continúa, de manera alarmante, con pérdidas de -288.000ha/año. Los resultados han sido validados con estudios locales de deforestación.

Palabras claves: Deforestación, detección de cambios, dinámica, mapas históricos, Venezuela.

Abstract

This paper evaluates forest dynamics in Venezuela, using change detection techniques applied to a series of historical maps. The analysis allows the identification of forest area, loss, gain, net change, annual rates of deforestation and forest loss percentages in different time periods between 1920 and 2008. The study shows that the largest forest gain took place between 1920 and 1960, with an increase of 8,699,600ha, while the biggest losses and net changes occurred between 1960 and 1982, with -15,168,200ha and -10,877,800ha, respectively. Also, for all the period evaluated (1920-2008), -26.43% (-17,935,800ha) of the Venezuelan forests were lost, at an annual rate of -0.30%, being the most affected areas the Northwest region, in particular the Western Llanos and the south of the Maracaibo Lake. The period between 1982 and

1995 was the most critical for all the country, as it shows the highest mean annual rate of forest loss in the whole period with -0.93% (-528,522ha). Despite the fact that in the last decade there has been a forest recovery of 3.27% (1,631,600ha), mainly due to the natural expansion process, deforestation continues at an alarming rate, with losses of 288,000ha/year. The results have been validated with local studies on deforestation.

Key words: Deforestation, detection of changes, dynamics, historical maps, Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

La región de la Amazonía posee la mayor extensión de bosques primarios originarios, goza de la quinta parte de las disponibilidades mundiales de agua dulce y conserva el mayor río del planeta con más de 1000 afluentes y 2400 especies de peces (Santamarta, 1999). Estos bosques amazónicos fueron delimitados geográficamente en una propuesta realizada por el Joint Research Center a la Comisión Europea (JRC, 2005). El estudio determinó que dichos bosques poseen una superficie de 812.131.300ha. Asimismo, según lo declarado por cada país integrante del Tratado de Cooperación Amazónico (TCA), Bolivia posee el 7,9%, Brasil 67,8%, Colombia 5,5%, Ecuador 1,7%, Guyana 2,8%, Perú 10,0%, Suriname 1,9% y Venezuela 2,4% (Gutiérrez *et al.*, 2004).

La Amazonía venezolana se sitúa en el estado Amazonas con 18.014.500ha. Sin embargo, en el estudio del JRC (2005) se incluyó dentro de la Amazonía venezolana al estado Bolívar, lo que significa un aumento del área a 43.595.000ha; es decir 5,6% de toda la Amazonía. Los bosques amazónicos de los estados Amazonas y Bolívar, ubicados al sur del río Orinoco, junto con los bosques del norte del río Orinoco, ocupan según las estadísticas FRA 2010 (FAO, 2010) el 50,49% (46.275.000ha) de la superficie total de Venezuela (91.644.500ha). Estas cifras sitúan a Venezuela entre los 45 países del mundo que poseen una superficie forestal superior al 50% de su territorio y entre los 15 países con mayor área de bosques primarios y quinto con mayor bosque de Suramérica.

No obstante, históricamente Venezuela ha poseído mayor superficie de bosque que la señalada en la actualidad, puesto que las únicas áreas desprovistas de vegetación boscosa se ubicaban en los Andes y en los Llanos Centrales (Munder, 2003). La situación actual de los bosques venezolanos es producto de cambios en el uso y

ocupación del suelo que desde épocas precolombinas ocasionaron grandes pérdidas de la cobertura vegetal (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I).

Para estudiar y comprender estos impactos, existen diversas metodologías. Por un lado, está el método basado en el estudio de casos a nivel local, que explica el modelo causal de la deforestación tropical (Mather and Needle, 2000). Los estudios de casos a nivel local identifican las causas de las pérdidas de la cobertura vegetal a través de análisis estadísticos, como el exploratorio de datos, regresión, estadísticas bayesianas y redes neuronales artificiales (Lesschen *et al.*, 2005), o a través del análisis de la literatura (Lambin *et al.*, 2003; Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I). Otro método para abordar la dinámica de la cobertura vegetal consiste en aplicar un análisis de detección de cambios, en la cobertura a partir de mapas históricos (Petit and Lambin, 2001, 2002). Petit y Lambin (2002) realizaron la reconstrucción histórica de los cambios en la cubierta terrestre en la población de Lierneux Ardennes (Bélgica) en los últimos 225 años, a partir de una serie temporal de datos heterogéneos; utilizaron un método de integración de datos que consistió, por un lado, en la generalización de la leyenda de los mapas y, por otro, en la agregación espacial de cada mapa, llevando a una resolución espacial de 400m. Esta metodología permitió cuantificar, la tasa anual de deforestación en 1,40%.

Como objetivo principal de este estudio se ha establecido realizar un análisis de la dinámica de los cambios del bosque en Venezuela. Se aplica un análisis de detección de cambios en la cobertura vegetal entre 1920 y 2008. La validación de los resultados se basa en la utilización de estudios de deforestación locales, con el fin de contrastar la magnitud de los procesos de cambio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La República Bolivariana de Venezuela está situada en la parte septentrional de Suramérica, entre 00°38'53"- 12°12'00"N y 59°47'50"-73°22'38"O, y cuenta con una superficie de 91.644.500ha (Figura II.1). Posee un clima tropical lluvioso en la mayor parte del país, con una temporada seca marcada por la presencia de la alta presión del Atlántico y una temporada de lluvias afectada por la Zona de Convergencia

Intertropical. La precipitación varía desde valores inferiores a 40mm anuales, en las zonas áridas y semiáridas de las regiones centrales y costeras, hasta valores superiores a 4000mm en el sur, en las zonas tropicales. Las temperaturas medias diarias oscilan desde 28°C en zonas bajas continentales, hasta valores por debajo de 0°C en los páramos andinos. El país se divide en nueve regiones naturales: Los Andes, Depresión del Lago de Maracaibo, Región Insular, Cordillera de la Costa, Sistema de Colinas Lara-Falcón, Región Costera, Delta del Orinoco, Los Llanos y Guayana. La población, según el censo de 2001, es de 23.054.210 habitantes (MINAMB, 2005).



Figura II.1. Regiones identificadas en Venezuela para el análisis de la dinámica de la deforestación.

2.2. Datos

La serie temporal de mapas utilizada (Tabla II.1) está compuesta por seis documentos cartográficos. El primero es el *Mapa Ecológico de Venezuela* (Pittier, 1920), a escala 1:2M (millones). Bajo consideraciones técnicas más precisas en los criterios de clasificación y tomando como base el mapa físico y político del país de 1896, éste fue el primer documento realizado para clasificar la vegetación existente en Venezuela

(Duno de Stefano *et al.*, 2006). El segundo mapa es el *Mapa de Vegetación de Venezuela* (Hueck, 1960) a escala 1:2M, realizado en base a fotografías aéreas y al mapa físico y político del país de 1928, y utilizando como sistema de clasificación el planteado por Holdridge de 1947. El tercer documento utilizado es el *Mapa de Vegetación Actual de Venezuela* a escala 1:250.000, publicado por el antiguo Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales y Renovables (MARNR, 1982), cuya cartografía fue obtenida a partir de datos de sensores remotos (fotografías aéreas, imágenes de satélite –óptico y radar– obtenidas en 1977). El cuarto mapa incluido en el estudio es el *Mapa de Vegetación de Venezuela*, a escala 1:250.000 (MARNR, 1995), elaborado a partir de imágenes Landsat TM de 1988.

Después de esta última fecha no se han editado más documentos cartográficos de vegetación en el país. Sin embargo, son de ayuda documentos cartográficos más recientes, que contienen información sobre la cobertura vegetal de Venezuela, generados a escala continental y global con el objetivo de servir de información básica a los modelos de circulación global, y que permiten conocer el estado actual de la biosfera y avanzar escenarios de futuros climas (Mayaux *et al.*, 2008). Se utilizaron dos de estos documentos. Uno de ellos es el *Mapa de Cobertura Global de la Tierra* (GLC2000), publicado con la colaboración de 30 instituciones internacionales y coordinado por el JRC, en 2001 (Bartholom *et al.*, 2005). Este mapa fue realizado a escala <1:5M con imágenes SPOT-VEGETATION de 1km² de resolución, con fechas que abarcan entre noviembre 1999 y diciembre 2000. Finalmente, se utilizó el *Mapa Global de Cobertura del Suelo* (GlobCover), publicado por la European Space Agency (Bicheron *et al.*, 2008), utilizando imágenes MERIS de 300m resolución. Las imágenes se obtuvieron entre diciembre 2004 y junio 2006 y la escala es <1:5M.

Tabla II.1. Homogenización de la leyenda y sistemas cartográficos de los mapas utilizados en la comparación.

| Año | Bosque | Leyenda | No bosque | Proyección original | Esferoide original | Formato original |
|------|--|--|-----------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| 1920 | Selva xerófila, veranera, pluvial y templada | Sabana y paramo. | | | | Analógico (en papel) |
| 1960 | Selva (higrófila: inundada y siempreverde), bosque (higrófilo mesófilo, decíduo mesófilo, decíduo semi-seco, seco, de galería); y manglar. | Estepas, praderas, paramo y otras. | | | | Analógico (en papel) |
| 1982 | Bosque (diferenciado por piso altitudinal, caducifolia, altura, densidad, fisiografía, intervención e inundación), bosque de galería (diferenciado por piso altitudinal y fisiografía), manglar. | Matorral, espinar y sabanas y otras. | | Universal Transversal Mercator | La Canoa | Digital (vectorial) |
| 1995 | Bosque (diferenciado por piso altitudinal, caducifolia, altura, densidad, fisiografía, intervención e inundación), bosque de galería (diferenciado por piso altitudinal y fisiografía), manglar. | Arbustales, herbazal, páramo y otras. | | Lambert Conformal IConic | WGS84 | Digital (vectorial) |
| 2001 | Árboles siempreverde (>15% de cobertura y 3m de alto), arboles deciduos cerrado, arboles regularmente inundado de agua dulce y arboles regularmente inundados de agua salada | Arbustos de hoja caduca, herbazales, herbazales o arbustos escasos, arbustos y / o herbácea regularmente inundado, cultivos y áreas manejadas, mosaico cultivo / árbol / vegetación natural y otras, mosaico de cultivo / arbusto o hierbas, áreas desnudas. | | Geográfica (Lat/Lon) | WGS84 | Digital (raster) |
| 2008 | Bosque de hoja perenne y / o semi-deciduos (> 15%, > 5m), bosque caducifolios (> 40%, > 5m), bosque regularmente inundados con agua dulce, bosque semideciduos y / o siempre verde (> 40%) regularmente inundados con agua salina. | Secano, cultivo (50-70%) / pastizal, matorral; pastizal, matorral / cultivo (20-50%); matorral (50-70%) / pastizales (20-50%), pastizales (50-70%) / matorral (20-50%), arbustales (> 15%) (<5 m), pastizales (> 15%), vegetación escasa (> 15%), vegetación cerrada (> 15%), vegetación inundadas con agua dulce y con agua salina. | | Plate-Carrée | WGS84 | Digital (raster) |

2.3. Métodos

La reconstrucción histórica de los cambios de cobertura del suelo requiere, a menudo, de la comparación de mapas de diferentes fuentes (Petit and Lambin, 2002). Este proceso de comparación de mapas es denominado por algunos como wall-to-wall (Achard *et al.*, 2002). Consiste en utilizar mapas de vegetación que comprendan toda el área de estudio para determinar la pérdida o ganancia del bosque en su conjunto. Bajo esta premisa, se analizaron los procesos de cambio de la cobertura de los bosques a través de una serie temporal de seis mapas. La combinación de estas fuentes heterogéneas requirió una homogenización previa en el contenido temático de los mapas y posterior generalización. Una vez efectuada la homogenización y generalización se aplicó un análisis de detección de cambios, lo que permitió cuantificar la cobertura vegetal y los cambios experimentados entre fechas.

2.3.1. Homogenización de los datos

Ésta se llevo a cabo en dos etapas: 1) Generalización temática, donde las categorías de cada mapa se agruparon en dos nuevas categorías, bosque y no bosque (Tabla II.1); y 2) Homogenización de formato y de proyección cartográfica, mediante la

transformación a un formato digital único, ya que los mapas se encontraban en diferentes formatos (analógico y digital) y en diferentes referencias cartográficas (proyecciones y esferoide).

Respecto a la generalización temática, las categorías iniciales se agruparon en dos clases: bosque y no bosque. Se consideraron en cada mapa los sistemas de clasificación utilizados para discriminar las coberturas vegetales; que fueron evolucionando desde seis categorías con el mapa de Pittier de 1920, hasta 23 categorías con el mapa GlobCover de 2008. Esta evolución queda evidenciada en los criterios utilizados para diferenciar los bosques, donde se consideró el clima, nivel de inundación, topografía, caducifolia, localización geográfica, altura de los árboles y densidad de cobertura sobre el suelo. De esta manera, se diferenciaron (Tabla II.1) cuatro unidades básicas de selvas en el mapa de Pittier (1920), 11 de selva y bosques y 1 de manglar en Hueck (1960), 2 de bosque y 1 manglar en MARNR (1982 y 1995), 4 de árboles y 1 de manglar en GLC2000 (2001) y 4 de bosque y 1 de manglar en Globcover (2008).

Por su parte, la homogenización de formatos cartográficos se llevó a cabo siguiendo los siguientes criterios: se estableció como sistema de referencia cartográfica la proyección Lambert Conformal Conic y como esferoide el WGS84; como límite político-administrativo se tomó el oficial para Venezuela, establecido por el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB); asimismo, se adoptó una resolución espacial manejable para todo el país de 300m. Con estos parámetros se realizó la transformación del formato de los mapas. Primero, se digitalizaron aquellos mapas en formato analógico, a través del método manual en pantalla. Luego se transformaron a formato raster las capas vectoriales generadas, junto con los mapas que ya se encontraban en el formato vectorial. Finalmente, de los mapas que se encontraban en formato raster, a escala global, se extrajo la superficie de Venezuela, y se re proyectaron con los parámetros mencionados.

2.3.2 Detección de cambios en la cobertura vegetal

Una vez homogeneizados los datos, se identificaron las áreas de bosque en Venezuela, entre 1920 y la actualidad, y se aplicó un análisis de detección de cambios en la cobertura vegetal, por medio de una tabulación cruzada, que se efectuó

mediante dos enfoques propuestos por Petit y Lambin (2002): el primero compara cada par de mapas de la serie temporal y el segundo toma como referencia el mapa de la primera fecha (1920), y a partir de éste se realiza la detección de cambios con los demás mapas de la serie. Este doble enfoque permitió obtener una matriz de confusión por cada detección de cambios, y a partir de éstas se derivaron las pérdidas, ganancias y cambios netos, mediante las ecuaciones planteadas por Pontius et al. (2004):

$$P\acute{e}rdida = Superficie\ inicial\ de\ bosque - Persistencia\ de\ bosque$$

$$Ganancia = Superficie\ inicial\ de\ no\ bosque - Persistencia\ de\ no\ bosque$$

$$Cambios\ netos = P\acute{e}rdida - Ganancia$$

De igual manera, se calcularon las tasas de deforestación a través de la ecuación planteada por Sader y Armond (1988):

$$Porcentaje\ por\ a\tilde{n}o = ((B1 - B2) * 100) / (B1 * N)$$

Donde, $B1$ es el área de bosque en la fecha inicial, $B2$ es el área de bosque en la fecha final y N el número de años del período.

Por último, se analizaron los lugares donde ocurrieron dichos procesos. Para facilitar este análisis se utilizaron cuatro regiones geográficas: Noroccidental, Centro-Norte, Nororiental y Sur (Figura II.1) que fueron derivadas de los límites de las Regiones Naturales del país, comentadas en el apartado del área de estudio (IGVSB, 1999).

2.3.3. Validación

Con el propósito de contrastar los cambios identificados en la cobertura forestal en Venezuela a través de la detección de cambios, y conocer la magnitud de estos cambios mediante sus respectivas tasas, se consultaron estudios locales sobre deforestación (Tabla II.2). Estos estudios han sido realizados en su mayoría por universidades e instituciones gubernamentales. Se han concentrado en la subregión

Capítulo 2. Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos

Noroccidental y la región Sur del río Orinoco, donde se han producido la mayoría de los procesos de pérdida de los bosques del país. Los análisis están basados en datos procedentes de distintos sensores remotos y en distintos periodos de tiempo, apoyados en rigurosos chequeos de campo, tanto para la interpretación como para la validación, lo que hace que sean una fuente confiable de referencia para contrastar los cambios identificados en el presente trabajo.

Tabla II.2. Estudios sobre deforestación realizados en Venezuela, utilizados en la validación.

| Región | Subregión | Zona | Ubicación | Autor | Año de estudio | Periodo analizado | Pérdida (-) o ganancia (+) ha | Pérdida (ha/año) | Tasa (%/año) | | | | | |
|----------------------|---|---------------------------|--|------------------------|----------------|-------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------|--------|----------|-----------|--------|------|
| Norte | Noroccidental | Toda la Subregión | | Catalán | (1992) | 1975-1988 | -2.940.326 | -216.188 | -2,72 | | | | | |
| | | Llanos Occidentales | Todos la Llanos occidentales | Veillón Matute | (1977) | 1950-1975 | -1.801.598 | -128.726 | -3,29 | | | | | |
| | | | | | (1984) | 1963-1979 | -1.289.000 | -50.000 | - | | | | | |
| | | | R.F. Ticoporo | Chuvieco <i>et.al.</i> | (2002) | 1972-1997 | - | -80.000 | - | | | | | |
| | | | | | (2002) | 1963-2001 | -80.000 | -3.200 | - | | | | | |
| | | | | | (2002) | 1972-1978 | -135.225 | -3.424 | -2 | | | | | |
| | | | R.F. Caparo | Pozzobon | (1985) | 1972-1978 | -5.691 | -948,50 | - | | | | | |
| | | | | | (1995) | 1987-1994 | -28.931 | -4.133 | -2,35 | | | | | |
| | | Cuenca río Zulia | Maldonado Peñaloza <i>et al.</i> | (2009) | 1987-2007 | -95.961 | -4.798 | -3,2 | | | | | | |
| | | | | (2008) | 1998-2002 | -1.000 | -250 | - | | | | | | |
| | | Sur del Lago de Maracaibo | Toda la zona Cuenca río Torondoy Cuenca río Tucaní Cuenca río Frío P.N. Sierra La Culata | Catalán | (1992) | 1975-1988 | -994.582 | -82.882 | -7,43 | | | | | |
| | | | | | | | 1988-2003 | -3.588 | -239,2 | -1,1 | | | | |
| | | | | Pozzobon <i>et.al.</i> | (2004) | 1986-2003 | -1.606 | -94,5 | -0,5 | | | | | |
| | | | | | | | 1986-2003 | -794 | -46,7 | -0,4 | | | | |
| | | Aldana y Bosque | (2008) | 1988-2003 | -13.623 | -908,2 | - | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Andina | Todo la zona Mérida Trujillo Táchira Cuenca del río Santo Domingo Cuenca del río Mucujún Cuenca Nuestra Señora Albarregas Burbusay y Miquía | Catalán | (1992) | 1975-1988 | -501.344 | -38.564,92 | -2,21 | | | | | | | |
| | | | | | 122.808 | -9.446,77 | -1,65 | | | | | | | |
| | | | | | 137.428 | -10.571,38 | -2,66 | | | | | | | |
| | | Lozano | (2006) | 1979-2005 | 241.108 | -18.546,77 | -2,33 | | | | | | | |
| | | | | | +404 | - | - | | | | | | | |
| | | Gutiérrez | (1999) | 1988-1996 | +877 | - | - | | | | | | | |
| | | | | | 1952-1972 | -4.131 | -207 | -3,6 | | | | | | |
| Hernández y Pozzobon | (2002) | 1952-1984 | -16,6 | -0,6 | -0,1 | | | | | | | | | |
| | | | 1966-1997 | -558,4 | -18 | -3,3 y -0,3 | | | | | | | | |
| Falcón | Cuenca San Pedro | Hernández -Pozzobon | (2002) | 1966-1977 | -961,7 | -32 | -2,1 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| Sur | Guayana | Amazonas | Todo el estado Amazonas | Meneses | (1992) | 1985-1990 | -43.480 | -8.696 | - | | | | | |
| | | | | | | | Bolívar | Bajo Caura | Bevilacqua <i>et al.</i> | (2007) | 1975-205 | -23.700 | -790 | -2,7 |
| | | | | | | | | | | | | 1975-1993 | -5.700 | -320 |
| | | | | | 1993-2005 | 18.000 | -1.500 | - | | | | | | |

3. RESULTADOS

3.1. Evolución de las superficies de vegetación boscosa

La elaboración de la serie temporal cartográfica sobre la vegetación boscosa de Venezuela entre 1920 y 2008 permite observar la distribución espacial de los bosques en este país (Figura II.2a) y la evolución de su superficie (Figura II.2b) a lo largo de los últimos 88 años. Los datos cartográficos muestran que en 1920 Venezuela poseía una superficie boscosa de 67.854.900ha; es decir, 74,04% de la superficie del país estaba ocupada por bosques, de los que 66,09% se ubicaban en la región sur y 33,91% al norte del río Orinoco; de este último porcentaje 19,97% pertenece a la región Noroccidental, 5,97% a la región Centro-Norte y 7,98% a la región Nororiental. Esta superficie descendió en 2008 a 49.919.100ha (54,47% de la superficie del país). En la actualidad, 73,36% de los bosques se localizan en la región Sur, 16,03% en la Noroccidental, 4,02% en la Centro-Norte y 6,59% en la Nororiental.

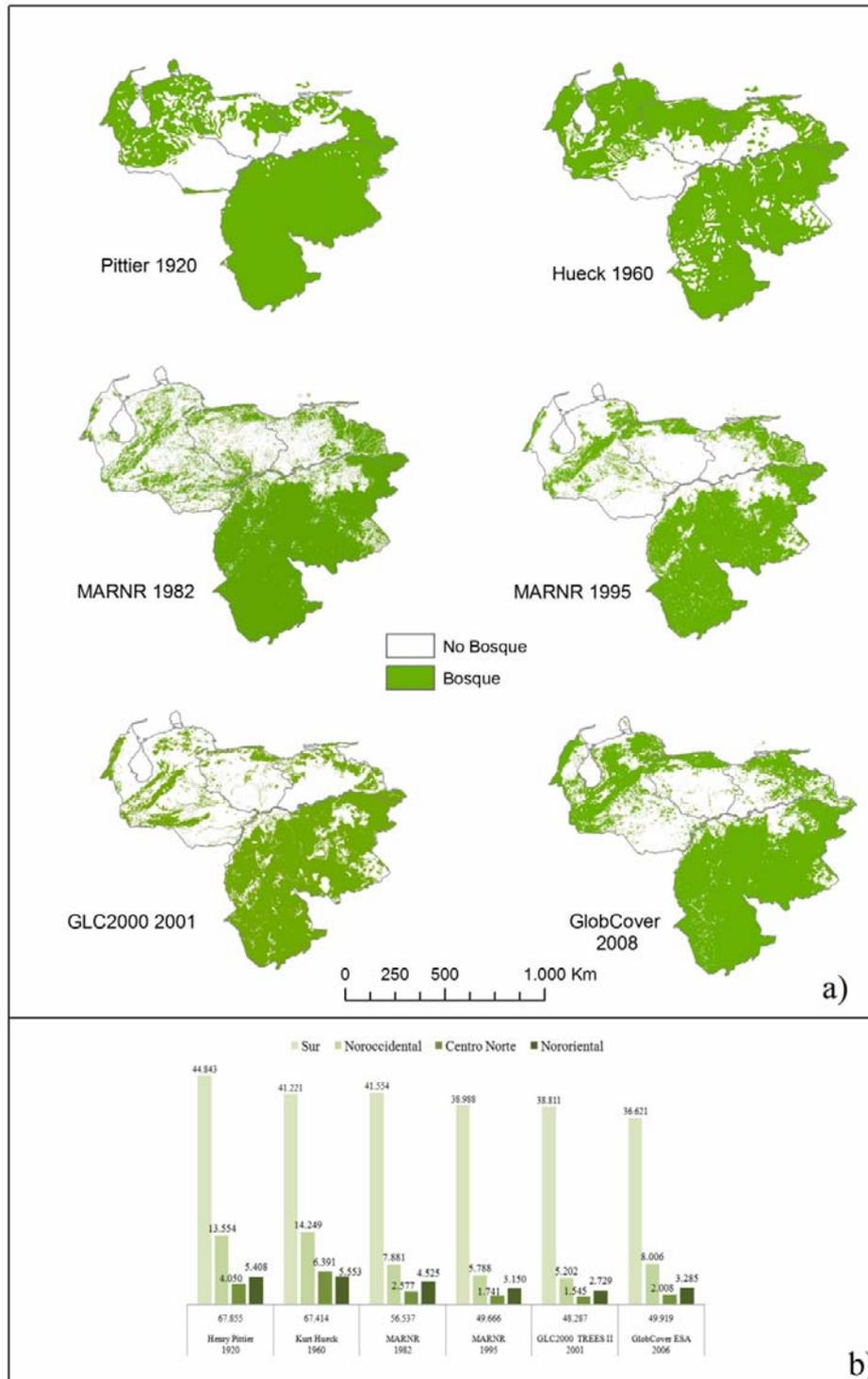


Figura II.2. Cobertura de los bosques en Venezuela en la serie de tiempo analizada. Distribución espacial (a) y su superficie forestal en miles de ha, en las distintas regiones (b).

3.2. Detección de cambios en la cobertura vegetal

El análisis de detección de cambios realizado para cada par de mapas secuencialmente, considerando la primera fecha como referencia, generó las pérdidas, ganancias y cambios netos. En la Figura II.3 se aprecia que las mayores ganancias entre periodos secuenciales ocurren entre 1920-1960 (8.699.600ha), seguido por el periodo 2001-2008 (5.808.500ha). El menor avance del bosque se produce entre 1982-1995 (1.722.800ha). Con respecto al período de mayores pérdidas y cambios netos, encontramos el período 1960-1982, con -15.168.200ha y -10.877.800ha, respectivamente, seguido del periodo 1982-1995 con -8.593.600ha de pérdidas y -6.870.800ha de cambios netos. Asimismo, cabe destacar que el único período que presentó un cambio neto positivo se registró entre 2001-2008, con 1.631.600ha.

Por otro lado, considerando la primera fecha como referencia, encontramos que el período con mayores ganancias fue 1920-1960 (8.699.600ha), seguido de 2001-2008 (7.509.800ha), mientras que las mínimas ganancias se localizaron en el período 1920-1982 (2.320.500ha). Con referencia a las pérdidas y los cambios netos, tenemos que éstas fueron aumentando secuencialmente, desde -9.140.100ha de pérdidas y -440.500ha de cambios netos para 1920-1960, hasta -25.445.600ha de pérdidas y -17.935.800ha de cambios netos para el periodo 1920-2008.

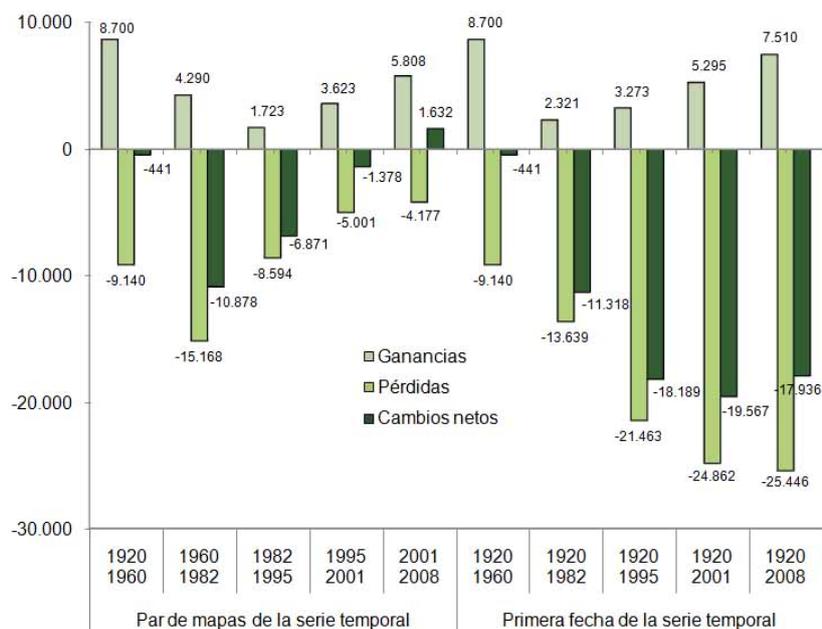


Figura II.3. Pérdidas, ganancias y cambios netos, generados de las matrices de confusión, para cada par de mapas secuencialmente y tomando como referencia la primera fecha de la serie temporal. Datos expresados en miles de ha.

Por su parte, las tasas anuales de deforestación en Venezuela (Figura II.4) muestran que el período 1982-1995 fue el de mayor tasa de deforestación (-0,93%), seguido de 1960-1982 (-0,73%). Las tasas fueron menores en 1995-2001 (-0,46%). El período inicial, 1920-1960, presenta la tasa de deforestación más baja de la serie (-0,02%). Finalmente, el último período analizado, 2001-2008, presentó una tasa positiva de 0,68%, lo que permite cierto optimismo respecto a la recuperación de los bosques en el país.

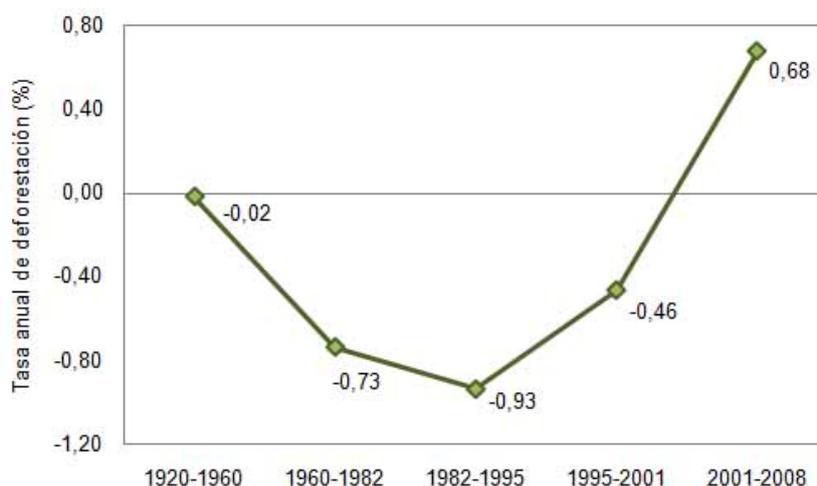


Figura II.4. Tasa anual de deforestación, en porcentaje, para cada par de series de tiempo analizadas.

La detección de cambios realizada tomando como referencia el año 1920 se expresa porcentualmente en la Figura II.5, donde se observa que las pérdidas van incrementándose desde -0,65% para el periodo 1920-1960 hasta su máximo de -28,84% en el periodo 1920-2001. Después de este último período, descendió el valor en -2,41% para el período siguiente entre 1920-2008. Si se toma la distribución de los cambios por regiones, se observa que la zona situada al Norte del río Orinoco ha sido la de mayor dinamismo en los cambios, empezando por una ganancia del bosque entre 1920 y 1960, donde se destaca la región Centro-Norte con un 57,80%, seguida de la Noroccidental con 5,13% y la Nororiental con 2,68%. Por su parte, el período con mayor porcentaje de pérdida se sitúa entre 1920 y 2001, con -61,86% en la región Centro-Norte, -61,62% en la Noroccidental y -49,53% en la Nororiental. En el período 1920-2008 ocurrieron nuevamente pérdidas, aunque en menor porcentaje: -50,42, -0,94 y -39,26% en las regiones Centro-Norte, Noroccidental y Nororiental, respectivamente. Las oscilaciones recientes muestran una recuperación del bosque, destacando la región Noroccidental con 20,68%.

Por su parte, la región Sur revela en la mayoría de los períodos una tendencia regular de pérdida de bosques. No obstante, entre 1920 y 1982 el valor disminuyó 0,75% con respecto al período anterior 1920-1960, lo que se interpretaría como una recuperación del bosque.

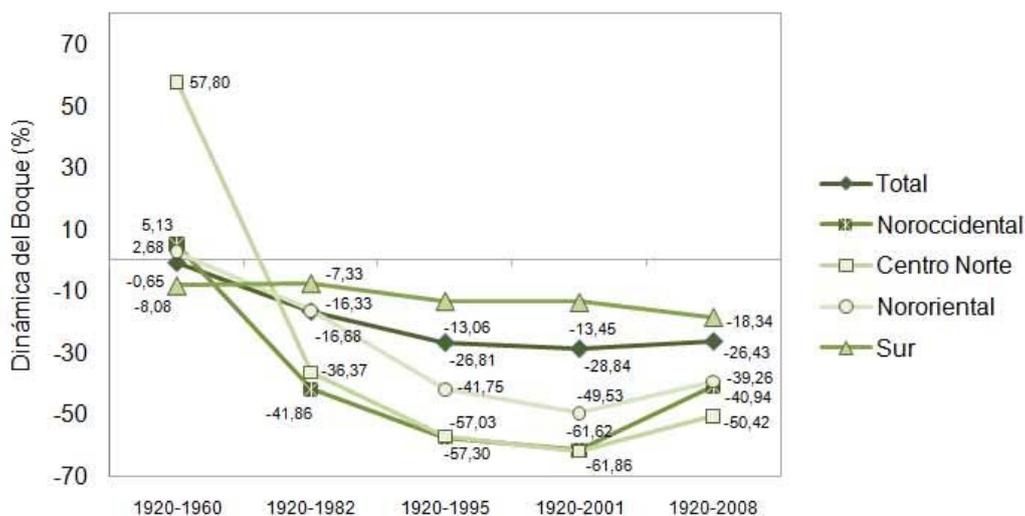


Figura II.5. Dinámica porcentual acumulada de las pérdidas y ganancias de los bosques, en cada par de series de tiempo, tomando como referencia la primera fecha (1920). Datos para todo el país, y por regiones.

La dinámica espacial de los cambios puede observarse en el mapa de la Figura II.6, donde se muestran las ganancias, pérdidas y cambios netos en las masas forestales para el período completo del estudio (1920-2008). Se observa que en los últimos 88 años la región sur de Venezuela permanece bastante estable, con algunos espacios afectados por un cambio neto de masas boscosas de -18,34%. Por el contrario, las zonas situadas al norte del río Orinoco muestran un alto grado de cambio de procesos de pérdidas y ganancias de vegetación, del -68,86 y 26,65% respectivamente, siendo su cambio neto de -42,21%.

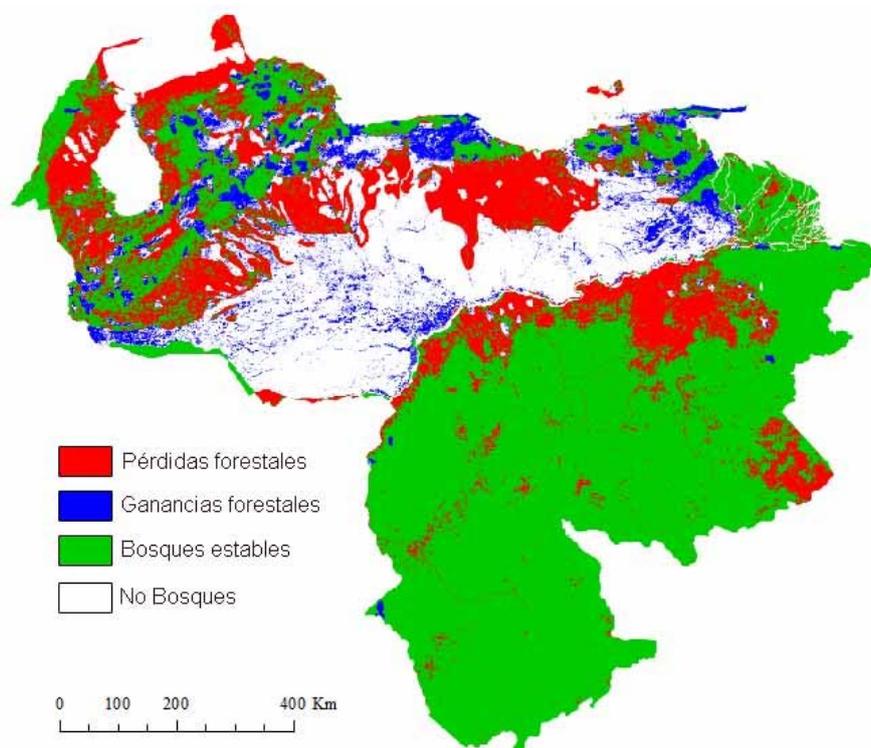


Figura II.6. Pérdidas, ganancias y bosques estables en Venezuela, durante los periodos de 1920-2008.

4. DISCUSIÓN

4.1. Dinámica de la deforestación

Los productos cartográficos utilizados fueron originados con diferentes objetivos. Esto significa que las escalas, los contenidos temáticos, los criterios metodológicos y las bases cartográficas empleadas fueron distintas, así como la precisión cartográfica final de cada uno de ellos. Todos estos productos cartográficos fueron validados durante su creación mediante chequeo de campo (1920, 1960, 1982 y 1995) e imágenes de alta

resolución (2001 y 2008). Sin embargo, se puede decir que el mapa de 1920 es el menos fiable, ya que sus bases cartográficas (mapas físicos y políticos de la época) se originaron con métodos antiguos de levantamiento topográfico, donde la referencia eran coordenadas astronómicas. En los mapas de 2001 y 2008, a pesar de utilizar técnicas avanzadas, la baja y media resolución espacial de su base cartográfica hacen que los procesos de generalización cartográfica se acentúen, dándole menor fiabilidad a nivel nacional. En este orden de fiabilidad puede considerarse el mapa de 1960, ya que se realizó en base a fotografías aéreas y a escala 1:2M para todo el país. Por su parte, los mapas de 1982 y 1995 son los de mayor fiabilidad, puesto que la base cartográfica utilizada fue de alta resolución y su interpretación fue llevada a cabo con personal técnico especializado de las distintas oficinas regionales del MARNR. A pesar de estas imprecisiones, los resultados presentados son una información valiosa para conocer de manera aproximada la dinámica de los bosques y el estado actual del complejo paisaje del país.

Desde un punto de vista espacial, las mayores pérdidas de bosque se concentraron en la región Noroccidental, específicamente la zona de los Llanos occidentales y la zona sur del Lago de Maracaibo. Temporalmente, las mayores ganancias se observaron entre 1920-1960 (8.699.600ha). Esta recuperación del bosque se debe al abandono de las tierras agrícolas, por el éxodo desde el medio rural hacia las áreas petroleras y urbanas, proceso provocado por el boom petrolero (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I). Por otro lado, las mayores pérdidas fueron de -15.168.200ha y los mayores cambios netos fueron de -10.877.800ha, los cuales se dieron entre 1960-1982, cuando el Estado implementó acciones políticas que transformaron el territorio, mediante la modernización de la agricultura, inversiones en los sistemas de riego, vialidad, saneamiento ambiental, vivienda, salud y educación (Rojas, 2008).

Durante todo el periodo analizado (1920-2008), se perdieron -17.935.800ha (26,43%) de bosques del país, con una tasa promedio anual de -0,30%. Los mayores promedios de tasas anuales de deforestación se concentraron entre los años 1982-1995, con -0,93% (-528.522ha), resultado éste corroborado tanto por los estudios locales de deforestación como por las evaluaciones de la FAO para los periodos 1980-1990 (FAO, 1995) y 1990-1995 (FAO, 1997). Este último estudio aporta una tasa promedio anual de deforestación de -1,2%, superior a la alcanzada en otros ambientes tropicales. Por ejemplo, la tasa promedio anual de deforestación de Brasil y Perú para

este periodo fue de -0,5% y -0,3%, respectivamente. En la última década ha habido una recuperación del bosque de 1.631.600ha (3,27%), debido principalmente al proceso de expansión natural; sin embargo, la deforestación continúa de manera alarmante, con pérdidas de -288.000ha/año (FAO, 2010).

4.2. Validación

Los estudios de deforestación en las diferentes zonas de Venezuela, corroboran los resultados obtenidos mediante el análisis de detección de cambios. Los trabajos consultados revelan que las mayores pérdidas de cobertura vegetal en el país se localizan en la zona situada al norte del río Orinoco (Bevilacqua *et al.*, 2002), específicamente en los Llanos Occidentales, en la región Noroccidental, alcanzando cifras de -1.289.000ha entre 1950 y 1975 (Veillón, 1977), y de -1.801.598ha entre 1975 y 1988 (Catalán, 1992), con promedios anuales de -50.000 y -128.726ha entre períodos. Después de estos períodos, no se han realizado estudios de deforestación, de manera conjunta, en esta subregión Noroccidental.

Otros estudios más locales (Chuvieco *et al.*, 2002; Maldonado, 2009) han revelado que los procesos han continuado, específicamente en las Reservas Forestales (RF), donde se concentran la mayoría de los bosques primarios de la región Noroccidental. Así lo demuestran los promedios de pérdida anuales de -3.200ha de bosque en la RF de Ticoporo hasta el 2002 y de -4.798ha en la RF de Caparo hasta 2009.

La segunda zona con mayores pérdidas de cobertura vegetal del país se localiza al Sur del Lago de Maracaibo, en la región Noroccidental del país. Según Catalán (1992), se registró una pérdida de -994.582ha entre 1975 y 1988, que representó el -89,2% del total de los bosques de la zona. A partir de entonces los estudios se han concentrado en las cabeceras de las cuencas ubicadas en la zona del piedemonte andino. El estudio realizado por Pozzobon *et al.* (2004) señala pérdidas de -239,2ha/año en la cuenca del río Torondoy para el período 1988-2003, de -94,5ha/año en la cuenca del río Tucaní entre 1986 y 2003, y de -46,7ha/año en la cuenca del río Frío para el mismo período. Asimismo, esas cabeceras de cuenca fueron evaluadas por Aldana y Bosque (2008), en el Parque Nacional Sierra La Culata, que comparte sus límites entre esta subregión y la Andina; registró para 1988-2003 una pérdida de -

908,2ha/año, con el mayor porcentaje en las cabeceras de cuenca, al sur del Lago Maracaibo.

Por su parte, la deforestación entre 1975 y 1988 de la subregión Andina, situada en la región Noroccidental, fue analizada por Catalán (1992). En este período se deforestaron -501.344ha, las que se concentraron, principalmente, en el estado Táchira, con -241.108ha. Después de esta fecha se han realizado, de manera muy puntual, estudios como el de Hernández y Pozzobon (2002), que reflejan como ha sido la dinámica de los bosques andinos. Estos estudios han registrado procesos de pérdida forestal que van desde -207 ha/año entre 1952- 1972 hasta -0,6ha/año entre 1952-1984. De igual manera, se detectaron procesos de ganancia de masa forestal en la subregión Andina, que van desde 109,6ha/año entre 1988-1996 (Gutiérrez, 1999) hasta 15,5ha/año en 26 años (1979-2005; Lozano, (2006)).

Otros espacios de la región Noroccidental, como la cuenca de San Pedro en el estado Falcón, registraron una pérdida forestal de -32ha/año entre 1966-1977 (Hernández and Pozzobon, 2002).

Con respecto a las áreas forestales de la región Sur, se han realizado pocos estudios de deforestación. En uno de ellos (Meneses, 1992) realizado en el estado Amazonas, para el período 1985-1990, se encontró una pérdida de -8.696ha/año. Asimismo, en la parte norte de la cuenca del Caura, Bevilacqua *et al.* (2007) obtuvieron pérdidas de -790ha/año para el período 1975-2005, concentradas mayormente entre 1993 y 2005 con -1.500ha/ año.

5. CONCLUSIONES

Los resultados generados son una aproximación al conocimiento de la historia de los bosques venezolanos. Este estudio preliminar se puede mejorar abordando análisis con diferentes resoluciones espaciales, para aumentar la precisión o incrementar la serie temporal, incorporando mapas de otras fechas, tales como el Mapa Ecológico de Venezuela de Ewel y Madriz (1976) o el Mapa de Vegetación de Venezuela de Huber y Alarcón (1988). Asimismo, para conocer la precisión de los últimos cuatro mapas de la serie histórica, se pueden utilizar imágenes de satélite de alta resolución.

A partir de la elaboración de este estudio, se aprecia la necesidad urgente de evaluar en forma frecuente la deforestación en Venezuela, a través de sensores remotos. La utilidad del seguimiento de la deforestación a partir de imágenes de satélite queda corroborado por las prácticas desarrolladas en otros entornos tropicales, como en Brasil, que bajo un enfoque wall-to-wall, ha venido realizando anualmente, desde 1988, el análisis de toda la superficie del país con imágenes Landsat de 30m (INPE, 2010), o la India, que desde 1981 evalúa bianualmente la deforestación del país con imágenes Landsat 80 y 30m y con imágenes IRS P6- LISS III de 36,25m y 23,5m (FSI, 2009). Otros estudios de deforestación realizados a partir de imágenes satelitales han utilizado un análisis de muestreo, como los estudios de la FAO, que ofrecen estadísticas sobre tasas de deforestación (FAO, 1995, 1997, 2010), o el proyecto de Observación por Satélite de los Ecosistemas Ambientales Tropicales II (TREES II) del JRC, de la Comisión Europea, para determinar la tasa de deforestación de países tropicales (Achard *et al.*, 2002).

Estos resultados pueden ser considerados como un primer avance en los estudios de cambio climático y del ciclo de carbono, pérdida de biodiversidad, sostenibilidad de la agricultura o de sumidero de agua potable, o para la modelización futura de los procesos de deforestación. En este sentido, disponer de información sobre los procesos de deforestación ayuda en la elaboración y publicación de inventarios sobre las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y en la formulación de planes para reducir y controlar dichas emisiones. La conservación y el establecimiento de nuevos bosques en el país, servirán de sumidero de CO₂, como parte de los compromisos adquiridos por Venezuela ante el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC).

6. Agradecimientos

El primer autor agradece a la Universidad de Los Andes la beca para estudios de doctorado en la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), España, y Departamento de Geográfica, UAH, por el apoyo brindado durante la realización de dichos estudios.

7. Referencias

- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., Malingreau, J.P., 2002. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297, 999-1002.
- Aldana, A., Bosque, J., 2008. Cambios ocurridos en la cobertura/uso de la tierra del Parque Nacional Sierra La Culata. Mérida - Venezuela. Período 1988-2003. *Geofocus* 8, 139-168.
- Bartholom, E., Belward, A.S., 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *Int J Remote Sens* 26, 1959-1977.
- Bevilacqua, M., Cárdenas, L., Flores, A., Hernández, L., Lares, E., Mansutti, A., Miranda, M., Ochoa, J., Rodríguez, M., Seling, E., 2002. The State of Venezuela's Forest: with a Focus on the Guayana Region. In. *Global Forest Watch / Fundación Pola, Caracas-Venezuela*, p. 132.
- Bevilacqua, M., Medina, J.D., Cárdenas, L., 2007. Situación de los bosques en la Guayana, Venezuela: La Cuenca del Río Caura como caso de estudio In. *Asociación Venezolana para la Conservación de Áreas Naturales ACOANA, Caracas Venezuela*.
- Bicheron, P., Defourny, P., Brockmann, C., Schouten, L., Vancutsem, C., Huc, M., Bontemps, S., Leroy, M., Achard, F., Herold, M., Ranera, F., Arino, O., 2008. GlobCover 2005 - Products description and validation report. Ver. 2.1. In. *European Space Agency-IONIA, European Community*.
- Catalán, A., 1992. El proceso de deforestación en Venezuela entre 1975-1988. In. *Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas, Venezuela*.
- Chuvioco, E., Salas, J., Meza, E., Vargas, F., 2002. Empleo de la teledetección en análisis de la deforestación forestal tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela). *Serie Geográfica* 10, 55-76.
- Duno de Stefano, R., Aymard, G., Huber, O., 2006. *Catálogo Anotado e Ilustrado de la Flora Vasculare de los Llanos de Venezuela*. FUDENA-Fundación Polar-IBV, Caracas, Venezuela.
- Ewel, J., Madriz, A., Tosi, J., 1976. Zonas de Vida de Venezuela. Memoria Explicativa sobre el Mapa Ecológico. In. *Ediciones del Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Caracas-Venezuela*, p. 265.
- FAO, 1995. *Forest Resources Assessment 1990 Tropical Forest Plantation Resources*. In. *Forestry and Forest Division, Food and Agricultural Organization. UNESCO, Roma, Italia*.
- FAO, 1997. *State of the World's Forests 1997*. Forestry and Forest Division, Food and Agricultural Organization. UNESCO. In, Roma, Italia.
- FAO, 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report*. In. *Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy*, p. 378.
- FSI, 2009. *State of Forest Report 2009*. . In. *Ministry of Environment and Forests, Government of India, Dehradun, India*, p. 226.
- Gutiérrez, F., Acosta, L., Salazar, C., 2004. *Perfiles Urbanos de la Amazonia Colombiana*. SINCHI, Bogotá, Colombia.
- Gutiérrez, J., 1999. Utilización de Técnicas de PDI y SIG en la Determinación de Cambios en la Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra, Cuenca del Río Mucujún, Estado Mérida, Venezuela. In, *Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes, Mérida. Venezuela*, p. 230.
- Hernández, E., Pozzobon, E., 2002. Tasas de deforestación en cuatro cuencas montañosas del occidente de Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 46, 35-42.
- Huber, O., Alarcón, C., 1988. *Mapa de vegetación de Venezuela 1:2.000.000*. In. *The Nature Conservancy, MARNR, Oscar Todtmann Editores, Caracas. Venezuela*.

- Hueck, K., 1960. Mapa de Vegetación de Venezuela 1:2.000.000. In: IFLA, B. (Ed.), Mapa reproducido en el Atlas agrícola de Venezuela (1960) a escala 1:4.000.000, Mérida, Venezuela, pp. 3-15.
- IGVSB, 1999. Mapas de regiones naturales de Venezuela. In, Caracas - Venezuela.
- INPE, 2010. Monitoring of the Brazilian Amazonian: Projeto PRODES In, <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>, Brazil.
- JRC, 2005. A Proposal for Defining the Geographical Boundaries of Amazonia. . In: Eva, H., Huber, O., (Ed.). Joint Research Center, Ispra, Italy. , p. 38.
- Lambin, E.F., H., G., Lepers, E., 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28, 205-241.
- 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.
- Lozano, E., 2006. Análisis de Cambio Multitemporal de Uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, Estado Mérida, Venezuela. In, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, p. 147
- Maldonado, H., 2009. Análisis de la Deforestación en la Reserva Forestal Caparo-Venezuela, Períodos 1987-1994, 1994-2007 y 1987-2007. In, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes, Mérida. Venezuela, p. 190.
- MARNR, 1982. Mapa de Vegetación Actual de Venezuela. In. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, Caracas Venezuela.
- MARNR, 1995. Mapa de vegetación de Venezuela. In, Caracas, Venezuela.
- Mather, A., Needle, C., 2000. The relationships of population and forest trends. *The Geographical Journal* 166, 2-13.
- Matute, D., 1984. Las Deforestaciones con Fines Agropecuarios. In. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Caracas, Venezuela.
- 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 Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring Global Environment* Springer, Spain.
- Meneses, C., 1992. Monitoreo del Bosque Lluvioso Tropical. Una Perspectiva Multitemporal. In. MARNR, Caracas, Venezuela, p. 66.
- MINAMB, 2005. Información forestal. In. Dirección General de Bosque. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Caracas, Venezuela.
- Munder, S., 2003. Oil wealth and the fate of the forest. A comparative study of eight tropical countries. . Taylor & Francis Group, London United Kingdom: Routledge.
- Pacheco, C., Aguado, I., Mollicone, D., 2011 Capítulo I. Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *Biollania* 10, 281-292.
- Peñaloza, R., González, J., Guerra, F., Gómez, H., 2008. La deforestación en la cuenca del río Zulia, Barinas, Venezuela. Análisis preliminar utilizando SIG. *Geoenseñanza* 13, 71-82.
- Petit, C., Lambin, E., 2001. Integration of multisource remote sensing data for land cover change detection. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 15, 785-803.
- Petit, C., Lambin, E., 2002. Impact of data integration technique on historical land-use/landcover change: Comparing historical maps with remote sensing data in the Belgian Ardennes. *Landscape Ecol.* 17, 117-132.
- Pittier, H., 1920. Esbozo de Las Formaciones Vegetales de Venezuela con una Breve Reseña de Los Productos Naturales y Agrícolas (Complemento Explicativo del Mapa Ecológico de Venezuela 1920). In, Caracas, Venezuela, p. 44.

- Pontius, R., Shusas, E., McEachern, M., 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistenc. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101, 251–226.
- Pozzobon, E., 1985. Estudio de las Deforestaciones en las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo sobre Imágenes LANDSAT, MSS. In, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, p. 46.
- Pozzobon, E., 1995. Estudio de la dinámica de las deforestaciones en la Reserva Forestal de Caparo mediante imágenes HRV SPOT. In, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, p. 86.
- Pozzobon, E., Hernández, E., Dugarte, I., 2004. Evaluación del proceso de deforestación en tres cuencas del piedemonte lacustrino de La Cordillera de Los Andes. *Revista Forestal Venezolana* 48, 14-22.
- Pozzobon, E., Osorio, A., 2002. Evaluación de las deforestaciones en la reserva forestal de ticoporo, estado Barinas - Venezuela, en base al análisis multitemporal de imágenes de percepción remota. *Revista Geográfica Venezolana* 43, 215-235.
- Rojas, J., 2008. Venezuela. Cambios y desafíos territoriales desde la geodiversidad de la agricultura. Medio humano, establecimientos y actividades. In: Polar, F. (Ed.), *Geo Venezuela*. Tomo 3, Caracas, Venezuela, pp. 302-381.
- Sader, S., Armond, 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20, 11-19.
- Santamarta, S., 1999. La situación actual del Bosques en el Mundo. In, *Historia de los Bosques*. España Celeste, España, pp. 481-506.
- Veillón, J., 1977. Las deforestaciones en los Llanos Occidentales de Venezuela desde 1950 a 1975. In: *Venezuela, C.d.I.B.H.d.* (Ed.), Caracas, Venezuela, pp. 97-110.

Capítulo III. Delimitación y caracterización de aéreas “hot spot” de deforestación en Venezuela, a partir de imágenes de satélite y consulta a expertos

Publicación derivada:

Pacheco, C., Mollicone, D., Aguado, I. (en revisión). Identification and characterization of deforestation hot spot areas in Venezuela from satellite images and expert opinion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

Resumen

El objetivo de este estudio es conocer los cambios que ha experimentado la cubierta del bosque en Venezuela, durante el período 2005-2010. Para ello se utilizan datos procedentes de sensores remotos y la consulta a expertos. A partir de datos MODIS se generan dos mapas de áreas hot spot de deforestación, uno mediante técnicas digitales y otro mediante técnicas de interpretación visual directa. Ambos mapas fueron validados con imágenes Landsat ETM+ para corroborar la existencia o no de procesos de deforestación, adicionalmente en el mapa obtenido mediante técnicas digitales se ha calculado la exactitud mediante los parámetros de fiabilidad. Asimismo, la consulta a expertos sobre las áreas hot spot permitió determinar las causas que impulsaron los cambios. Los resultados muestran que las áreas hot spot de los dos mapas generados, fueron confirmadas con la existencia de deforestación, mostrando el mapa obtenido mediante técnicas digitales una precisión global de 92,45% y un índice kappa de 0,2866. Los mayores procesos de deforestación se concentran en la región norte del río Orinoco, donde se localizan actualmente, el 8,63% de los bosques del país. En esta región se encuentran algunos lugares con tasas medias anuales de deforestación de -0,72% y -2,95% superiores al promedio anual de todo el país (-0,61%). La causa principal que explica la deforestación, en el período evaluado, han sido las actividades agropecuarias (47,85%), específicamente, la agricultura familiar mixta y la ganadería extensiva que se practican en un 94% de las áreas identificadas.

Palabras claves: Hot spot, deforestación, bosques tropicales, MODIS, Landsat ETM+, consulta a expertos, Venezuela.

Abstract

The objective of this study is to discover the changes which occurred in the forest cover in Venezuela over 2005-2010 period. Data from remote sensors and expert opinion were used to this end. Two maps of deforestation hot spots areas were created from MODIS data, one through digital techniques and the other through direct visual interpretation. Both were validated with Landsat ETM+ images in order to corroborate the presence or absence of deforestation processes, additionally the map obtained through digital techniques, the accuracy was calculated using the parameters of reliability. Furthermore, expert opinion regarding the hot spot areas permitted identifies

the causes of the changes that were determined. The results show that hot spot areas of the two maps generated were confirmed by the existence of deforestation, while the map obtained by digital techniques obtained an overall accuracy of 92.45% and a kappa value of 0.2866. The greatest deforestation are concentrated in the north of the Orinoco River, where currently located, the 8.63% of the country's forests, there are some places with average annual rates of deforestation of -0.72% and - 2.95% above the annual average across the country (-0.61%). The main cause of deforestation for the period evaluated are agricultural and livestock activities (47.85%), specifically mixed family farming and extensive farming which are practiced in 94% of the identified areas.

Key words: Hot spot, deforestation, tropical forests, MODIS, Landsat ETM+, expert opinion, Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

La cubierta terrestre se ha visto modificada, a lo largo del tiempo, al proveer de servicios a los seres humanos, desde lo más obvio, como el suministro de alimentos y fibras, medicamentos y similares, hasta las influencias culturales y recreativas menos evidentes en nuestras vidas (Mayaux *et al.*, 2008). Estas transformaciones se evidencian en los cambios de la cubierta vegetal y van unidas a problemas ambientales actuales, como el cambio climático, alteraciones en el ciclo de carbono, la pérdida de biodiversidad, la sostenibilidad de la agricultura o el sumidero de agua potable (Lepers *et al.*, 2005).

Con el objetivo de establecer políticas orientadas a la reducción de estos daños ambientales se han generado acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD), la Convención para combatir la Desertificación de las Naciones Unidas (UNCCD) y la Convención relativa a los Humedales (RAMSAR). Asimismo, la comunidad científica internacional, apoyada en la creciente disponibilidad de datos e información mundial, (Ramankutty *et al.*, 2006) ha creado nuevos programas de investigación interdisciplinaria, que estudian, por un lado, las causas y consecuencias de los cambios de la cubierta del bosque (Geist and Lambin, 2002; Rudel *et al.*, 2009; DeFries *et al.*, 2010; Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I), y por otro,

estudios sobre estimaciones de la tasa de deforestación, a través de la recopilación de informes, elaboración de estadísticas nacionales o la opinión de expertos independientes (FAO, 1993, 2001, 2006, 2010). En las últimas décadas, la disponibilidad de datos procedentes de sensores remotos permite disponer de importante documentación sobre la variación de la cubierta del bosque a escala global, regional y nacional (Achard *et al.*, 2006). Las aplicaciones de la teledetección respecto a la evaluación de la deforestación cuenta con dos técnicas de análisis: el wall-to-wall y el muestreo (GOFC-GOLD, 2010).

El wall-to-wall es un análisis que cubre la superficie total de la zona boscosa a evaluar, es decir, toda la vegetación de un país ó región. Ejemplo de ello, el seguimiento llevado a cabo por Brasil, con datos de sensores de alta resolución (imágenes Landsat de 30 m), con carácter anual, desde el año 1988 (INPE, 2010). Un proyecto similar se ha desarrollado también en la India desde 1981 hasta 1991 con imágenes Landsat de 80 y 30 m, y desde 1991 en adelante con imágenes IRS P6- LISS III de 36,25 m y 23,5m (FSI, 2009).

Por su parte, los análisis de muestreo se realizan sólo en algunas áreas boscosas, de manera sistemática y a intervalos regulares o de manera estratificada y concentrada, sólo en las áreas de deforestación. Ejemplo de muestreo sistemático, se puede señalar el Estudio mediante Sensores Remotos (RSS) de la Evaluación de Recursos Forestales 2010 (FAO, 2010), llevado a cabo en los actuales momentos por la FAO junto al JRC de la Comisión Europea, a través del proyecto TREES 3 (2007-2013). El trabajo está diseñado bajo un muestreo sistemático, en la intercepción de la cuadrícula cartográfica, cada 1 grado a nivel mundial, en cada una de estas intercepciones se evalúa una unidad de muestreo de 20 km * 20 km, (JRC, 2005; Achard *et al.*, 2010). Por su parte, ejemplos de muestreo estratificado lo encontramos en los informes elaborados por la FAO para obtener alguna de sus estadísticas de tasa de deforestación (FAO, 1993, 2001, 2006, 2010) o el realizado también de manera estratificada en el proyecto TREES II del JRC, para determinar la tasa de deforestación en los países tropicales (Achard *et al.*, 2002).

Un primer paso para estimar las tasas de deforestación bajo el enfoque del muestreo estratificado es la determinación de las áreas hot spot de deforestación, áreas donde hubo una conversión de tierras forestales a no forestales. Este concepto fue

desarrollado, por primera vez, en el JRC, en el marco del proyecto TREES I, donde se identificaron y describieron, alrededor del cinturón tropical, catorce áreas hot spot de deforestación (Myers, 1992). La definición de hot spot combina la utilización de datos procedentes de sensores remotos y la consulta a expertos. El objetivo es determinar la ubicación espacial de las aéreas hot spot a través de un mapa e identificar las causas que impulsaron dichos cambios.

Las áreas hot spot de deforestación han sido utilizadas para sintetizar la información sobre los cambios en la cobertura del bosque, a escala global, con apoyo de los productos de 1990 (IGBP DISCOVer map) y de 2000 (Global Land Cover 2000 map, Lepers *et al.*, (2005)). A escala regional, se han utilizado en los bosques tropicales con el apoyo de imágenes AVHRR (Achard *et al.*, 1997), y en los bosques boreales de Eurasia con el apoyo de un mosaico de imágenes Spot-4 VEGETATION, el mapa forestal de la URSS de 1990 y el mapa de vegetación de Eurasia de 2000 (Achard *et al.*, 2006). De igual manera, se han utilizado como base para estimar la pérdida de los bosques, mediante la combinación de imágenes de resolución media para determinar las áreas hot spot y de alta resolución para cuantificar las tasas de pérdida (Achard *et al.*, 2002; Potapov *et al.*, 2008).

En este sentido, se revela de interés el desarrollar un sistema de vigilancia para los bosques de Venezuela, ya que según los resultados de la última Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales del 2010, llevado a cabo por la FAO, Venezuela ocupa la posición número diez con una tasa de deforestación de -0,61% equivalente a -288.000 ha/año de bosque (FAO, 2010). Es por esto, que se plantea como objetivo, de este estudio identificar, las áreas hot spot de deforestación en los bosques de Venezuela, áreas que representaron la conversión directa de tierras forestales a tierras no forestales en los últimos 5 años (2005-2010). La identificación y descripción de estos cambios permitirá suponer en un futuro cercano, de seguir las tendencias identificadas, cuáles serán las próximas áreas de deforestación, así como, establecer un sistema de seguimiento que permita cuantificar la cantidad de bosques deforestados en Venezuela en los últimos 10 años.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La República Bolivariana de Venezuela, se localiza entre la latitud 00° 38´ 53´´y 12° 12´ 00´´ Norte y la longitud 59° 47´ 50´´y 73° 22´38´´ Oeste (MINAMB, 2005). Posee una extensión de 916.445 Km², de las cuales el 50,49% son bosques (FAO, 2010); el 91,37% de estos bosques pertenecen a la Amazonía y representan el 5,6% del área total de esta región (JRC, 2005). Estos datos sitúan a Venezuela entre los diez países con mayor diversidad biológica del planeta y el sexto dentro del continente americano (MARN, 2001).

2.2. Materiales

2.2.1. Imágenes MODIS

En este trabajo se ha utilizado el producto de reflectividad de la superficie terrestre del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. Su resolución temporal es semanal (L3 Global) y posee una resolución espacial de 500 m de resolución (MOD09A1). Este producto lo facilita el Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (<http://glovis.usgs.gov/>). Las imágenes proporcionan una estimación de reflectividad espectral, en compuestos de 8 días, seleccionando, sobre la base de la alta cobertura de observación, las imágenes que ofrecen un ángulo de visión bajo, ausencia de nubes o de sombra de nube y de carga de aerosoles (Wolfe *et al.*, 1998).

Se emplearon todas las bandas disponibles del sensor: azul (459-479 nm), verde (545-565 nm), rojo (620-670 nm), infrarrojo cercano (841-876 nm), e infrarrojo medio (1230-1250, 1628-1652, 2105-2155 nm). Para abarcar cada año de estudio (2005 y 2010), se utilizaron los compuestos de 8 días desde principios de la época de lluvias del año anterior (día juliano 137 de los años 2004 y 2009), hasta finales de la época de lluvias del año posterior (día juliano 129 de los años 2005 y 2010). Estas imágenes corresponden a las orbitas h10v07, h10v08, h11v07, h11v08 y h12v08. Las imágenes utilizadas hacen un total de 440.

2.2.2. Imágenes Landsat

Se han utilizado imágenes Landsat ETM+ de 30 m de resolución. Uno de los problemas planteados en los estudios llevados a cabo en las zonas tropicales es la falta de disponibilidad de imágenes sin nubes y por lo tanto, la escasez de estas imágenes. Por esta razón, las imágenes fueron tomadas en el período de sequía (noviembre-abril), además, con el fin de garantizar un mínimo de cobertura de nubes se seleccionaron imágenes de uno o dos años anteriores. Las imágenes utilizadas en este trabajo corresponden a los path/row: 007/54, 006/55, 002/55, 233/55 y 233/57, y las fechas: (2003/01/04 y 2010/01/23), (2004/01/02 y 2009/12/31), (2005/03/11 y 2009/09/30), (2003/02/04 y 2009/12/05) y (2003/01/19 y 2010/01/22) respectivamente. Estas imágenes fueron obtenidas de la colección de USGS con un nivel de L1T de corrección radiométrica y geométrica. Se utilizaron en el análisis las siguientes bandas ETM +: verde (525-605 nm), infrarrojo cercano (775-900 nm), e infrarrojo medio (1550 hasta 1750 nm).

2.2.3. Información Auxiliar

Se utilizó el “Mapa de Vegetación de Venezuela” publicado por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales y Renovables (MARNR) en 1995. El mapa está elaborado a partir de imágenes Landsat TM de 1988, aplicándose técnicas de clasificación supervisada e interpretación visual. El producto consta de 75 hojas cartográficas, a escala 1:250.000, que cubre todo el país. De éste se extrajo un conjunto de puntos muestrales al azar, que fueron utilizados para el entrenamiento en la construcción de los árboles de decisión, en la clasificación de los compuestos anuales de MODIS (2005 y 2010) y para la validación de estos productos.

2.3. Metodología

La identificación y delineación de las áreas hot spot se ha llevado a cabo a través de dos vías. En la primera se aplica una clasificación digital a las imágenes procedentes del sensor MODIS y la segunda se basa en la consulta a expertos, donde la identificación de áreas hot spot se aborda visualmente. Este último procedimiento permitió describir, además, los procesos que condujeron y que potencialmente pueden seguir conduciendo los cambios en la cobertura del bosque (Achard *et al.*, 2002; Achard *et al.*, 2006).

Para validar las áreas hot spot de ambos mapas, se seleccionaron 5 zonas, donde los cambios atienden a causas distintas, en estas áreas se han cuantificado las pérdidas de bosque y así corroborar la existencia o no deforestación. Adicionalmente, se determinó la exactitud del mapa obtenido por medio digital a través de parámetros de fiabilidad. En esta parte del estudio se han utilizado imágenes Landsat ETM. La figura III.1, muestra el esquema metodológico seguido en este estudio.

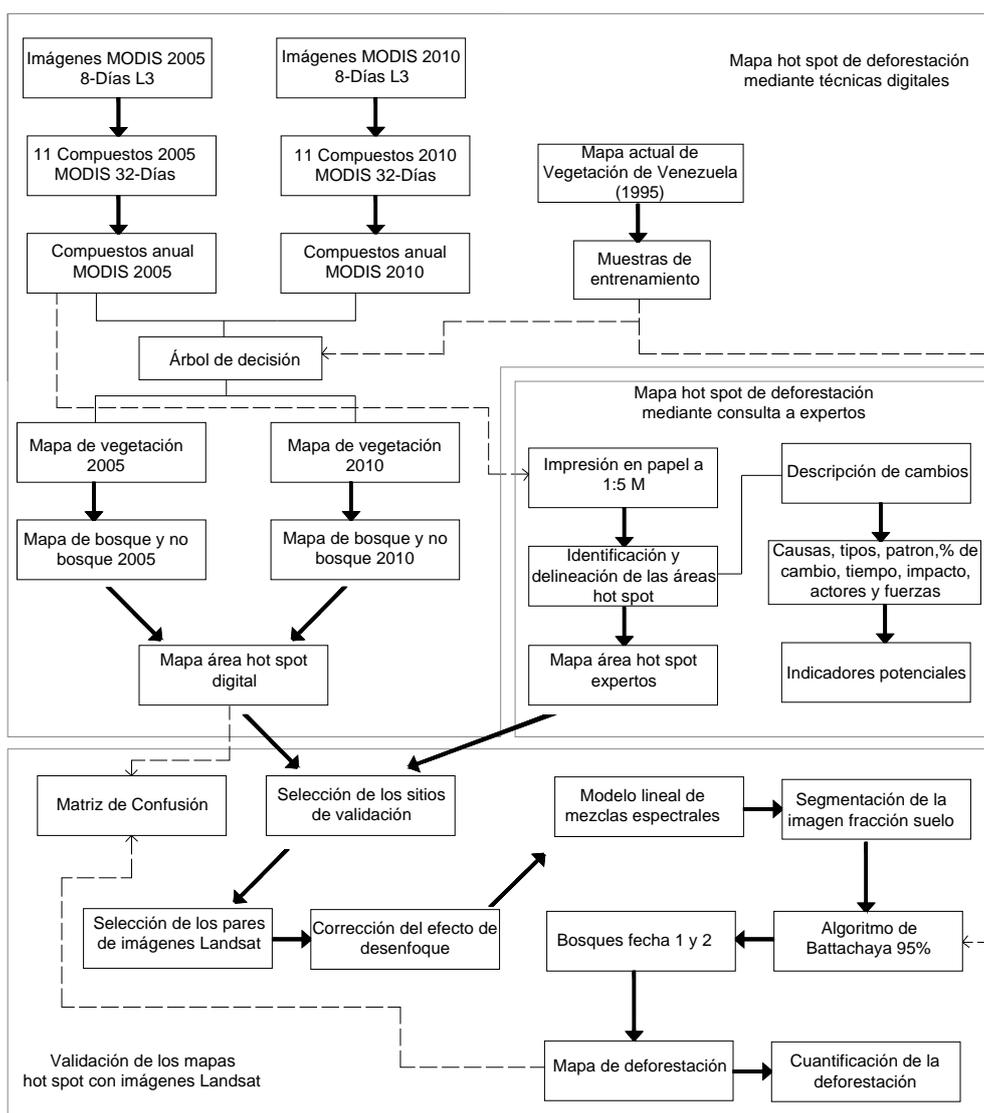


Figura III. 1. Esquema metodológico.

2.3.1. Identificación y delineación de las áreas hot spot con imágenes MODIS

Para identificar las áreas hot spot en la cobertura del bosque siguiendo la metodología planteada por Achard *et al.* (2002) y Potapov *et al.* (2008), se generaron dos

compuestos anuales, a partir del producto MOD09A1 de MODIS. A partir de estos compuestos se ha efectuado una clasificación digital para obtener dos mapas de cobertura vegetal. Estas se clasificaron utilizando un algoritmo de árbol de decisión. Posteriormente, un análisis de detección de cambios nos permitió conocer las áreas hot spot. A continuación, detallamos el proceso seguido.

2.3.1.1. *Compuestos Anuales*

Se decidió en el estudio la utilización de compuestos multitemporales, ya que esta técnica permite conservar la información más destacada de la variación fenológica, sin tener en cuenta el momento específico del año (Hansen and DeFries, 2004). Por otro lado, los compuestos reducen el efecto atmosférico, producido por nubes y sombras de nube (Hansen *et al.*, 2002). Para ello, se obtuvieron 44 mosaicos, a partir de las 220 imágenes MOD09A1 de cada año, que corresponden a los 4 compuestos de 8 días, necesarios para obtener los 11 compuestos de 32 días y finalmente, el compuesto anual, que abarca las 5 orbitas necesarias para cubrir el país, con éstos se construyeron compuestos anuales multi-temporales, bajo el enfoque de Potapov *et al.* (2008). El cual consistió, por un lado, en realizar compuestos de 32 días considerando en cada banda el segundo valor más oscuro de brillo de cada pixel entre los 4 candidatos de 8 días. Esta selección reduce la entrada de valores extremos asociados con nubes residuales, sombra de nubes, o de otros artefactos que puedan no ser representativos de las condiciones de la superficie. Posteriormente, a partir de las bandas de estos 11 compuestos, de 32 días, de cada año, se realiza el compuesto anual, utilizando como criterio de selección, en cada píxel, el valor máximo de reflectividad de la serie.

2.3.1.2. *Clasificación basada en árboles de decisión (2005-2010)*

Para la construcción de los árboles se utilizó el algoritmo de *Classification and Regression Trees* (CART™) (Breiman *et al.*, 1984), que se caracteriza, fundamentalmente, por realizar particiones binarias y utilizar una estrategia de poda basada en el criterio de coste-complejidad. La selección de este algoritmo viene dada por ser el más utilizado para generar la cartografía global de la cobertura de la tierra mediante imágenes MODIS, ya que ofrece una sólida herramienta para el manejo de

relaciones no lineales en los datos de teledetección (Friedl *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2002).

El primer paso en la elaboración del árbol de decisión consistió en la obtención del conjunto de muestras, que permitió, por un lado, con el 60% de las muestras llevar a cabo la fase de entrenamiento, y por otro, reservar el 40% restante para la fase de validación de los productos generados. Dichas muestras fueron tomadas del mapa de vegetación de Venezuela de 1995. Se seleccionaron 2.000 muestras en cada una de las siguientes categorías: Bosque, que comprenden las formaciones arbóreas superiores a 5 m, los bosques galería y los manglares; Arbustales, vegetación de porte medio entre 2 y 5 m que abarcan los espinares y los matorrales; Sabanas, tanto abiertas como combinadas con chaparrales, árboles y/o palmas; Herbazales, comunidad vegetal denominadas por hierbas altas, donde se consideraron también los páramos y la vegetación xerofítica; y Cuerpos de Agua, que considera las lagunas, presas y ríos. Estas muestras fueron tomadas aleatoriamente en las 7 bandas de cada compuesto anual de 2005 y 2010, forzando una distancia mínima entre cada punto de 1.000 m. Se construyó un árbol de decisión para cada año, ya que cada uno de éstos fue climatológicamente diferente, lo cual afectó los valores de reflectividad de las imágenes MODIS.

Se utilizó el programa estadístico SPSS 17.0 para Windows, con las opciones disponibles por defecto (5 niveles como máximo, el índice Gini para la estimación de la función de impureza de cada umbral, la opción de poda desactivada y con los valores de probabilidad iniciales extraídos de las propias muestras). El valor mínimo de casos para crear nuevos nodos se fijó en 1. Se obtuvieron dos árboles de decisión, uno para cada año (Figura III.2).

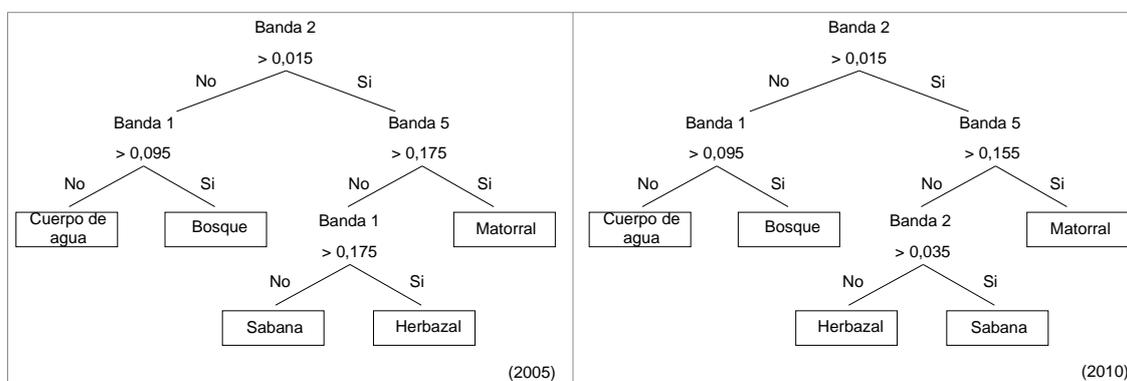


Figura III. 2. Árboles de Decisión utilizados en los compuestos anuales de 2005 y 2010.

Con los umbrales obtenidos de los árboles de decisión, se clasificaron los compuestos anuales MODIS para obtener los mapas de vegetación del 2005 y 2010. Posteriormente, las 5 categorías resultantes de estos mapas se agruparon en dos: forestal y no forestal. Con estos nuevos mapas se realizó la detección de cambios mediante la diferencia de mapas, para localizar las áreas hot spot de deforestación.

2.3.2. Definición de áreas hot spot a partir de la consulta a expertos

La consulta a expertos fue llevada a cabo individualmente, con personas de diferentes instituciones del país que conocen a detalle la problemática de la deforestación, ya que vigilan, controlan e investigan a diario los bosques del país. Con cada uno de estos expertos se realizaron dos actividades: la identificación y delineación de las áreas hot spot y la descripción de dichos cambios (Achard *et al.*, 1997).

El proceso de identificación y delimitación de áreas hot spot se realizó a partir del compuesto MODIS del año 2005 con una composición (5, 2 y 1). Se efectuó un realce en el contraste de la imagen y se imprimió dicha imagen a escala 1:5M para que los expertos interpretaran visualmente las áreas hot spot de deforestación. Posteriormente, se solicitó a los expertos que describieran, de forma individualizada cada uno de esos cambios, con el objetivo de conocer de cada área hot spot la localización espacial, área de influencia y tipo de cobertura vegetal. Asimismo, se solicitó la caracterización de la deforestación, en cada área, en función de las causas, tipos, patrón, porcentaje de cambio, tiempo en que ocurrieron, impactos dejados, así como actores y fuerzas que condujeron el proceso de deforestación.

Adicionalmente, para determinar qué causa o causas de deforestación utilizadas en la descripción de las áreas hot spot, fue la más influyente en el proceso, se asignó a cada una de estas causas, un valor numérico, que representa un peso particular de acuerdo al grado de importancia dentro de cada área hot spot delineada. Estos valores fueron ponderados por el total de las áreas identificadas, sumados y agrupados, para obtener porcentualmente las causas de deforestación en todo el país.

2.3.3. Validación con imágenes Landsat

Se seleccionaron dentro de las áreas hot spot definidas en los mapas obtenidos digitalmente o mediante la consulta a expertos, 5 zonas. De estas zonas, las 2 primeras se ubicaron en la región norte del río Orinoco, específicamente, en la cuenca alta del río Grita (1), en el estado Táchira, en los Andes venezolanos, la primera, y la segunda en la Reserva Forestal de Caparo (2), localizada en los Llanos altos occidentales, inundables, del estado Barinas. En la región sur del río Orinoco se ubicaron las 3 restantes. En los bosques amazónicos del estado Bolívar, específicamente, al norte de la cuenca del río Caura (3); en el yacimiento minero Las Cristalinas, en la Reserva Forestal de Imataca (4) y en el sector Icabarú (5), al sur del estado Bolívar. En la figura III.4a se muestra la ubicación de las zonas de validación.

En cada zona de validación se utilizaron pares de imágenes Landsat ETM+, de las cuales se obtuvieron dos mapas de vegetación, empleados para determinar la cobertura forestal. A estas coberturas de bosque se les aplicó un análisis de detección de cambios, con el objetivo por un lado de cuantificar la pérdida del bosque y corroborar así la existencia o no de deforestación en las áreas hot spot de ambos mapas. Por otro lado, se consiguió determinar la exactitud del mapa obtenido por medio digital. Para ello, a las imágenes se les corrigieron los errores derivados de la adquisición del sensor ETM, posteriormente, para facilitar la clasificación de las mismas se aplicó un análisis lineal de mezclas espectrales (MLME), acompañado de una segmentación de las imágenes sintéticas y finalmente, una clasificación supervisada de los componentes seleccionados. A continuación, se detallan los procesos seguidos en esta fase de validación.

2.3.3.1. Corrección del efecto de desenfoque de la imagen

Para mejorar la calidad de la imagen debido a las distorsiones insertadas por el sensor, se utilizó una técnica de restauración de la imagen, propuesta en el programa SPRING del Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br/>). Esta corrección reduce el efecto de desenfoque debido a las limitaciones actuales del sensor. La corrección se realiza mediante un filtro lineal, donde las ponderaciones de restauración de filtro se obtienen de las características del

sensor, y no de forma empírica, ya que se lleva a cabo con los filtros tradicionales de mejora (Câmara *et al.*, 1996).

2.3.3.2. Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME)

El objetivo del MLME es estimar la proporción de los componentes, suelo, vegetación y sombra, para cada píxel, a partir de la respuesta espectral de las bandas del ETM+. La técnica MLME nos ofrece imágenes del fragmento suelo, vegetación y sombra (Shimabukuro and Smith, 1991). EL modelo de mezcla espectral puede escribirse como:

$$r_i = a * vege_i + b * suelo_i + c * sombra_i + e_i$$

Donde r_i es la respuesta del píxel en la banda i ; a , b , y c son las proporciones de vegetación, suelo y sombra (o agua), respectivamente; $vege_i$, $suelo_i$ 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 , indicando i la banda utilizada del ETM+. En el proceso se seleccionaron las bandas 3, 4 y 5 del Landsat ETM +, formando un sistema de ecuaciones lineales que pueden resolverse usando el método de mínimos cuadrados (Shimabukuro and Smith, 1991). Las tres bandas sintéticas generadas representan la proporción de vegetación, de suelo y de sombra existente en cada píxel de la imagen. El componente suelo fue el utilizado en los procesos siguientes, ya que proporciona un gran contraste entre el bosque y el suelo desnudo. Los *endmembers*, utilizados para calibrar el modelo se obtuvieron de la misma imagen.

2.3.3.3. Segmentación de las imágenes de fracción suelo

Se aplicó un proceso de segmentación a la imagen sintética de fracción de suelo. Para ello fue necesario establecer dos criterios de pertenencia al grupo: a) un criterio mínimo de similitud, bajo el cual dos áreas son consideradas similares y agrupadas en una única región; y b) el valor del área mínima, el cual requiere un área para que pueda ser individualizada. El valor es dado en número de píxeles (Bins *et al.*, 1993). Para nuestro estudio se utilizaron los valores empleados en el proyecto PRODES de 8 y 16 para la similitud y el área mínima, respectivamente (Câmara *et al.*, 2006).

2.3.3.4. Clasificación supervisada

La imagen resultante de la segmentación, se clasificó con un algoritmo supervisado, basado en la distancia de Battacharya, con un umbral de aceptación de 95%. Para ello se definieron muestras de entrenamiento, seleccionando de 15 a 25 objetos de la imagen segmentada, que representó entre el 1 y 5% en cada una de las siguientes categorías: bosque, arbustal, sabana, cuerpos de agua y sin información (nubes y sombras de nubes), utilizando como apoyo la imagen de alta resolución disponible en el Google Earth y el mapa de vegetación de Venezuela de 1995.

2.3.4. Criterios de validación

Una vez clasificadas las imágenes, se reagruparon las clases en bosques y no bosques, a estos nuevos mapas se les aplicó una detección de cambios mediante su diferencia. El resultado de esta detección permitió conocer, por un lado, si existe o no deforestación en las áreas hot spot que ofrecen tanto los mapas obtenidos por medio digital como por los expertos. Por otro lado, el proceso permite determinar la exactitud del mapa obtenido en la clasificación digital.

Se hizo necesario remuestrear el mapa obtenido de la detección de cambios, llevándolo de 30 m a 500 m, con la finalidad de que fuese comparable con las muestras obtenidas de las áreas hot spot del mapa digital. De esta manera, se cuantificó de manera detallada la exactitud del mapa hot spot digital, mediante el cálculo de la matriz de confusión, a partir del cual se calcularon los parámetros de fiabilidad descritos por Congalton y Green (2009): errores de omisión y comisión, el nivel de acierto global y el índice kappa.

3. RESULTADOS

3.1. Cartografía de áreas hot spot a partir de datos MODIS

En la figura III.3 se observan las composiciones en falso color (521), para el año 2005 (3a) y 2010 (3b), éstas nos permiten reconocer los espacios con mayor cobertura de vegetación en tonos rojizos, mientras que las áreas desprovistas de vegetación boscosa aparecen en tonos azulados. Asimismo se puede observar como los

compuestos han reducido la contaminación por presencia de nubes y sombra de nubes.

Por su parte, los mapas de cobertura vegetal de 2005 (3c) y 2010 (3d) elaborados a partir de una clasificación basada en árboles de decisión, obtuvieron según los parámetros de fiabilidad descritos por Congalton & Green (2009), una precisión global de 66,98% y 70,32%, y un índice kappa de 0,5793 y 0,6184 respectivamente. Mientras que los porcentajes de aciertos para la categoría de bosque fueron de 86,27% y 78,77%, sus errores de comisión de 12,55% y 5,19% y de omisión de 13,73% y 21,23%, para el 2005 y 2010, respectivamente. Esta categoría bosques para el 2005 abarcaron en el territorio venezolano el 54,5% (49.946.252,50 ha), disminuyendo para el 2010 a 53,3% (48.846.518,50 ha). En ambas fechas, más del 90% de los bosques se localizan al sur del río Orinoco, el resto se localiza en la región norte: por un lado, en los Andes, la Sierra de Períja y Sistema de Colinas Lara-Falcón de la subregión Noroccidente, y por otro la Cordillera de la Costa, de la subregión Centro Norte y Nororiental. Los arbustales, se localizan principalmente, asociados a los bosques y en los Llanos en el centro del país, en esta última subregión. Por su parte, las sabanas se localizan en la depresión del Lago de Maracaibo, en la subregión Noroccidental. Respecto a los herbazales, se ubican cerca del río Orinoco, al norte del país, en los Andes y en el estado Falcón en la región Noroccidental. Los cuerpos de agua, destacan con la presencia del río Orinoco que divide al país en Norte y Sur, y el embalse El Gurí, en la subregión de Guayana al sur del país.

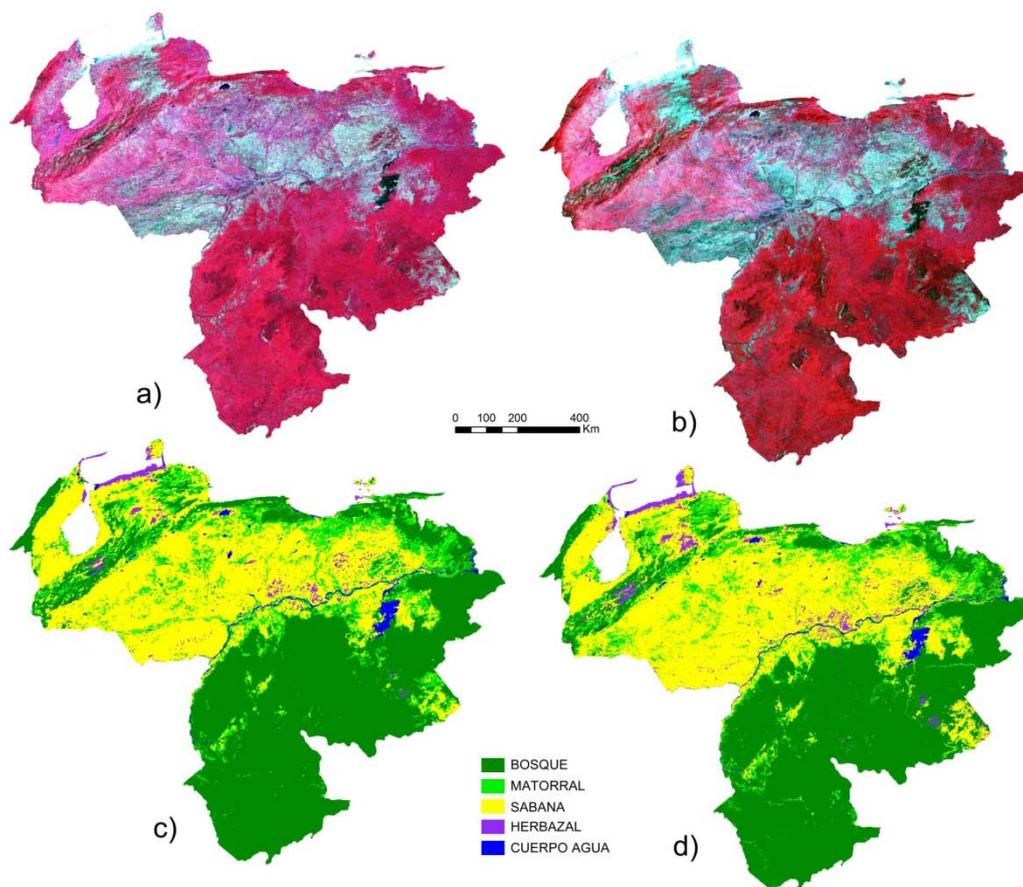


Figura III.3. Composición falso color (521) de los compuestos anuales para el año 2005 (3a) y 2010 (3b); y mapa de cobertura vegetal 2005 (3c) y 2010 (3d).

En la figura III.4a se observa el mapa de las áreas hot spot obtenido de las imágenes MODIS, en color verde se detallan los bosques que se mantienen en 2010 y en rojo las áreas de deforestación entre el 2005 y el 2010. Con el fin de observar el fenómeno con mayor detalle, la figura III. 4b muestra distintos zoom de algunas áreas afectadas, concretamente las que fueron utilizadas para la validación. Las áreas hot spot se localizan en algunos bosques del país, como los de la región Noroccidental, específicamente los de la Sierra de Perija, el sistema de colinas de Lara-Falcón y de la cordillera Andina, en esta última se destaca como ejemplo, la Cuenca alta del río Grita (Figura III. 4b, zona 1). Asimismo se destaca, en los Llanos de esta región, la Reserva Forestal de Caparo (Figura III. 4b, zona 2). De igual manera, en la región Centro Norte y Nororiental en la cordillera de la Costa se encuentran algunas áreas hot spot; al sur de esta última región Nororiental se localiza un área hot spot, que se corresponde con las plantaciones de pinos de la Corporación Venezolana de Guayana, que anualmente realiza actividades de aprovechamiento forestal a gran escala. Por su lado, en la

región Sur donde se encuentra concentrada la mayor parte de los bosques del país, se localizan algunas áreas hot spot, destacando, la Cuenca alta del Caura (Figura III. 4b, zona 3), el yacimiento minero Las Cristalinas (Figura III. 4b, zona 4) y el asentamiento minero Icabarú (Figura III. 4b, zona 5).

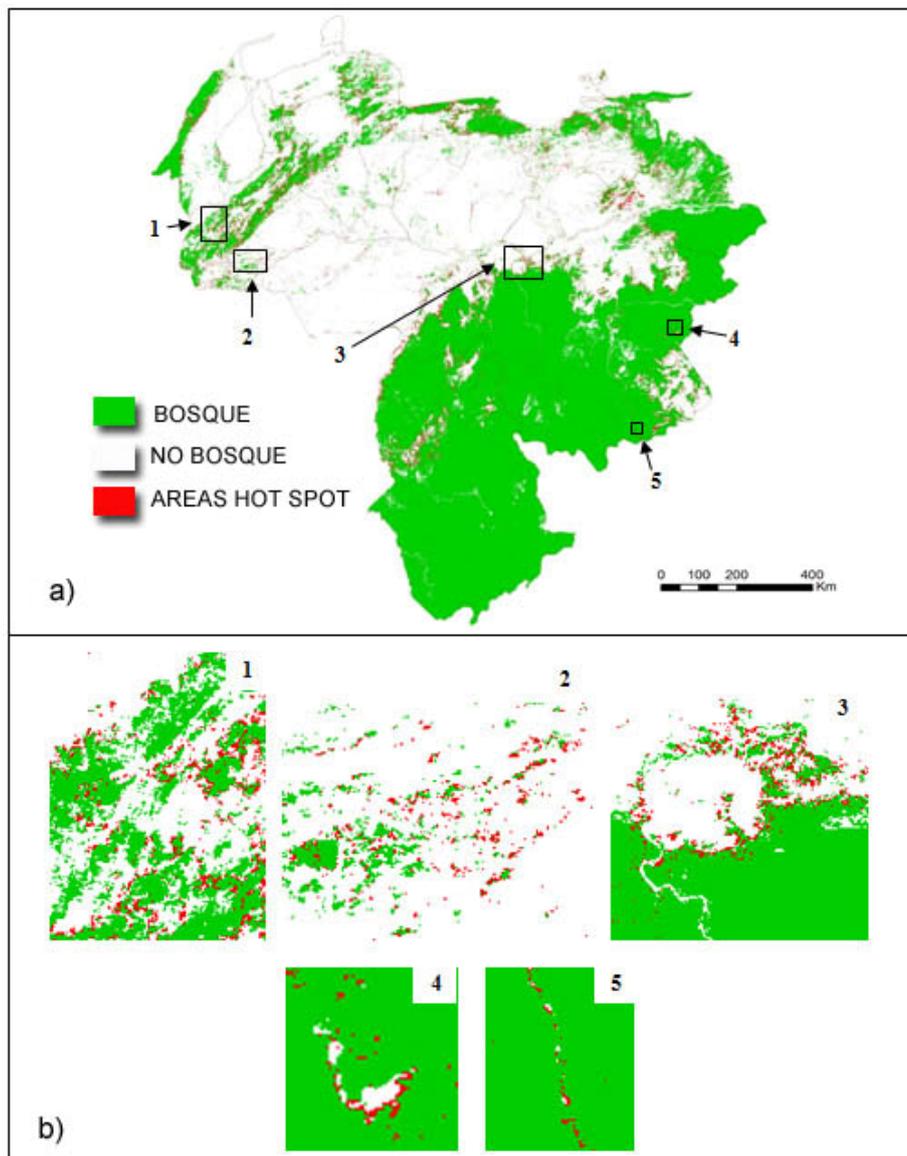


Figura III. 4. a) Mapa de áreas “hot spot” obtenido con datos MODIS (2005-2010); b) Zonas de validación: 1. Cuenca alta del río Grita; 2. Reserva Forestal de Caparo; 3. Cuenca alta del Caura; 4. Yacimiento minero, Las Cristalinas; 5. Asentamiento minero, Icabarú.

3.2. Cartografía de áreas hot spot derivada de la consulta a expertos

El resultado de la consulta a expertos permitió obtener un mapa hot spot de la deforestación (Figura III.5). En este mapa se delinearon 17 zonas de alta concentración de cambio en la cubierta del bosque. Al norte del río Orinoco se localizaron 8 áreas, mientras que las otras 9, se localizaron al sur. La descripción de dichas áreas permitió caracterizar y diagnosticar los procesos de deforestación (Apéndice Tabla III.1) además, permitió estimar porcentualmente las principales causas de la deforestación en Venezuela:

| | |
|---------------------------------|--------|
| 1. Actividad agropecuaria | 47,85% |
| 2. Extensión de infraestructura | 24,62% |
| 3. Extracción de madera | 20,00% |
| 4. Minería | 4,24% |
| 5. Incendios forestales | 3,29% |

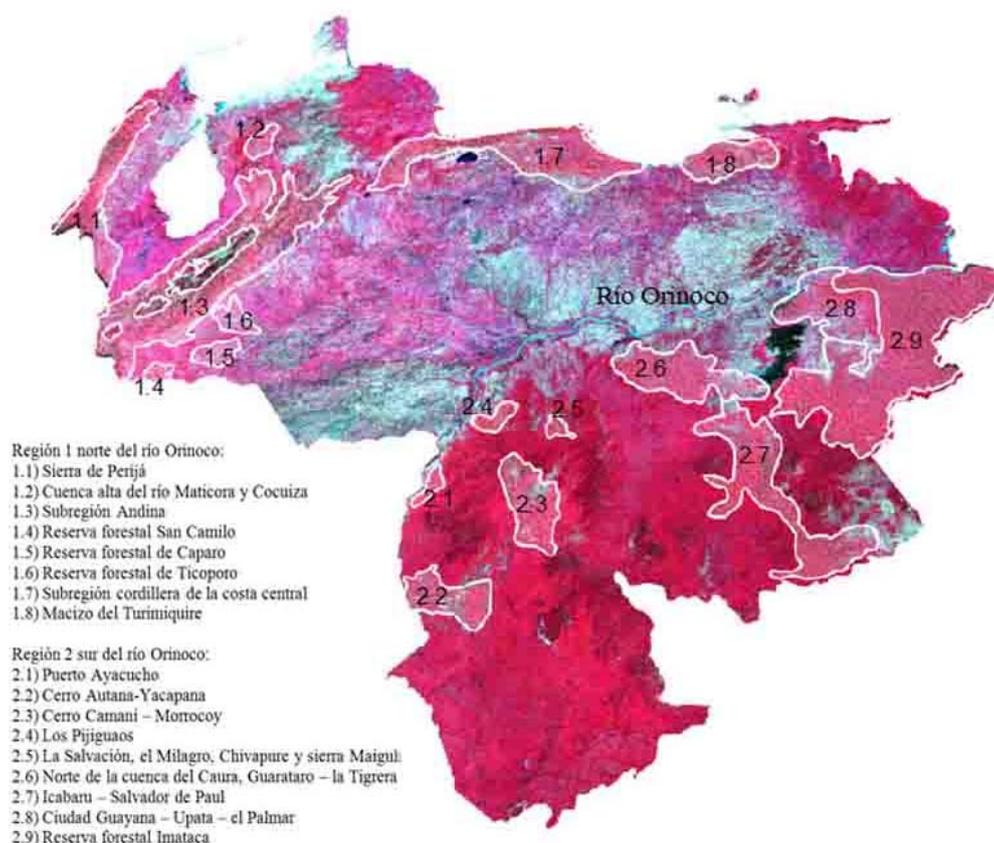


Figura III. 5. Localización de las áreas hot spot, obtenidas mediante la consulta a expertos, sobre la composición falso color (521) de los compuestos anuales de 2005.

Cabe destacar, que aproximadamente el 85% de las áreas hot spot obtenidas mediante métodos digitales se corresponden con las áreas hot spot obtenidas por los expertos. Un ejemplo de esta correspondencia, se encuentra en algunas áreas de la región Noroccidental, como la sierra de Perijá y la cordillera Andina; en la región Centro Norte y Nororiental, en la Cordillera de la Costa; mientras que en la región Sur se puede destacar la cuenca alta del río Caura, Ciudad Guayana, el cerro Autana Yapacana y Puerto Ayacucho.

3.3. Validación

La validación de los mapas hot spot obtenidos de la clasificación digital y mediante la consulta a expertos, demostraron que existen procesos de deforestación en las cinco áreas de muestreo (Tabla III.2), corroborando de esta manera las áreas hot spot de los dos mapas obtenidos. Por su parte, los parámetros de fiabilidad del mapa hot spot obtenido de la clasificación digital, indican que su precisión global fue de 92,45% y su índice kappa de 0,2866. Destacando que en la categoría de deforestación los errores de comisión y omisión fueron mayores con 67,71% y 66,96% respectivamente, que en la categoría de no deforestación con 3,93% de error de comisión y 4,06% de error de omisión.

Tabla III.2. Resultado de las zonas de validación

| Número de identificación | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------------|----------------------------------|--|--|--|-----------------------------|
| Zonas de validación | Cuenca alta del río Grita | Reserva Forestal de Caparo | Cuenca baja del Caura | Yacimiento minero Las Cristalinas | Asentamiento minero Icabarú |
| Tipo de bosques | Siempreverde | Semideciduo | Sub-siempreverde | Semideciduo y siempreverde | Siempreverde |
| Causas principales | Expansión agrícola | Aprovechamiento forestal selectivo | Agricultura familiar mixta | Exploración y explotación minera a gran escala | Minería a pequeña escala |
| Causas subyacentes | Construcción de infraestructuras | Expansión agrícola y ganadera e invasiones | Transformación de pequeños conucos a comercial | Minería a pequeña escala | Boom del oro |
| Periodo evaluado | 2003-2010 | 2004-2009 | 2005-2009 | 2003-2009 | 2003-2010 |
| Área del bosque (ha) restante | 123.340,14 | 67.108,20 | 217.134,54 | 26.303,4 | 24.091,11 |
| Tasa anual de deforestación (%) | -0,72 | -2,95 | -0,37 | -0,31 | -0,20 |

4. DISCUSIÓN

La falta de una cartografía actualizada de la vegetación en Venezuela, requirió generar los mapas de 2005 y 2010 mediante los compuestos anuales de MODIS. Sin embargo, a pesar de que éstos conservan la información más destacada de la variación fenológica, sin tener en cuenta el día específico del año, las condiciones climatológicas de cada año, definieron la fiabilidad de cada mapa. De esta manera tenemos, que el año 2005 fue un año con mayores precipitaciones que el 2010, siendo menor la precisión global del mapa de 2005, con 66,98%, que la del mapa del 2010, con 70,32%, asimismo sus respectivos índices kappa con 0,5793 y 0,6184. A pesar de no ser muy altos estos parámetros, la categoría de mayor interés en este estudio (bosque), presentó valores de fiabilidad bastante aceptables para la cartografía generada a partir de sensores de media resolución, así tenemos porcentajes de aciertos de 86,27% y 78,77%, errores de comisión de 12,55% y 5,19% y de omisión de 13,73% y 21,23%, para la categoría bosque de 2005 y 2010 respectivamente.

El objetivo principal de la detección de cambios, a través de los mapas 2005 y 2010, obtenidos de compuestos anuales de imágenes MODIS, fue la identificación y delineación de las áreas hot spot de deforestación, más no, la estimación directa de las áreas de deforestación durante el periodo evaluado, así lo recomiendan los expertos a nivel nacional (GOFC-GOLD, 2010). Estas áreas hot spot identificadas, servirán como muestreo para la estimación directa de las áreas de deforestación, mediante imágenes de alta resolución, como las derivadas del Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Terra Aster, IRS-P2 LISS-III y AWIFS, CBERS-2 HRCCD, DMC y Spot-5 HRVIR (Achard *et al.*, 2010; GOFC-GOLD, 2010).

La validación con imágenes Landsat-7 ETM+, de los mapas hot spot obtenidos mediante la clasificación digital y mediante la consulta a expertos, sirvió para corroborar dentro de las áreas hot spot de deforestación, la existencia o no, de los procesos de deforestación durante el período 2005-2010. Asimismo, sirvió para evaluar la exactitud del mapa obtenido mediante la clasificación digital. Los resultados de éste indican que los mayores errores de comisión y omisión lo presentaron la categoría de pérdida con respecto a la categoría no pérdida. Estos valores están influidos por el gran número de píxeles clasificados correctamente en la categoría de

no pérdida, lo que hace que la precisión global fuese bastante elevada (92,45%) y el índice kappa presentara un acuerdo bajo (0,2866).

Aproximadamente el 85% de las áreas hot spot obtenidas mediante clasificación digital se corresponden con las áreas hot spot obtenidas de los expertos, el otro 15% fueron áreas que se detectaron, por un lado, en los límites de los bosques, influidos, por tanto por el efecto de borde. Hay que recordar además, que las condiciones meteorológicas de 2005 y 2010 fueron distintas, lo cual afectó al valor digital del pixel y por ende al proceso de asignación de las clases. Finalmente, tampoco hay acuerdo en la detección en las áreas de manejo forestal, como las plantaciones de pinos de la Corporación Venezolana de Guayana que es aprovechada anualmente.

Los resultados de la tasa media anual de deforestación en las zonas de validación del norte del río Orinoco, fueron superiores a las zonas de validación de la región sur. Esto refleja el continuo deterioro de los bosques de esta región. Ejemplo de ello, la zona 2 de validación (Figura III. 6), correspondiente a la reserva forestal de Caparo. En esta zona se detalla la pérdida progresiva del bosque entre 2004 y 2009, conservándose una porción del bosque de 7.000 ha, situada en la parte oeste de la reserva, en la cual se encuentra una estación experimental, orientada a fines científicos, que el estado otorgó en concesión, en 1970, a la Universidad de Los Andes.

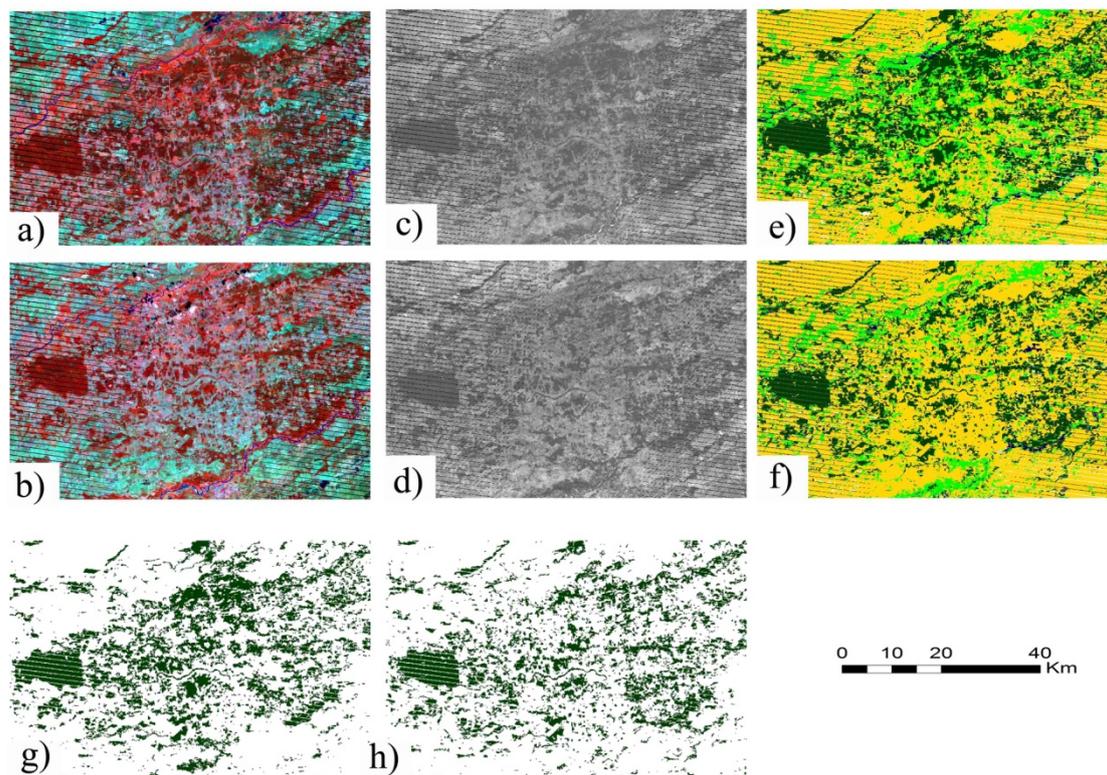


Figura III.6. Zona 2 de validación (Reserva forestal de Caparo); 6a y 6b composiciones falso color (453) de Landsat ETM+ en los años 2004 - 6a y 2009 - 6b; 6c y 6d son imágenes sintéticas de fracción suelo, 6e y 6f imágenes clasificadas: bosque (verde oscuro), arbustales (verde claro), sabanas (amarillo); y 6g y 6h imágenes bosque (verde oscuro) y no bosque (blanco).

El diseño de muestreo realizado en este estudio mediante la identificación de las zonas hot spot de deforestación, es diferente al realizado en el informe FRA 2010, que está llevando a cabo momentos actualmente la FAO junto al JRC, a través del proyecto TREES 3 (2007-2013). En nuestro estudio se realizó un muestreo estratificado, mientras que en FRA 2010, el tipo de muestreo es sistemático (ver apartado de introducción). El total de unidades de muestreo en TREE 3 que se ubican en Venezuela son 79, de las cuales 37, están al norte del río Orinoco donde se identificaron 8 áreas hot spot, los restantes 42 se ubican hacia el sur donde se identificaron 9 áreas hot spot. La coincidencia espacial de estas unidades muestrales con las áreas hot spot definidas en nuestro estudio son de 22, de las cuales 10 se localizan hacia el norte del río Orinoco y 12 hacia el sur.

La opinión de los expertos nos lleva a apuntar hacia la actividad agropecuaria (47,85%) como la principal causa de los procesos de cambio en la cobertura vegetal, específicamente la agricultura familiar mixta y la ganadería extensiva para consumo nacional, que se practican en el 94%, de las áreas hot spot de todo el país. Estas actividades están acompañadas de otro conjunto de causas entre las que destacan: las invasiones sobre el área forestal, la mala aplicación de la ley de reforma agraria desde 1960 y la ley de tierras y el desarrollo agrario desde 2005; la construcción de infraestructuras viales, como las realizadas en áreas forestales o en áreas agrícolas para facilitar la extracción de productos agrícolas; la utilización de incendios forestales, de manera intencionada, para ampliar la frontera agrícola. Todos estos procesos se han dado en la región norte del río Orinoco, en las reservas forestales de San Camilo, Caparo y Ticoporo. De igual manera, las actividades agropecuarias están acompañadas de cambios en el uso de la tierra, como la transformación de los bosques (cabecera de las cuencas) a agricultura familiar mixta en el Macizo de Turimiquire y en los Andes venezolanos, y la transformación de los conucos sedentarios a explotaciones familiares comerciales o semicomerciales, como en el Cerro Autana – Yacapana.

De igual manera, la extensión de infraestructura (24,62%) principalmente ha originado asentamientos, cerca de los principales núcleos urbanos, como en Puerto Ayacucho, Ciudad Guayana, Upata y El Palmar. Por otro lado, las expansiones urbanas en áreas metropolitanas como la del Distrito Capital, San Cristóbal, Mérida y Trujillo se han efectuado a expensas de los bosques próximos. Finalmente, la construcción de carreteras rurales y red ferroviaria en diferentes zonas del país.

Por su lado, la extracción de madera (20,00%) con fines comerciales, de manera estatal y privado, se da en las reservas forestales situadas al norte del río Orinoco, ésta ha sido una de las principales causas de la pérdida de los bosques de esta región. De no tomar precauciones, se podría repetir este fenómeno en las reservas del sur del Orinoco. Esta actividad la favorece por un lado el Estado, mediante la legislación ambiental actual, como la Ley de Bosques y por otro, el desarrollo económico, con el aumento de la producción nacional de madera. Por otro lado, la extracción de madera también se produce mediante el uso doméstico de la madera para combustibles y para mejoramiento de fincas. Este proceso lo encontramos en la mayoría de las áreas hot spot identificadas.

Otra causa es la actividad minera (4,24%), tanto metálica como no metálica; la primera se desarrolla en la mayoría de las áreas hot spot de la región sur del Orinoco, a pequeña y gran escala, donde se extrae oro, diamante, hierro y bauxita principalmente. La segunda área de interés se localiza en la región norte del Orinoco, en la Sierra de Perijá y en la región Andina, donde se extrae carbón y la Cordillera de la Costa Central, donde se extrae níquel y caolín. Esta actividad se ve estimulada por las inmigraciones interregional, nacional y extranjera, así como, por las estrategias del estado venezolano para abastecer la producción minera nacional e internacional. De este modo, se explica la agrupación de las comunidades en asociaciones ó cooperativas, en el yacimiento Las Cristalinas, o bien las leyes y decretos generados para regular el uso de la actividad minera, en la Reserva Forestal de Imataca (Decreto N° 3.330, donde se creó la Zona de Manejo Especial Forestal-Minero -ZMEFM- y la Zona de Manejo Especial Forestal-Minero con Comunidades Indígenas -ZMEFMCI-) o la construcción de vías de comunicación, como la de los sectores mineros de El Dorado, Kilometro 88 y Santa Elena de Uairén, en el estado Bolívar.

Potencialmente, el crecimiento poblacional determina una presión sobre los bosques en Venezuela, que conlleva a la deforestación de los mismos. Este proceso ha generado que en la región norte del río Orinoco, en los momentos actuales, quede menos del 15% de bosque en las Reservas Forestales. En este espacio se seguirán generando procesos de invasión poblacional, que demandarán tierras para el establecimiento de una ganadería extensiva ó una agricultura familiar mixta de pequeño rendimiento. Estos procesos se originan en sectores de población con recursos escasos, que son motivadas por actores políticos y hacendados de la zona, todos amparados por la Ley de Tierras y Desarrollo Agrario en 2005. Por otro lado, en otros sectores como en la zona Andina y la región Norte Costera, los bosques seguirán viéndose amenazados por el incremento poblacional, que ha producido el crecimiento de algunos espacios urbanos y la expansión de las fronteras agrícolas, afectando a tierras boscosas de algunas figuras jurídicas como los Parques Nacionales.

Esta pérdida de masas forestales, en la región norte del río Orinoco, como históricamente ha venido ocurriendo (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I), seguirá originando un proceso de inmigración masiva hacia los bosques de la región sur. Este efecto, se une a otros característicos en la zona al sur del río Orinoco, cabe destacar

en este sentido, el rápido crecimiento de las áreas urbanas, en la región de Guayana; la alta densidad de asentamientos rurales, alrededor de los centros urbanos, el crecimiento de la población indígena (que viene acompañado de un proceso de transculturación, generado por el contacto con el mundo occidental) y la evolución de los asentamientos permanentes de la población minera. Por otro lado, las políticas gubernamentales, seguirán incrementado los servicios básicos de salud, educación, finanzas y seguridad en las poblaciones indígenas y fortaleciendo al sector minero, a través de la legislación (Decreto N° 1.234 del Reglamento General de la Ley de Minas). Todos estos procesos van unidos y de seguir la dinámica ocasionarán un incremento en la demanda de tierras orientadas a la producción agrícola y una mayor necesidad de recursos forestales para satisfacer sus necesidades.

Por otro lado, en los próximos años está prevista la ejecución de proyectos, a nivel nacional, que afectarán a los bosques del país. Tal es el caso de la ampliación de la red ferroviaria, por parte del Instituto Autónomo de Ferrocarriles del Estado, perteneciente al Ministerio de Infraestructura, o bien los proyectos de extracción de carbón, por parte de la Corporación del estado Zulia, o la construcción de embalses, con fines energéticos, por parte de la Electrificación del Caroní Compañía Anónima (EDELCA), de la Corporación Venezolana de Guayana.

5. CONCLUSIONES

La elaboración de este estudio ofrece una síntesis que permite conocer la situación de los cambios en la cobertura forestal, a escala nacional, en los últimos 5 años y previsiblemente para un futuro cercano. Esta síntesis se obtuvo a través de la identificación, delimitación y descripción de las áreas hot spot de la cobertura forestal. En el estudio se han cartografiado estas áreas hot spot a partir de dos métodos: la clasificación digital de imágenes multitemporales y la consulta a expertos. La información obtenida de los expertos nos permite describir y caracterizar las principales causas que impulsaron los cambios.

Los resultados de este trabajo, pueden mejorar los datos de referencia, establecidos por la comunidad científica, en zonas identificadas con cambios recientes y significativos, en la cubierta forestal (Achard *et al.*, 2005; Lepers *et al.*, 2005). En este sentido, las áreas hot spot de cobertura vegetal, obtenidas de los dos mapas

(clasificación de imágenes y consulta e expertos) fueron confirmadas en las zonas de validación, mediante la estimación de las tasas medias anuales de deforestación (Achard *et al.*, 2006). El estudio ha permitido obtener valores representativos, que en ningún caso, pretenden ser, estadísticamente validos, para todo el país. De igual manera podemos decir que este estudio nos permitió revelar que:

- Al igual, que en la cuenca sur del Amazonas (Lepers *et al.*, 2005) o en los bosques boreales de Rusia (Achard *et al.*, 2006) la deforestación en Venezuela no se distribuye al azar o de manera uniforme, sino que se encuentra concentrada en algunas zonas del país.
- Los mayores procesos de pérdida de cobertura vegetal se concentran en la región norte del río Orinoco, donde según los datos aportados por FRA 2005 y el JRC, se localizan actualmente, el 8,63% de los bosques del país (JRC, 2005; FAO, 2010). Las pérdidas en esta región en las zonas de validación superan el -0,6% de la tasa media de deforestación del país (FAO, 2010), a pesar de que estos bosques se encuentran, en su mayoría, protegidos por áreas bajo régimen de administración especial.
- La principal causa de pérdida en la cobertura vegetal de Venezuela, para el período evaluado, ha sido la actividad agrícola, tal y como ha venido siendo a través de su historia (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I), coincidiendo en esta casuística con en el resto de los bosques tropicales (Geist and Lambin, 2002; Rudel *et al.*, 2009; DeFries *et al.*, 2010). Esta actividad junto con la ganadería, representa el 47,85% de la deforestación del país, este hecho está asociado a procesos políticos y a las reformas agrarias del país, que han incentivado durante décadas los cambios de uso de la tierra.
- El uso de imágenes de baja resolución para este tipo de estudios es un instrumento importante, ya que Venezuela, al igual que la gran mayoría de los países tropicales, carece de mapas de vegetación actualizados a escala nacional.
- La clasificación digital de imágenes procedentes de sensores remotos de baja resolución, resultó una herramienta útil para determinar las áreas hot spot de deforestación, a nivel nacional. Sin embargo, se recomienda acompañarla con la

consulta a expertos y la validación de los resultados mediante imágenes de alta resolución para darle mayor validez científica.

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer la participación en este estudio de los siguientes expertos: Leonardo Lugo y Américo Catalán de la Dirección General de Bosques del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente; Otto Huber de la Fundación Instituto Botánico de Venezuela; Mariela Loaiza, Omar Márquez y Lisandro Ramírez de la Coordinación Técnico Científico Ambiental del Ministerio Público; Ernesto Arends, José Lozada y Alexander Parra de la Universidad de los Andes.

7. Apéndices

Tabla III.1.

Elaboración propia. Descripción de los procesos de cambio en cada área hot spot. Datos obtenidos a partir de la consulta a expertos.

| ID | Estados/localización | Tipos de Bosques (altura/densidad) | Proceso de Cambio | Patrón | Cambio Cobertura | Tiempo | Impacto | Actores | Fuerzas Conducentes |
|---------------------------------------|--|--|--|---------|------------------|--------|----------------|-------------|--|
| Región 1 Norte del río Orinoco | | | | | | | | | |
| 1.1 | Zulia: Sierra de Perijá | Altos, medios y bajos densos | MNM/EA ₂ /G ₁ /G ₂ /In/AF | L/I/M | P | P/C/E | Bajo; moderado | EG/ET/PL /I | Comercio, subsistencia y políticas gubernamentales |
| 1.2 | Falcón, Zulia y Lara: Cuenca Alta de los Ríos Maticora y Cocuiza | Medios y bajos densos; bajos ralos | EA ₁ /G ₂ | L/I | M | P/C/E | Bajo | PL/EL | Comercio, subsistencia y agricultura potencial |
| 1.3 | Táchira, Mérida, Trujillo, Apure, Barinas y Lara: Subregión Andina | Altos, medios y bajos densos; medio medio | EA ₁ /EA ₂ /AF E/A ₃ /G ₂ MNM/In/EP/EE/ IF | L/I/M | P | P/C/E | Bajo; moderado | EL/PL/I | Comercio, agricultura potencial, crecimiento poblacional y subsistencia |
| 1.4 | Apure: Reserva Forestal San Camilo | Medios densos | AFS/EP/I/IF/In/G ₁ / EA ₂ | L/D/M | P | P/C/E | Moderado | PL/EL/I | Políticas gubernamentales, comercio, subsistencia, agricultura potencial y crecimiento poblacional |
| 1.5 | Barinas: Reserva Forestal Caparo | Bajos densos | AF/In/I/ IF/G ₁ /EP/EA ₂ | L/I/M | P | P/C/E | Moderado | EL/PL/I | Comercio, subsistencia, agricultura potencial, crecimiento poblacional y política gubernamental |
| 1.6 | Barinas: Reserva Forestal Ticoporo | Bajos densos | AF/OI/IF/ G ₁ /EP/EA ₂ | L/I/M | P | P/C/E | Moderado | EL/PL// I | Comercio, subsistencia, agricultura potencial, crecimiento poblacional y política gubernamental |
| 1.7 | Carabobo, Yaracuy, Aragua, Miranda, Distrito Capital, Vargas, Cojedes, Guárico y Anzoátegui: Subegión Cordillera de la Costa Central | Altos, medios y bajos densos; medio medio; bajos ralos | EA ₂ /EP/ MNM/IF /AF | L/D/M | P | P/C/E | Moderado | PL/EL/ET /I | Comercio, subsistencia, crecimiento poblacional y política gubernamental |
| 1.8 | Anzoátegui, Sucre y Monagas: Macizo Turimiquire | Medios densos; medios ralos | EA ₂ /IF/AF | L/D | P | P/C/E | Moderado | PL | Comercio, subsistencia y políticas gubernamentales |
| Región 2 Sur del río Orinoco | | | | | | | | | |
| 2.1 | Amazonas: Puerto Ayacucho | Altos y medios densos | EA ₂ /EP/A/I/AF | M/D | P | P/C/E | Bajo | PL/I | Subsistencia, comercio y crecimiento poblacional |
| 2.2 | Amazonas: Cerro Autana - Yacapana | Altos densos y medios ralos | EA ₂ /MMPE/I | L/D/M | P | P/C/E | Bajo | PL/I | Subsistencia y comercio |
| 2.3 | Amazonas y Bolívar: Cerro Camani – Cerro Morrocay | Altos densos y medios ralos | EA ₂ /MMPE | D/M | P | P/C/E | Bajo | PL/I | Subsistencia y comercio |
| 2.4 | Bolívar: Los Pijiguaos | Altos densos y medios ralos | MMGE/EA ₂ /AF/G ₁ /In | L/I/D/M | P | P/C/E | Moderado | EG/PL/I | Comercio, subsistencia y políticas gubernamentales |
| 2.5 | Bolívar: La Salvación, El Milagro, Chivapure y Sierra Maigulida | Medios densos | MMPE/ EA ₂ | L/D | P | P/C/E | Bajo | PL/I | Comercio y subsistencia |

Capítulo III. Delimitación y caracterización de aéreas “hot spot” de deforestación en Venezuela, a partir de imágenes de satélite y consulta a expertos

| | | | | | | | | | |
|-----|--|--------------------------------------|--|---------|---|-------|----------|---------------|---|
| 2.6 | Bolívar: Norte de la Cuenca del Caura, Guarataro – La Tigra, Puerto Cabello del Caura, Jabillal, Trinchera, Zona de Zamura | Altos y medios densos; medios medios | EA ₂ /G ₂ /I/AF | L/I/D | P | P/C/E | Moderado | EL/PL/I | Comercio, subsistencia, agricultura potencial y política gubernamental |
| 2.7 | Bolívar: Icabaru – Salvador de Paul | Medios y altos densos; medios medios | MMGE/MMPE | L/M | M | C/P/E | Fuerte | ET/EL/PL/I | Comercio, subsistencia y políticas gubernamentales |
| 2.8 | Bolívar: Ciudad Guayana – Upata – El Palmar | Medios raros | MMGE/EA ₂ /A/EP/AF/G ₁ | L/M | M | C/P/E | Moderado | EG/ET/EL/PL/I | Comercio, subsistencia, crecimiento poblacional y política gubernamental |
| 2.9 | Bolívar y Delta Amacuro: Reserva Forestal de Imataca | Medios y altos densos; medios medios | MMGE/MMPG/AF/EA ₂ /G ₁ /In | L/I/D/M | P | C/P/E | Fuerte | ET/EL/EG/PL/I | Comercio, subsistencia, agricultura potencial y políticas gubernamentales |

ID: Número de identificación.

Estado/localización: nombre del estado administrativo y lugar local.

Tipo de vegetación: en función de la altura (alto, medio y bajo) y densidad (denso medio, raro).

Proceso de cambio: causas que han originado y previsiblemente originarán los procesos de deforestación: *Horticultura comercial (EA₁)*: actividad muy intensiva, con tres cosechas anuales en la misma parcela; *Agricultura familiar mixta de pequeña producción (EA₂)*: originaria del sistema de conucos prehispánicos; *Agricultura campesina andina (EA₃)*: con un sistema tecnológico para la preparación de la tierra de yunta de bueyes y arado de madera con punta de hierro; *Crecimiento demográfico*: de la población local y de los procesos de inmigración; *Invasiones (I)*: ocupación de los bosques de manera ilegal; *Asentamientos (A)*: regímenes de colonización cerca de los centros poblados; *Expansión de la población (EP)*: expansión de las poligonales urbanas debido al crecimiento de la población; *Expansión económica (EE)*: apertura de áreas para nuevos comercios, industrias y turismo; *Aprovechamiento forestal selectivo (AF)*: aprovechamiento forestal, uso doméstico y comercial; *Minería metálica a gran escala (MMGE)*: principalmente oro, diamante, mineral de hierro, aluminio y bauxita; *Minería metálica a pequeña escala (MMPE)*: principalmente oro y diamante, por parte de pequeños mineros y artesanos; *Minería no metálica (MNM)*: como el carbón, mica, yeso, cobre y azufre; *Incendios forestales (IF)*: ocurridos a pequeña y gran escala; *Ganadería extensiva (G₁)*: los rebaños de bovinos, caprinos, equinos, asnos y piasas de cerdos; *Ganadería semiintensiva (G₂)*: con mejores condiciones ecológicas, desarrollo tecnológico, evolución del mercado y tiempo de desarrollo. *Infraestructuras (In)*: construcción de carreteras, vías de penetración al bosque primario y de embalses.

Patrón de deforestación: originado en el bosque por la deforestación: *Lineal (L)*: líneas estructuradas dentro del bosque; *Insular (I)*: grandes parches, relacionados a la deforestación y conversión; *Difusa (D)*: pequeños parches, relacionados a la fragmentación y procesos de degradación; y *Masiva (M)*: causada a gran escala de deforestación en bloque o de frente a los bordes. *Cambio de cobertura del bosque*: en porcentaje: *Grande (G)*: >10%; *Medio (M)*: 5-10% y *Pequeño (P)*: <5%.

Tiempo: en los que han ocurrido las deforestaciones: *Pasado (P)*: 2005-2009; *En curso (C)*: 2009-2010 y *Esperado (E)*: próximos 5 años.

Impacto: en composición de especies, suelos ó ecosistema: Fuerte (F), Moderado (M) ó Bajo (B).

Actores: *Empresas locales (EL)*: incluidas las forestales (concesiones) y empresas agrícolas; *Empresas gubernamentales (EG)*; *Empresas transnacionales (ET)*; *Personas locales (EL)*; *Inmigración (I)*: interregional, nacional e internacional (principalmente de Colombia y Brasil).

Fuerzas conducentes: que motivaron a los diferentes actores: *Comerciales (C)*: ánimo de lucro, madera y cultivos económicos, otros negocios; *Subsistencia (S)*: para su propio autoconsumo; *Agricultura potencial (AP)*: atracción a los agricultores y empresas para la producción agrícola; *Crecimiento poblacional (CP)*: expansión de la poligonal urbana o nuevos centros urbanos satélites; *Políticas gubernamentales (PG)*: Incluyen las políticas exportación, la asignación de concesiones, mercado y turismo.

8. Referencias

- Achard, F., Eva, H.D., Glinni, 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, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., Malingreau, J.P., 2002. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *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.
- Achard, F., Stibig, H., Laestadius, L., Roshchanka, V., Yaroshenko, A., Aksenov, D., 2005. Identification of “Hot Spot Areas” of forest cover changes in boreal Eurasia. In. Russia: Report to the Join Research Center of the European Commission, World Resources Institute, Greenpeace Russia and Socio-Ecological Luxembourg, p. 62.
- Bins, S.A., Fonseca, L.M.G., Erthal, G.J., Li, M., 1993. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In, Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Salvador, Brazil.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., Stone, C.J., 1984. *Classification and Regression Trees*, California.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 1996. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20, 395-403.
- Câmara, G., Valeriano, D., Soares, J., 2006. Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal. In. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brazil, p. 13.
- Congalton, R., Green, K., 2009. *Assesing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices*. Taylor and Francis Group, London, New York, CRC Press, .
- DeFries, R.S., Rudel, T., Uriarte, M., Hansen, M., 2010. Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nat Geosci* 3, 178-181.
- FAO, 1993. *Forest Resources Assessment 1990. Tropical countries*. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p. 112.
- 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.
- Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H., Woodcock, C.E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., Schaaf, C., 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 Forests, Government of India, Dehradun, India, p. 226.
- Geist, H., Lambin, E., 2002. Proximate cause and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52, 143-150.
- GOFC-GOLD, 2010. *A sourcebook of methods 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 forestation*. In, GOFC-

- GOLD Report version COP16-1. GOFC-GOLD Project Office, NaturalResources Canada, Alberta, Canada.
- Hansen, M.C., DeFries, R.S., 2004. Detecting Long-term Global Forest Change Using Continuous Fields of Tree-Cover Maps from 8-km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Data for the Years 1982–99. *Ecosystems* 7, 695-716.
- Hansen, M.C., DeFries, R.S., Townshend, J.R.G., Sohlberg, R., Dimiceli, C., Carroll, M., 2002. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83, 303-319.
- INPE, 2010. Monitoring of the Brazilian Amazonian: Projeto PRODES In, <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>, Brazil.
- JRC, 2005. A Proposal for Defining the Geographical Boundaries of Amazonia. . In: Eva, H., Huber, O., (Ed.). Joint Research Center, Ispra, Italy. , p. 38.
- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., Scholes, R.J., 2005. A Synthesis of Information on Rapid Land-cover Change for the Period 1981–2000. *BioScience* 55, 115-124.
- MARN, 2001. Estrategia nacional para la diversidad biológica y su plan de acción. In. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Caracas, Venezuela.
- MARNR, 1995. Mapa de vegetación de Venezuela. In, Caracas, Venezuela.
- 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 Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring Global Environment* Springer, Spain.
- MINAMB, 2005. Información forestal. In. Dirección General de Bosque. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Caracas, Venezuela.
- Myers, N., 1992. Future operational monitoring of tropical forests: an alert strategy. In. Joint Research Center EC, Ispra, Italy.
- Pacheco, C., Aguado, I., Mollicone, D., 2011 Capítulo I. Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *Biollania* 10, 281-292.
- 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.
- 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., Turner, 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, Berlín, pp. 9 - 40.
- 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.
- Shimabukuro, Y.E., Smith, J.A., 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 29, 16-20.
- Wolfe, R.E., Roy, D.P., Vermote, E., 1998. MODIS land data storage, gridding, and compositing methodology: Level 2 grid. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 36, 1324-1338.

Capítulo IV. Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD+: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolanos

Publicación derivada:

Pacheco C, Aguado I, Lopez J (en preparación). Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD+: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolanos.

Resumen

En esta investigación se realizó un análisis comparativo de los métodos que actualmente se utilizan para el monitoreo de la deforestación, a nivel nacional, regional y global. El objetivo es conocer cuál de ellos se adapta mejor a los ambientes tropicales de Venezuela, y así recomendar su utilización tanto en la evaluación de la pérdida de la cobertura del bosque como en la estimación de las emisiones de CO₂, dentro del marco de las estrategias REDD+. En el estudio, se ha seleccionado la Reserva Forestal de Caparo, un área de bosques de tierra baja, con una alta dinámica de procesos de pérdida. El análisis comparativo se realizó con datos multiespectrales de Landsat ETM+, de 2007 y 2009 y se validó con datos pancromáticos de SPOT 4 y 5. Los resultados demuestran que la cartografía de bosque para 2007 y 2009, fue mejor clasificada según el método FRA-RSS – TREES 3 (un 86,7% de Precisión Global (PG) y un índice kappa de 0,72), seguida del método CLASlite (un 85,3% de PG y 0,70 Kappa), PRODES (un 84,9% de PG y 0,69 kappa) y FSI (un 84,5% de PG y 0,67 kappa). Mientras, la validación de la cartografía de deforestación ofrece mejores resultados para el método PRODES, tanto en los resultados obtenidos de la matriz de confusión como del análisis de regresión lineal (un 88,82% de PG, 0,32 kappa, 0,49 R²).

Palabras claves: Deforestación, Landsat, Spot, REDD+, PRODES, FSI, FRA RSS – TREES 3, CLASlite, Venezuela.

Abstract

In this research, a comparative analysis of the methods used nowadays to monitor deforestation nationally, regionally, and globally has been done. The goal is to know which one of them adapts better to the tropical environments of Venezuela, and recommend its use both in the assessment of forest cover loss and the estimation of CO₂ emissions, framed into REDD+ strategies. For this study, Caparo Forest Reserve has been selected. This is a low land forests area, with a high dynamic of loss processes. The comparative analysis used multispectral data from Landsat ETM+ 2007 and 2009, and was validated using panchromatic SPOT 4 and 5 data. The results show that forest mapping in 2007 and 2009 was better classified using FRA-RSS – TREES 3 method (Global Precision (GP) of 87.7% and kappa index of 0.72). The second best

was the CLASlite method (GP 85.3% and kappa 0.70), then PRODES (GP 84.9% and 0.69 kappa), and FSI (GP 84.5% and 0.67 kappa). However, in the validation of deforestation mapping PRODES method gave the best results both in the confusion matrix, and in the linear regression analysis (GP 88.82% and kappa 0.32, 0.49 R²).

Key words: Deforestation, Landsat, Spot, REDD+, PRODES, FSI, FRA RSS – TREES 3, CLASlite, Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

La deforestación tropical produce más pérdida de reserva de carbono por unidad de superficie que los procesos de degradación de los bosques, que tan solo producen reducción de carbono (Achard *et al.*, 2010; Asner *et al.*, 2010). La degradación se puede producir por las actividades de explotación forestal selectiva, el establecimiento de carreteras rurales, el uso de fuego para expandir la frontera agrícola ó la caída natural de los árboles. La deforestación y la degradación de los bosques tropicales contribuyen a la emisión atmosférica de gases de efecto invernadero, esencialmente a través del CO₂ (IPCC, 2003; Denman and Brasseur, 2007), debido a la combustión de la biomasa forestal y a la descomposición del resto de materia vegetal y el carbono procedente del suelo. Actualmente, la contribución combinada de la deforestación, la degradación de los bosques y la emisión de turberas, contribuyen con el 15% al total de las emisiones antropogénicas de CO₂ (van der Werf *et al.*, 2009). Este porcentaje en las emisiones de CO₂ tiene una alta incertidumbre, ya que es difícil cuantificar, en el cálculo global del carbono, la contribución correspondiente al uso de la tierra (Solomon *et al.*, 2007).

A pesar de esa alta incertidumbre, la contribución de estas emisiones antropogénicas en el cálculo global del carbono es reconocida por la comunidad científica internacional del cambio climático como algo muy significativo (Achard *et al.*, 2010). Esto ha llevado consigo, que los debates internacionales oficiales se iniciaran en el 2005, en Montreal, con el COP-11 (11^a Conference of Parties) del UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). Este debate puso en marcha un mecanismo para investigar acerca de los elementos técnicos capaces de reducir estas emisiones, así se originó el programa REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Degradation) para los países en desarrollo. Para llevar a cabo este objetivo, en el

COP-15, celebrado en Copenhague (2009), surgió la necesidad de proporcionar financiación, por parte de los países desarrollados, es así como nace el programa REDD+, que en el último COP-16, celebrado en Cancún (2010), se formalizó y se cubrieron otros aspectos como los sociales y ambientales, pero su financiamiento no fue resuelto, quedando la decisión final diferida para la próxima conferencia a celebrar en Suráfrica (Sanhueza, 2011).

Adicionalmente, a estos esfuerzos internacionales, deben realizarse estimaciones precisas para aumentar la exactitud en diferentes temáticas: identificar con mayor certidumbre las zonas de cambios en la cubierta vegetal, mayor precisión en el cálculo de la existencia inicial de carbono, su crecimiento y en las pérdidas por degradación, entre otros procesos (Houghton, 2005; Baker *et al.*, 2010). Estas estimaciones, se apoyan en la creciente disponibilidad de datos e información mundial (Ramankutty *et al.*, 2006) como los datos procedentes de imágenes de satélite, que combinándolos con medidas de campo, proporcionan un elemento clave, en la determinación de la pérdida de la cubierta forestal y en consecuencia, en las estimaciones de carbono. En la actualidad, estos datos se utilizan para estimar las tendencias de la deforestación, siguiendo cuatro enfoques principalmente (Achard *et al.*, 2010).

El primer enfoque se basa en la identificación de áreas “hot spot” de deforestación, que son áreas que tuvieron un cambio rápido en la cobertura vegetal en los últimos años, a escala global (Lepers *et al.*, 2005) ó a escala regional (Achard *et al.*, 1997; Achard *et al.*, 2006). El segundo, es un enfoque anidado, que utiliza imágenes de baja resolución espacial para realizar un análisis de cobertura wall-to-wall y así identificar las zonas deforestadas, y posteriormente, en estas áreas determinar la pérdida del bosque a partir de imágenes de resolución espacial media (Morton *et al.*, 2005; Potapov *et al.*, 2008; Bontemps *et al.*, 2010). El tercer enfoque, es realizado mediante un muestreo estadístico sistemático, a partir de imágenes de resolución espacial media (Achard *et al.*, 2010; Eva *et al.*, 2010). El cuarto, es un enfoque de análisis de cobertura wall-to-wall, con imágenes de resolución espacial media, que cubre la extensión boscosa total de un país ó región (FSI, 2009; INPE, 2010).

Estos métodos permiten identificar y cuantificar las pérdidas de la cobertura del bosque a partir de un tratamiento digital de imágenes, basado en la clasificación de los píxeles de la imagen en función de su distinto comportamiento reflectivo. Estos

métodos han sido aplicados en distintos países y en diferentes proyectos de monitoreo, entre los que destacan actualmente, los siguientes:

Dos proyectos operativos para el análisis wall-to-wall, el primero, denominado PRODES (Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia), desarrollado con carácter anual, por el INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) de Brasil. Este proyecto entre 1988 y 2002, se desarrolló a partir de datos analógicos, mediante la interpretación visual de imágenes Landsat. Desde 2003, el INPE comenzó a adoptar técnicas digitales, desarrollando así el proyecto PRODES Digital, el cual utiliza el software SPRING (Câmara *et al.*, 1996). El segundo proyecto que aplica una metodología wall to wall se ha desarrollado dentro del FSI en la India (Forest Survey of India). Desde 1987 se ha realizado la vigilancia sistemática de la cubierta forestal de este país bianualmente, utilizando técnicas de teledetección. Entre 1987 y 1998, se utilizaron técnicas de interpretación visual y a partir de 2001 se utiliza una interpretación híbrida digital y manual (FSI, 2009).

Con otro enfoque diferente se ha desarrollado desde 2007 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). Dicho proyecto se está llevando a cabo en los momentos actuales en colaboración con el JRC de la Comisión Europea (Joint Research Center), a través del proyecto TREES 3 (Tropical Ecosystem Environment observation by Satellites 3). Este proyecto está previsto se desarrolle hasta el 2013 (Achard *et al.*, 2010; Eva *et al.*, 2010). El RSS se realiza a escala global, y en su desarrollo se sigue un muestreo sistemático, utilizando la intercepción de la cuadrícula cartográfica cada 1°. En cada una de estas intercepciones se evalúa una unidad de muestreo de 20 km * 20 km, utilizando 9.000 puntos de muestra, estos puntos son tratados según un enfoque multidata (Desclée *et al.*, 2006). Este muestreo sistemático ha sido validado a escala regional, en la cuenca del río Congo, entre 1990 -2000 (Duveiller *et al.*, 2008) y en la Amazonía brasileña entre 2002 y 2003 (Eva *et al.*, 2010); de igual manera fue probado a nivel nacional y validado en la Guayana Francesa, entre 1990 y 2006 (Eva *et al.*, 2010).

Asimismo, el Instituto Carnegie de la Universidad de Stanford, ha diseñado el software CLASlite (Carnegie Landsat Analysis System) para la identificación, altamente automatizada, de la deforestación y la perturbación forestal, a través de imágenes de

satélites. Este método ha sido desarrollado como un sistema experto, que permite la cartografía de la deforestación tropical y la identificación de las perturbaciones forestales, incluyendo la tala selectiva (Asner *et al.*, 2005a; Asner *et al.*, 2006; Asner *et al.*, 2009). El método se ha utilizado para evaluar la situación de los estados brasileños de Pará, Mato Grosso, Rondonia, Roraima y Acre, en el período 1992 a 2002 (Asner *et al.*, 2005b) y para monitorear el 80 % del Amazonas peruano desde 1999 a 2005 (Oliveira *et al.*, 2007).

En este orden de ideas, se revela de interés determinar cuál de las metodologías disponibles para el monitoreo de pérdidas de bosques tropicales, se adapta mejor a los ambientes venezolanos, de cara a evaluar la deforestación y las emisiones de CO₂ en Venezuela, dentro del marco de las estrategias de REDD+. Para ello se plantea como objetivo de esta investigación ensayar un análisis comparativo de las metodologías PRODES, FSI, FRA RSS – TREES 3 y CLASlite, métodos que actualmente se están aplicando a nivel nacional, regional y global.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN

Antes de comparar las metodologías, es esencial comprender las similitudes y diferencias que muestran. En la tabla IV.1 puede consultarse un resumen de las mismas. Todas ellas utilizan imágenes de sensores multiespectrales de resolución media entre 10 a 30 m, donde las bandas del canal rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, son la base para su análisis, excepto en la metodología CLASlite que adicionalmente utiliza las bandas azul y verde.

Se aplican en todas las metodologías correcciones geométricas para ajustar las imágenes y minimizar los errores en el monitoreo. Mientras que la corrección atmosférica se aplica en CLASlite a través del Modelo “6S” (Vermote *et al.*, 1997), y en FRA RSS – TREES 3 se realiza una normalización lineal de primer orden, para reducir la interferencia atmosférica y mejorar la interpretabilidad de las imágenes.

Desde un punto de vista espectral PRODES y CLASlite, realizan un mejoramiento de las bandas, para estimar en cada pixel, las proporciones de suelo, vegetación y sombra, mediante la técnica LSMM (Linear Spectral Mixing Model) en el caso de

PRODES (Shimabukuro and Smith, 1991) y mediante el modelo Monte Carlo – AutoMCU, definiendo las porciones de vegetación fotosintética, vegetación no fotosintética y superficie descubierta en CLASlite (Asner, 1998). Por su parte, el FSI utiliza el NDVI para discriminar las zonas sin vegetación.

Con respecto a los clasificadores utilizados en el proceso, tanto PRODES como FRA RSS – TREES 3 utilizan los basados en el contexto espacial, el primero en la capa sintética del suelo a través de una segmentación y una clasificación no supervisada (Câmara et al., 2006), y el segundo mediante una segmentación de una imagen multibanda y multitemporal (9 bandas), conformada por las bandas 3, 4 y 5 de Landsat, de diferentes fechas y aplicando posteriormente, una clasificación supervisada (Desclée et al., 2006). Por su parte, el FSI utiliza un enfoque híbrido, con un clasificador ISODATA no supervisado y una interpretación visual en pantalla sobre una composición en falso color, mientras que CLASlite utiliza para discriminar entre bosque - no bosque una técnica de clasificación de árbol de decisión sobre la capa de vegetación fotosintética.

Las leyendas varían, desde la más detallada como la del FRA RSS – TREES 3 que utiliza 11 categorías, pasando por PRODES con 6, luego el FSI con 5 y terminando con CLASlite que define solamente 2 clases. Las escalas de trabajo para las metodologías que utilizan el enfoque wall-to-wall (PRODES y FSI) varían desde 1:250.000 y 50.000 respectivamente. Mientras que la MUC (Mínima Unidad Cartografiable), va desde 1 ha (FSI y FRA RSS – TREES 3) hasta 6,25 ha (PRODES).

Respecto al enfoque utilizado, unitemporal frente a multitemporal, las metodologías también varían, tanto PRODES como FSI utilizan el análisis unitemporal (una única fecha para determinar las áreas de deforestación), mientras que FRA RSS – TREES 3 y CLASlite utilizan un enfoque multitemporal (dos ó más imágenes de distintas fechas). Asimismo, todas las metodologías o bien aplican o sugieren validar sus resultados, PRODES lo realiza tanto en laboratorio como en el campo; en FSI se valida a partir de imágenes de alta resolución de 5,8 m, FRA RSS – TREES 3, realiza la validación a partir de la opinión de expertos regionales y CLASlite sugiere realizar una validación en el campo.

Capítulo IV. Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolanos

Tabla IV.1. Resumen de las características de las metodologías para el monitoreo de la deforestación.

| Características de las metodologías | PRODES | FSI | FRA RSS -TREES 3 | CLASlite |
|--------------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|
| Sensor | Landsat TM y ETM+ | IRS P6 LISS III | Landsat TM y ETM+, Spot 4 y5, ASTER | Landsat TM y ETM+, Spot 4 y5, ASTER |
| Resolución espacial (m) | 30 | 23,5 | 10 – 30 | 10 – 30 |
| Bandas | 3, 4 y 5 | 1, 2 y 3 | 3, 4 y 5 Landsat y en SPOT y ASTER | 1, 2, 3, 4, 5 y 7 Landsat |
| Corrección Geométrica | Cartografía 1:100.000 | Cartografía 1:50.000 | (SOI) Registro de imágenes | Registro de imágenes |
| Corrección Atmosférica | No aplica | No aplica | Normalización y mejoradas linealmente | Modelo "6S" |
| Mejoramiento espectral | Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (LSMM) | NDVI | - | Monte Carlo – AutoMCU |
| Clasificador | Basado en el contexto espacial (Segmentación y Clasificación no Supervisada "Isoseg") | Supervisada "ISODATA", con interpretación visual en pantalla | Basado en el contexto espacial (Segmentación y Clasificación Supervisada) | Árbol de Decisión |
| Bandas clasificadas | Fracción Sombra (LSMM) | Composición en falso color | Composición multi temporal | Fracción Photosynthetic (AutoMCU) |
| Leyenda | Forestal, No Forestal, Deforestación Total (incremento por año), Nubes e Hidrografía | Bosques Muy Densos, Bosques Moderadamente Densos (40-70%), Bosques abiertos (10-40%), Arbustos y No Forestal. | Cobertura de Bosque (CB), Mosaicos (40-70%CB), Mosaicos (10-40%CB); Otros tipos de Vegetación (Arbustos, Herbazales, Áreas Quemadas), Cultivos, Suelos Desnudos y Áreas Artificiales, Aguas y Nubes | Forestal y No Forestal |
| Escala | 1:250.000 | 1:50.000 | - | - |
| Mínima Unidad Cartografiable (MUC) | 6,25 ha | 1 ha | 1 y 5 ha | - |
| Enfoque de análisis de deforestación | Unitemporal | Unitemporal | Multitemporal | Multitemporal |
| Validación | Laboratorio y campo con personal experto | Muestreo con imagen de satélite de 5,8m IRS 1C / 1D | Talleres con los expertos regionales | Recomienda chequeo de campo |

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la Reserva Forestal de Caparo (RFC), ubicada en los Llanos Occidentales de Venezuela, al suroeste del estado de Barinas, encuadrada geográficamente entre las coordenadas 71° 3' 35'' y 70° 28' 35'' longitud Oeste y 7° 18' 00'' y 7° 39' 50'' latitud Norte, con una superficie de 1.744,84 Km² (Figura IV.1).

Se localiza sobre una planicie de desborde activa de edad reciente, con una altitud que varía de este a oeste de 120 a 140 m, geomorfológicamente pertenece a una cuenca sedimentaria compuesta por un manto de sedimentos cretácicos y cenozoicos. Desde un punto de vista climático, posee una estación seca (noviembre-abril) y una húmeda (mayo-octubre) con una precipitación media anual de 2.156 mm y una temperatura media anual de 24,96 °C, por lo que se trata de una clima tropical.

La selección de la RFC como área de estudio, viene dada porque fue una de las 17 áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela, área que representó un cambio rápido en la cobertura del bosque en los últimos 5 años (2005-2010) (Pacheco *et al.*, en revisión Capítulo III). La actividad extractiva de las empresas concesionarias y las sucesivas invasiones, han ido reemplazando los paisajes con bosques, sabanas húmedas y/o esteros, casi en su mayoría, por un paisaje de pastizal. Actualmente, su vegetación está conformada por : pastizales, en estratos gramínicos con escasos elementos arbóreos; rastrojos, tipo de matorral con vegetación secundaria que se establece en áreas abandonadas; matorrales, conformados predominantemente por estratos arbustivos y herbáceos; plantaciones, representadas de forma más o menos regular en pequeñas superficies, pero muy abundantes; bosques, es quizás la formación más interesante, bien por su importancia ecológica y su carácter, representativo de uno de los últimos relictos de bosque natural en los Llanos Occidentales, o bien, por su importancia desde el punto de vista comercial, orientada a la explotación de madera; bosques de galería, asociados a los cursos de agua permanentes y/o semipermanentes y a áreas de influencia freática; casildales, dominados por la especie *Acacia Articulata*, un pequeño árbol de 6 a 13 m; y palmares, formación compuesta por comunidades casi puras de palmas.

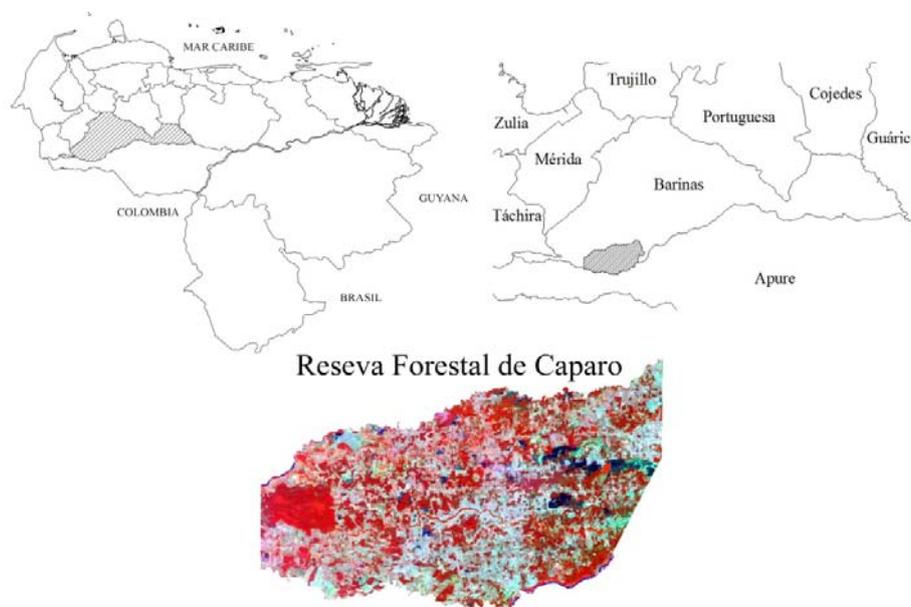


Figura IV.1. Ubicación del área de estudio.

3.2. Datos

3.2.1. *Imágenes Landsat*

En este trabajo se emplearon dos imágenes Landsat ETM+ de 30 m de resolución, tomadas dentro del período de sequía (noviembre-abril) para garantizar la mínima cobertura de nubes y de sombra de nubes y obtener un buen contraste entre la vegetación y suelo. La primera fue adquirida el 13 de marzo de 2007 y la segunda el 31 de diciembre de 2009. Las imágenes corresponden a la órbita path 006 y row 55 con coordenadas del centro de la imagen de latitud 7,2° y longitud -70,8°. El área de estudio se ubica en el centro de la imagen, por tanto, no está afectada por el efecto SLC off presente en estas imágenes. Las imágenes proceden de la colección del USGS (U.S. Geological Survey) (<http://glovis.usgs.gov/>) de distribución libre y poseen un nivel de corrección radiométrico y geométrico L1T. Para el análisis se emplearon las bandas de reflectividad: azul (0,45-0,52 μm), verde (0,52-60 μm), rojo (0,63-0,69 μm), infrarrojo cercano (0,76-0,90 μm) e infrarrojo medio (1,55-1,75 μm) y (2,08-2,35 μm).

3.2.2. *Imágenes Spot*

Se han utilizado las bandas pancromáticas (0,51 – 0,73 μm) de Spot 4 y Spot 5 (10 y 5 m de resolución, respectivamente) en la validación de los resultados. Para que coincidieran con la fecha de adquisición de las imágenes Landsat, se seleccionaron las imágenes disponibles dentro de un rango de +/- 4 meses a la fecha de las imágenes Landsat. En el 2007 las imágenes fueron la 07/12/08 y 08/01/19 y para el 2009 la 09/04/05 y 09/11/12. En estas dos imágenes, las órbitas seleccionadas cubren el área de estudio, 653-335 hacia el Este y 652-653 hacia el Oeste. Para homogenizar la resolución espacial, las imágenes de Spot 4 fueron remuestreadas a 5 m, con la técnica del vecino más cercano. Tanto las imágenes de Spot 4 como Spot 5 fueron corregistradas con las Landsat.

3.2.3. *Información Auxiliar*

Se utilizaron dos mapas, de usos del suelo (1994) y de cobertura vegetal (2007) respectivamente, como datos de referencia del terreno, para conocer la ubicación

espacial de las categorías vegetales. Estos mapas fueron realizados con intensivos chequeos de campo, tanto para la toma de muestras, la interpretación inicial y la validación, lo que confiere a sus productos finales una buena fiabilidad. El mapa de 1994 fue generado a través de una imagen Spot 3, de 20 m de resolución, de la cual se originó una composición en falso color, que se interpretó visualmente en pantalla y en papel fotográfico, obteniendo dos mapas a escala 1:100.000 con una precisión global de 98,8% y 93,8% respectivamente (López *et al.*, 1996). Mientras que el mapa de 2007 fue generado a partir de dos imágenes, una ASTER de 15 m y una Spot de 10 m, éstas se clasificaron separadamente, utilizando un clasificador de máxima probabilidad, la precisión global de las mismas fue de 95,35% y 94,99% respectivamente. Las imágenes se unieron a partir de un mosaico para generar un mapa 1:25.000 (Maldonado, 2009). Adicionalmente, se utilizó información cualitativa obtenida de Google Earth TM (<http://www.google.com/earth/index.html>).

3.3. Métodos

3.3.1. Definición de criterios para la comparación

Para ser comparables las metodologías fue necesario establecer algunos criterios en común. En este sentido, se establecieron dos categorías bosque y no bosque. El bosque se utilizó bajo la definición del Protocolo de Kioto (Protocolo 17), a través de los Acuerdos de Marrakech (UNFCCC, 2001), el cual posee las siguientes características: superficie mínima de bosque 1 ha, altura mínima de la cubierta 2 m y cobertura mínima de copa 10 %. Mientras, el resto de categorías que se encuentran en el área de estudio y que no cumplen estas características fueron definidas como no bosque.

Por otro lado, para generar la cartografía por medio de cada metodología se utilizaron, por defecto, los parámetros originales de las mismas, de este modo se obtuvieron los mapas de bosque - no bosque del 2007 y 2009. De igual manera, para obtener la cartografía de deforestación de los bosques entre estas dos fechas, se emplearon técnicas de detección de cambios; a través de la diferencia de los mapas obtenidos en las metodologías PRODES y FSI (metodologías que tienen definido un enfoque unitemporal), mientras que para obtener la cartografía de deforestación de FRA RSS –

TREES 3 y de CLASlite, se utilizaron las metodologías propias de cada uno de ellos, como la segmentación multiescalar y los algoritmos matemáticos, respectivamente.

Asimismo, se utilizaron imágenes Landsat para todas las metodologías, a pesar de que FSI no las utiliza actualmente, sin embargo, en épocas anteriores fueron su principal soporte. Estas imágenes no fueron corregidas geométricamente, ya que las imágenes del USGS poseen un nivel de corrección geométrica L1T.

3.3.2. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con PRODES

Esta metodología utiliza las bandas 3, 4 y 5 de Landsat, con ellas se generó el modelo lineal de mezclas espectrales (LSMM), para estimar la proporción de los componentes de suelo, vegetación y sombra, para cada píxel (Shimabukuro and Smith, 1991). El modelo puede escribirse como:

$$r_i = a * vege_i + b * suelo_i + c * sombra_i + e_i$$

Donde r_i es la respuesta del píxel en la banda i ; a , b , y c son las proporciones de vegetación, suelo y sombra (o agua), respectivamente. $vege_i$, $suelo_i$ 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 e i indica la banda del ETM+ utilizada.

Se utilizaron las tres bandas mencionadas para formar un sistema de ecuaciones lineales que pueden resolverse usando el método de los mínimos cuadrados (Shimabukuro and Smith, 1991).

La banda del componente suelo, fue la seleccionada para cartografiar el bosque – no bosque, debido a que proporciona un gran contraste entre el bosque y el suelo desnudo. Esta imagen se segmentó, aplicando una técnica de agrupación de datos, según dos criterios: a) uno mínimo de similitud, por debajo del cual, dos áreas son consideradas similares y agrupadas en una única región y b) otro a partir del valor del área mínima, el cual requiere un número de píxeles determinado para que un área sea individualizada (Bins *et al.*, 1993). Los valores empleados fueron 8 para la similitud y 16 para el área mínima (Câmara *et al.*, 1996).

Con la imagen segmentada, la banda porción suelo y el tipo de clasificación a utilizar (por regiones), se generó el archivo de contexto y se realizó la extracción de la información de la imagen por regiones (INPE-DPI, 1999). Luego, se utilizó el algoritmo de clasificación no supervisado (Isoseg), empleando un umbral del 95%. Posteriormente las clases de la imagen clasificada se reagruparon en bosque – no bosque. De esta manera se obtuvo el mapa de 2007 y 2009, a los que se les emplearon técnicas de detección de cambios, para obtener el mapa de deforestación por medio de esta metodología.

3.3.3 .Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con FSI

Las bandas Landsat empleadas siguiendo esta metodología fueron la 3, 4 y 5. Estas se utilizaron para realizar una interpretación de imágenes bajo un enfoque híbrido. En primer lugar, se aplicó una clasificación no supervisada, a través del algoritmo ISODATA, que generó 7 clases y posteriormente, estas clases fueron etiquetadas como bosque – no bosque, siguiendo una interpretación visual en pantalla. Este proceso se realizó con la ayuda de los datos de referencia del terreno, mapas de los años 1994 y 2009 y la información procedente de Google Earth™. Adicionalmente, se utilizó el índice de vegetación normalizado (NDVI), para eliminar de la escena las áreas sin vegetación. Todo esto se realizó para obtener los mapas de 2007 y 2009, que se utilizaron para generar el mapa de deforestación a través de técnicas de detección de cambios.

3.3.4. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con FRA RSS – TREES 3

Esta metodología utiliza las bandas 3, 4 y 5 de Landsat, las cuales se normalizaron linealmente para reducir la interferencia atmosférica y facilitar la interpretación de las imágenes. Este proceso se realizó a partir de la segmentación de una imagen multibanda (Desclée *et al.*, 2006), compuesta por las tres bandas normalizadas de los años 2007 y 2009. Todas estas bandas se combinaron para generar una imagen multitemporal de 6 bandas. Esta imagen se segmentó con el software e-Cognition (Baatz and Schape, 2000) tomándose en cuenta los siguientes parámetros: 5 de

escala, 90% de color, 10% de forma, 10% de compacidad y 90% de suavidad (Eva *et al.*, 2010).

El resultado fue un único estrato de objetos ó polígonos que contiene información para las dos fechas (FAO, 2009). Con la media y desviación estándar de los objetos del estrato, en cada banda se realizó un proceso interactivo para encontrar los umbrales de separabilidad entre el bosque- no bosque, en las bandas de 2007 y 2009, y los umbrales de pérdida - no pérdida, en la imagen multitemporal (Desclée *et al.*, 2006). En ambos procesos se unieron los objetos que se encontraban dentro de los umbrales, luego se etiquetaron y se les aplicó una clasificación supervisada, para obtener los mapas de 2007 y 2009, y el mapa de deforestación de ambas fechas.

3.3.5. Obtención de cartografía de cubiertas de bosque – no bosque y deforestación con CLASlite

La aplicación de este método requiere las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de Landsat. En primer lugar se aplica una corrección radiométrica que minimice la contribución de la atmósfera en las imágenes satelitales, ello requiere que los datos brutos de estas bandas se transformen a datos de reflectividad, empleando los factores de conversión facilitados por el proveedor de las imágenes (USGS). El modelo utilizado es el “6S” (Vermote *et al.*, 1997).

Con esta imagen de reflectividad se generó la fracción de Vegetación Fotosintética (VF), Vegetación No Fotosintética (VNF) y Superficie descubierta (S). Esto se logró utilizando las bibliotecas espectrales, propuestas en CLASlite, obtenidas, por un lado, de imágenes colectadas por el sensor hiperespectral Hyperion para el VF, y por otro lado, mediante espectrometría de campo donde se midió la reflectividad de la superficie en bandas de 2 nm desde los 400-2500nm, para el VNF y S. Posteriormente, se utilizó el método Monte Carlo – AutoMCU, con un enfoque probabilístico basado en las características físicas del dosel del bosque (Asner, 1998), siendo éste el núcleo central del análisis en CLASlite. El análisis desintegra cada píxel de la imagen en estas 3 fracciones que representan los porcentajes (0-100%) de cobertura de VF, VNF y S. Este sistema de combinación espectral se basa en la siguiente ecuación:

$$R_{pixel} = \sum (C_x x R_x) + \epsilon$$

Donde R_{pixel} es el valor de reflectividad del píxel; C es la fracción (0.0 a 1.0) de cada material de la superficie (x); R_x son las propiedades de reflectividad de cada material de la superficie; E, es el error.

CLASlite también enmascara las nubes y los cuerpos de agua, mediante la identificación de estas cubiertas en los metadatos y en el archivo de imagen de entrada. Luego utiliza un árbol de decisión para convertir los resultados del AutoMCU de la imagen de VF a estimados de cobertura de bosque, donde, $VF \geq 80$ es bosque y menor a este valor no bosque. Posteriormente, con las coberturas que contienen las fracciones de distintas cubiertas, CLASlite determina la deforestación, mediante la aplicación de una ecuación, donde los subíndices 0 y 1 indican los cambios de un año a otro (Asner *et al.*, 2009).

((VF0 > 60%) AND
((-100% < VF1-VF0 < -40%) and (VNF1-VNF0 > 4%))) OR
((VNF0 < 30% and S0 < 15%) and (VF1 ≤ 80% and VNF1 > 20% and S1 ≥ 0%) and
(VF1-VF0 < -9% and VNF1-VNF0 > 15% and S1-S0 > -99.9%))

3.4. Validación de resultados

Para realizar la validación de la cartografía de deforestación y así evaluar la correcta clasificación de las categorías, de bosque y no bosque, en las cartografías de 2007 y 2009, y de pérdida y no pérdida, en la cartografía de deforestación. Tal como se recomienda en otros estudios (Achard *et al.*, 2010; GOFC-GOLD, 2010), se emplearon imágenes de alta resolución de 5 y 10 m, del sensor Spot 5 y 4, respectivamente.

A partir de estas imágenes se obtuvieron un conjunto de datos de referencia, estableciendo 30 parcelas de 1.600 ha (3x3 km) (Cohen *et al.*, 1998). Estas se ubicaron, sistemáticamente, en el área de estudio, la zona muestreada representa el 25% del área total (Figura IV.2). En cada parcela se realizó una interpretación visual, en pantalla, con un área mínima cartográfica de 1 ha, generando dos grupos de datos con las categorías bosque y no bosque, para 2007 y 2009. Se aplicó una técnica de

detección de cambios mediante diferencias, para obtener un grupo de datos que permita realizar un análisis de la calidad temática en la cartografía de la deforestación.

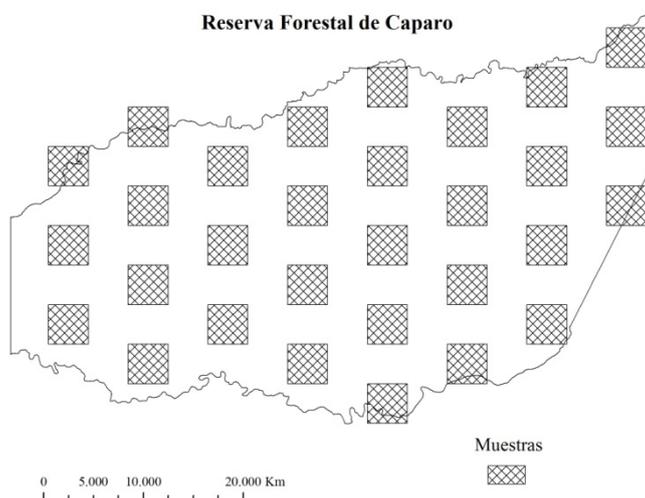


Figura IV.2. Ubicación de las parcelas de muestras en la Reserva Foresta de Caparo.

Considerando estos datos como la verdad terreno, se cuantificó de manera detallada la exactitud de las cartografías de 2007 y 2009, así como la cartografía de las pérdidas de bosque, obtenidas según las diferentes metodologías. Este análisis se centró en el cálculo de la matriz de confusión, a partir del cual se calcularon los errores de omisión y comisión, y el nivel de acierto global (Congalton and Green, 2009):

- ✓ Error de omisión: proporción de los cambios de los elementos omitidos.
- ✓ Error de comisión: proporción de la falsa detección de los elementos no cambiantes.
- ✓ Error de precisión global: de los elementos de cambios y no cambios que son correctamente clasificados por el método.

Asimismo, se obtuvo el estadístico Kappa (Cohen, 1960), que mide la precisión o acuerdo basado en la diferencia entre el error de la matriz y el acuerdo en los cambios (Rosenfield and Fitzpatrick-Lins, 1986).

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1,n} X_{jj} - \sum_{i=i,n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=i,n} X_{i+} X_{+i}}$$

Donde, n es el número total de casos, X_{ij} se refiere al acuerdo observado y X_{i+} y X_{+j} son los marginales de cada categoría.

Adicionalmente, para corroborar si la categoría de las pérdidas estaba correctamente clasificada se realizó un análisis no localizado espacialmente. Para ello se estableció una comparación de la proporción de las áreas totales de la categoría de pérdidas y la cartografía de verdad terreno. Estas proporciones se obtuvieron del porcentaje de área que ocuparon dentro de cada una de las 30 parcelas muestrales utilizadas anteriormente. Los datos de exactitud y precisión se calcularon a través de la línea de regresión que relaciona los valores, y el coeficiente de correlación asociado.

4. RESULTADOS

4.1. Mejoramiento espectral y segmentación de imágenes

Las técnicas de mejoramiento espectral aplicadas a las imágenes de 2007 y 2009 y la posterior segmentación nos permitieron discriminar con mayor facilidad las cubiertas de bosque – no bosque en la zona de estudio. En la figura 3 se observa una serie de imágenes que pertenecen a un sector del extremo oeste de la RFC, en éste se encuentra un lote de bosque de 7.000 ha, correspondiente a la estación experimental de Caparo, área concedida para fines científicos, a la Universidad de Los Andes. Las imágenes 3a y 3b corresponden a una composición en falso color (453) de 2007 y 2009 respectivamente. La imagen muestra los procesos de pérdida del bosque entre estas dos fechas, tal es el caso del límite inferior y superior derecho de la estación experimental. Asimismo, se observa, en la composición de 2007, una serie de humedales en el centro de la imagen, en tono azul intenso que han desaparecido en la composición de 2009. Por otro lado, se muestra en las figuras 3c y 3d, las imágenes de fracción de Suelo (S), obtenidas con el método PRODES, en las fechas 2007 y 2009, y la fracción de Vegetación Fotosintética (VF) obtenida con el método CLASlite, figuras 3e y 3f. En estas imágenes se puede observar el contraste del bosque frente a otras categorías, siendo más notable en las imágenes de fracción S que en las imágenes VF. Sin embargo, en la imagen de fracción S se confunden, los humedales con el bosque, tal y como se observa en el centro de la imagen 3c, mientras que en la imagen VF (3e) esta confusión no es tan evidente.

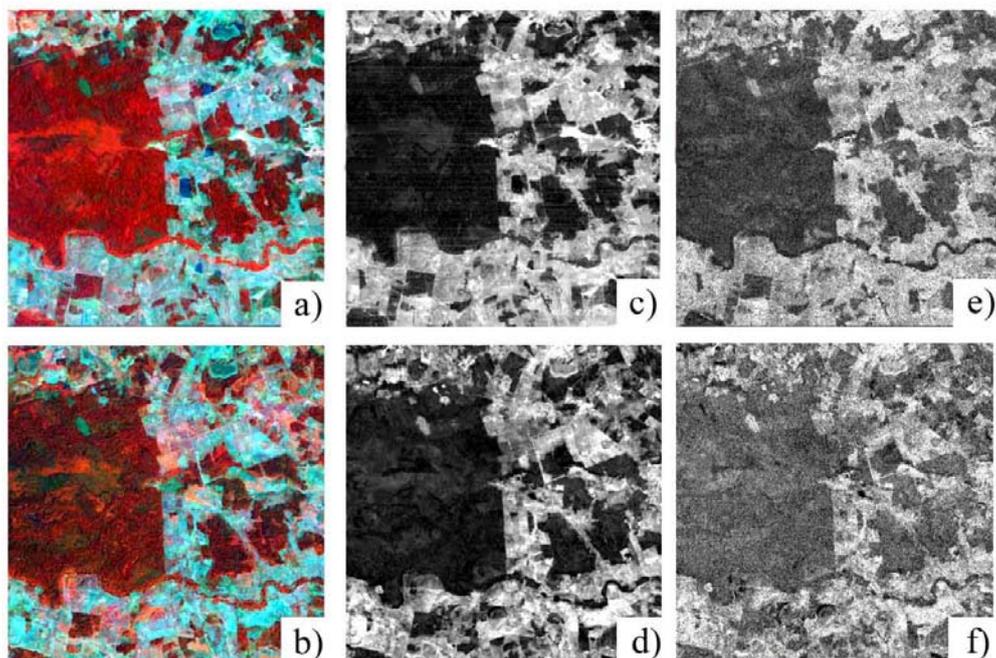


Figura IV.3. Composición en falso color (453) del extremo oeste del área de estudio (a) 2007 y (b) 2009, imagen de fracción de Suelo (c) 2007 y (d) 2009 y Vegetación Fotosintética (e) 2007 y (f) 2009.

En la figura 4 se muestran diferentes composiciones en color realizadas a partir de la fracción de vegetación, suelo y sombras en el caso del método PRODES y la fracción de VF, VNF y S, según el método CLASlite, para las distintas fechas analizadas. La figura IV.4a (2007) y IV.4b (2009) se corresponden con las imágenes obtenidas a partir del método PRODES. En tono verde claro se observan los bosques, en tono rosado los suelos con vegetación de herbáceas y en azul claro los matorrales y humedales. En las imágenes resultantes del método CLASlite, (figuras IV.4c -2007- y IV.4d - 2009-), se acentúan ligeramente más los tipos de coberturas del suelo, donde se observan en color verde intenso los bosques, en azul claro la vegetación de matorrales secos, en tonos rosados los suelos cubiertos de herbazales y en amarillo (principalmente en la figura IV.4d) las zonas con gran contraste de sustratos desnudos con vegetación alta, perturbada estacionalmente por el agua.

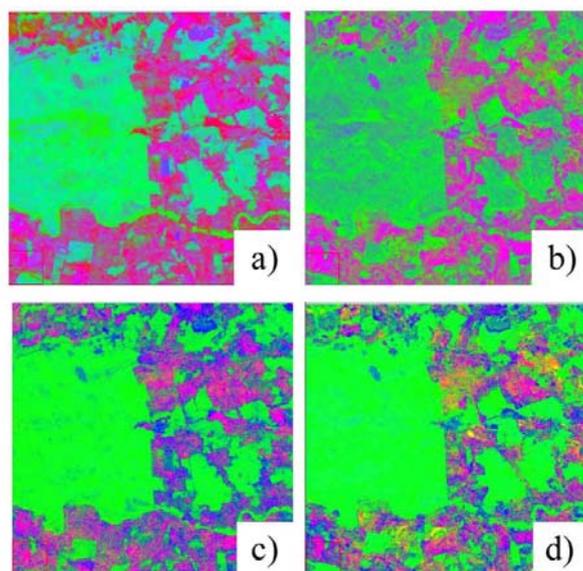


Figura IV.4. Composición RGB (Suelo, Vegetación, Sombra) para PRODES 2007 (a) y 2009 (b) y RGB (Vegetación Fotosintética, Vegetación No Fotosintética y Superficie descubierta) para CLASlite 2007 (c) y 2009 (d).

En la figura IV.5 se muestran los resultados de la segmentación realizada con el método PRODES y FRA RSS - TREES 3. En las figuras 5a y 5b se observa la segmentación original de PRODES y la 5c y 5d la segunda segmentación de nivel L1 de FRA RSS - TREES 3, ambas realizada con un área mínima de 1 ha. Por su parte, las figuras 5e (2007) y 5f (2009), muestran los resultados de la unión de los objetos del estrato de la segmentación multitemporal de FRA RSS - TREES 3, obtenidos mediante los umbrales de las medias y las desviaciones estándar para las bandas de 2007 y 2009, tras este proceso se observa claramente la separación de las categorías de bosque - no bosque.

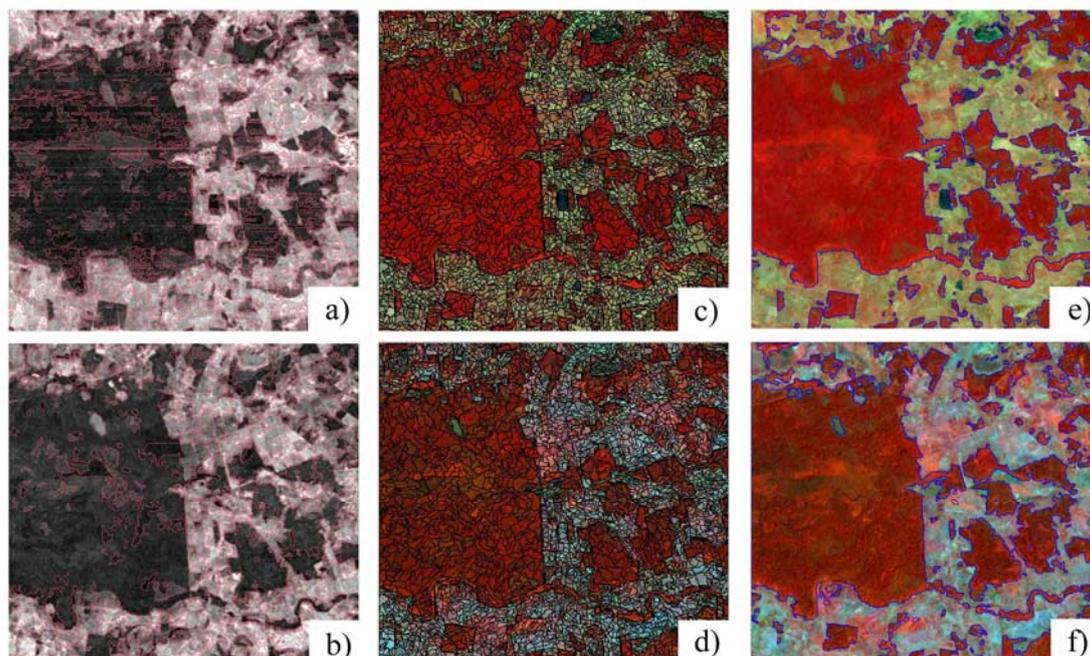


Figura IV.5. Segmentación: Fracción Suelo 2007 (5a) y 2009 (5b), de la imagen multitemporal sobre la composición 453 2007 (5c) y 2009 (5d), y unión de los segmentos de bosque - no bosque de 2007 (5e) y 2009 (5f).

4.2. Cartografía de bosque – no bosque y deforestación

Una vez se dispuso de las imágenes resultantes de la aplicación de las distintas metodologías se estuvo en disposición de cartografiar las cubiertas de interés. En la figura 6, se ilustra la cartografía de bosque – no bosque en 2007 y 2009 obtenidos a través de las diferentes metodologías. Se observa como las superficies obtenidas aplicando clasificadores de contexto, PRODES (IV.6a y IV.6b) y FRA RSS – TREES 3 (IV.6e y IV.6f), poseen una delineación de los bosques más precisa y sin ruido. Por su parte, las otras dos metodologías FSI (IV.6c y IV.6d) y CLASlite (IV.6g y IV.6h), obtenidas con el método ISODATA de clasificación y árbol de decisión, respectivamente, ofrecen mayor ruido dentro de las formaciones de bosques (6d) o fuera de los bosques como el observado de manera dispersa en las figuras IV.6g y IV.6h.

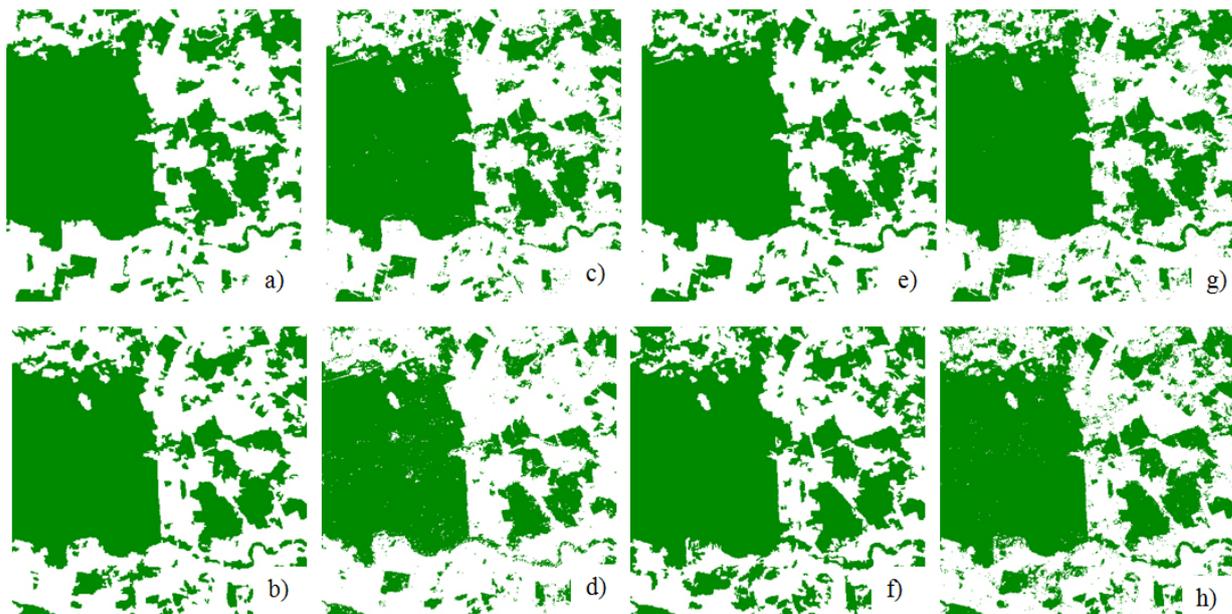


Figura IV.6. Bosques obtenidos mediante PRODES (a y b), FSI (c y d), FRA RSS - TRESS 3 (e y f) y CLASlite (g y h), respectivamente, para los años 2007 y 2009.

Respecto a la deforestación la figura IV.7 muestra la cartografía obtenida mediante las distintas metodologías. Se observa, nuevamente, el efecto de sal y pimienta en la cartografía derivada de los métodos que utilizan clasificadores de pixel como el FSI (IV.7b) y el CLASlite (IV.7d), mientras que en las que se utilizaron los clasificadores orientados a objeto no se detecta dicho efecto PRODES (IV.7a) y el FRA RSS - TREES 3 (IV.7c).

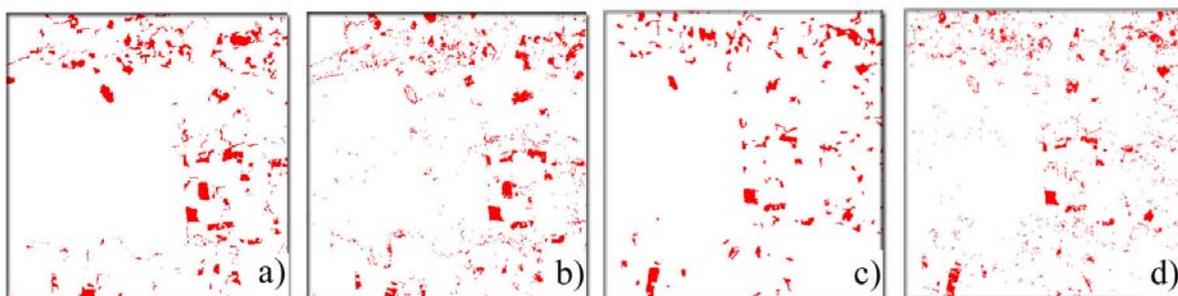


Figura IV.7. Pérdida del bosque (rojo) con PRODES (a), FSI (b),- FRA RSS - TREES 3 (c) y CLASlite (d).

4.3. Validación de la cartografía de bosque – no bosque y deforestación. A partir de la matriz de confusión.

Como se comentó anteriormente la validación de los resultados cartográficos obtenidos se llevó a cabo a partir de imágenes de alta resolución. En la figura IV.8, se pueden observar los datos de precisión global y el índice kappa para cada una de las cartografías de la cubierta forestal generadas en los años 2007 y 2009, así como la cartografía de deforestación, según las diferentes metodologías empleadas. Los gráficos muestran que la PG de la cartografía de bosque en 2007 y 2009 variaron entre 83,91% para FSI y 86,43 % para FRA-TREES 3 en 2007 y 85,03 para FSI y 86,91% para FRA RSS – TREES 3 en 2009. Asimismo, el índice kappa, varió entre 0,66 para FSI y 0,72 para FRA TREES 3 en 2007 y 0,67 para FSI y 0,72 para FRA RSS – TREES 3 en 2009. Por su parte, los resultados de la cartografía de deforestación fueron diferentes a los anteriores, ya que la PG varió entre 86,00% para el FSI y 88,82 % para PRODES, mientras que los índices kappa bajaron, considerablemente, con respecto a los mapas de bosque de 2007 y 2009, los cuales ofreciendo valores entre 0,26 para CLASlite y 0,32 para PRODES.

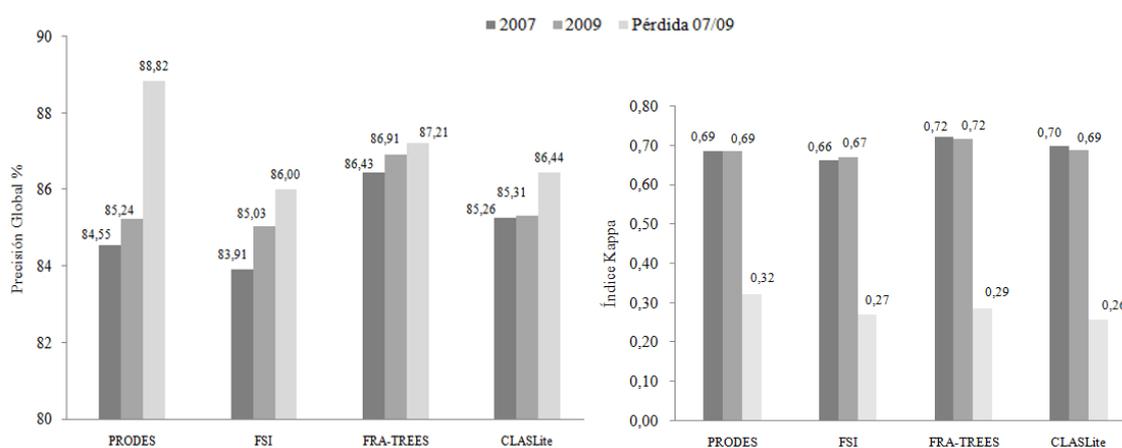


Figura IV.8. Precisión global e índice kappa de la cartografía de bosques en 2007, 2009 y de pérdida del bosque.

En la figura IV.9, se muestra el grado de ajuste de las clasificaciones realizadas para obtener la cartografía de bosque – no bosque en 2007, 2009 y en la cartografía de deforestación. En el gráfico se puede observar que los errores del usuario (comisión) para la categoría bosque de la cartografía de 2007, variaron entre 13,06% para FRA

RSS – TREES 3 hasta 17,13% para PRODES, y para la cartografía de 2009 entre 11,82% para FSI y 18,62% para CLASlite. Por su parte los errores del productor (omisión) para esta categoría de bosque, fueron superiores a los errores de comisión y omisión de la categoría no bosque, para la cartografía de 2007 y 2009. Estos errores oscilan entre el 18,68% para PRODES y el 25,48% para FSI, en la cartografía de 2007, mientras que para la cartografía de 2009, variaron entre 19,96% para CLASlite y 29,73% para FSI.

Por otro lado, la cartografía de deforestación ofrece errores elevados tanto del usuario como del productor en la clase de pérdidas. Así se tienen errores de comisión en esta categoría que varían entre 57,93% para FRA RSS – TREES 3 y 69,39% en PRODES, mientras que los de omisión en la misma categoría de pérdida oscilan entre 50,22% para PRODES y 70,72% de CLASlite. Por su parte los errores de la categoría no pérdida son muy bajos en comparación con los anteriores, así se obtienen errores de comisión desde 3,87% para PRODES hasta 8,89% para CLASlite, mientras que los de omisión varían entre 5,45% para FRA RSS – TREES 3 y 8,30% para PRODES. La diferencia entre los valores de los errores de comisión y omisión en estas dos categorías, está influenciada por la gran cantidad de superficie de la categoría no pérdida con respecto a la categoría de pérdida.

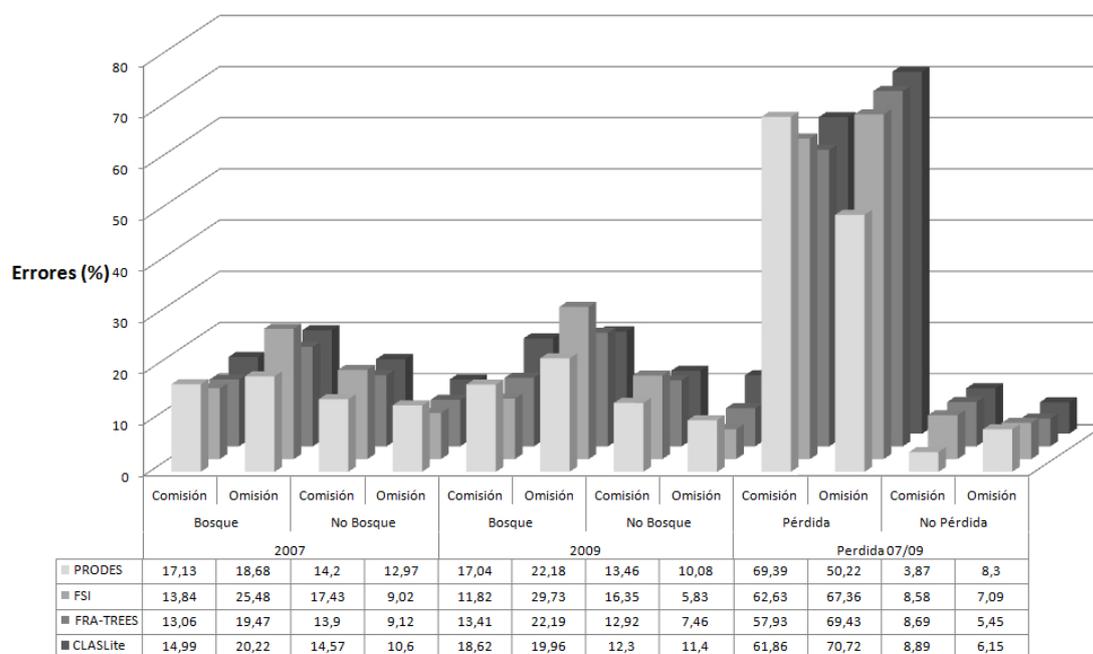


Figura IV.9. Errores de comisión y omisión, para bosque y no bosque de la cartografía 2007 y 2009, y para pérdida y no pérdida de la cartografía de deforestación entre 2007 y 2009.

4.4. Validación de la cartografía de deforestación a partir de técnicas de regresión

En la figura IV.10 se observan los resultados del análisis de regresión lineal efectuados con los datos de deforestación del bosque. Estos gráficos muestran la dispersión entre los porcentajes de pérdidas -verdad terreno- (eje X) y de la cartografía de pérdidas obtenida a partir de las diferentes metodologías (eje Y).

Los resultados de la metodología PRODES se ajustaron mejor a los perímetros de las pérdidas de bosques obtenidos con las imágenes SPOT y utilizados en la validación, ofreciendo el valor más alto del coeficiente de determinación con 0,4883 y la pendiente más cercana a la diagonal con 0,9628. A continuación, ofrecen mejores resultados la cartografía obtenida con la metodología FSI con un coeficiente de determinación de 0,4624 y una pendiente de 0,8673, seguido de la metodología CLASlite y FRA RSS – TREES 3, con un parámetro de determinación de 0,5205 y 0,402, y una pendiente de 0,7129 y 0,7053 respectivamente.

Estos resultados se interpretan más adecuadamente observando la distribución de los puntos en el gráfico de dispersión. En este sentido, se puede detallar que los puntos de la cartografía con PRODES son los que más se ajustaron a la diagonal (línea punteada), seguidos de CLASlite y FRA RSS – TREES 3 y FSI. Sus rectas de regresión demuestran una tendencia hacia la infra-estimación, excepto en el caso del FSI donde la tendencia es hacia la sobre-estimación. De igual manera, este ajuste se evidencia en la escala de los valores porcentuales de las pérdidas en cada eje, que para PRODES coincidió con la de verdad terreno con 25, mientras que para CLASlite y FRA RSS – TREES 3 y FSI fue de 20.

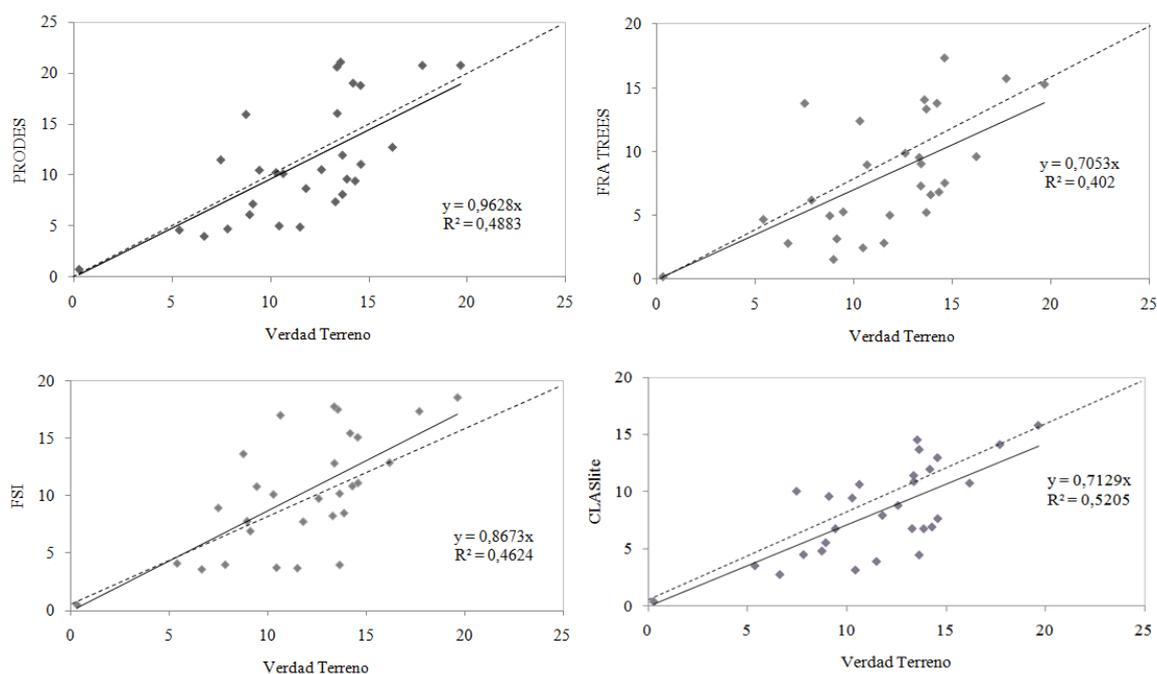


Figura IV.10. Regresión lineal entre los datos porcentuales de la validación (imágenes SPOT) y la cartografía de deforestación según los distintos métodos.

5. DISCUSIÓN

A pesar de que las correcciones atmosféricas son importantes para corregir los valores de reflectividad de la imagen y así, mejorar la extracción de información de éstas, en las metodologías evaluadas, no se consideran como esenciales, salvo en la metodología de CLASlite, paso previo a la aplicación del análisis de Monte Carlo – Auto MCU.

La fracción de Suelo y Vegetación Fotosintética utilizada por PRODES y CLASlite respectivamente, ofrecen un gran contraste entre las coberturas de bosque y las otras categorías presentes en el terreno, lo que permite discriminar con mayor facilidad esta categoría. Sin embargo, se detectó que estas cubiertas son confundidas con los humedales presentes en los ambientes tropicales, ya que su respuesta espectral es muy parecida a los bosques, esto afecta a los procesos de asignación de clases utilizados por estas metodologías.

Las composiciones RGB de las fracciones de PRODES y CLASlite, pueden ser utilizadas para realizar un primer diagnóstico de la situación del bosque, a través de la interpretación visual de las mismas.

Con respecto a la segmentación aplicada en las metodologías PRODES y FRA RSS – TREES 3, para realizar posteriormente la asignación de clases de manera no supervisada y supervisada, respectivamente se ha observado que ambas dieron buenos resultados, utilizando los parámetros asignados por cada metodología. Sin embargo, el método FRA RSS – TREES 3, tiene la flexibilidad de ajustar más la segmentación a la realidad local, mediante el proceso interactivo de determinación de umbrales a partir de la media y desviación estándar de los objetos.

Tanto en la cartografía de bosque de 2007 y 2009, como en la cartografía de deforestación, se observa el efecto de los clasificadores utilizados, tal fue el caso de las metodologías PRODES y FRA RSS – TREES 3, que utilizaron clasificadores orientados a objeto. Estos generaron una cartografía libre del efecto “sal y pimienta”, que se da por la variación aleatoria de la respuesta del sensor y por la característica intrínseca de la cobertura del suelo (Lobo, 1997). Este efecto es el principal inconveniente de los clasificadores basados en píxeles (Desclée *et al.*, 2006), como el ISODATA utilizado por el FSI o el árbol de decisión utilizado por CLASlite.

En la cartografía de bosque para 2007 y 2009 se obtuvieron precisiones globales superiores al 80%. Estos resultados están dentro de los límites establecidos (80 a 95%) por los científicos para diferenciar las categorías de bosque y no bosque y posteriormente, evaluar los cambios de éstos (GOFC-GOLD, 2010). Por su parte, los resultados del índice kappa según Landis y Koch (1977), ofrecen un grado de acuerdo sustancial, ya que sus valores oscilan entre 0,61 – 0,80. Con respecto al grado de ajuste con los datos de validación, los mayores errores son de omisión, tanto para la cartografía de bosque – no bosque de 2007 como en la de 2009.

Por su parte, la cartografía de pérdidas del bosque, presentaron precisiones globales entre 86,00% y 88,82%, mientras que el grado de acuerdo medido a través del índice kappa varió entre 0,26 hasta 0,32 (acuerdo justo según Landis y Koch (1977)). Estos valores están influenciados por el gran número de píxeles clasificados correctamente en la categoría de no pérdida. Es por ello, que para este caso, la precisión global de las áreas de pérdidas, no es una medida estadísticamente significativa, del nivel de exactitud de la clasificación.

Para buscar otro parámetro de fiabilidad que demuestre cual de las cartografías de deforestación, clasificó correctamente la categoría pérdida, se realizó un análisis de regresión lineal. Esta técnica presenta un grado moderado de localización espacial, ya que compara los valores de área deforestada por celda, pero no brinda información sobre la coincidencia en el espacio de ambas cartografía. Este análisis mostró que los mejores ajustes se obtuvieron con el método PRODES, seguido de FSI, CLASlite y FRA RSS – TREES 3.

Los valores de fiabilidad de la cartografía de bosque - bosque en 2007 y 2009 y los de deforestación del bosque, fueron inferiores a los reportados por las mismas metodologías cuando se aplicaron en sus respectivas áreas de trabajo. Tal fue el caso, del método FSI que ofrece valores de fiabilidad global del 92% (FSI, 2009) cuando se ha aplicado en distintas regiones de la India. Por su parte, el método CLASlite, ha sido aplicado en bosques de Hawái (Estados Unidos), en la Amazonía Peruana y en Borneo (Indonesia), ofreciendo valores de fiabilidad global de 97,5%, 97-87% y de 96% respectivamente (Asner *et al.*, 2009). El método utilizado en el proyecto FRA RSS – TREES 3 ha obtenido valores de precisión global > 90% con índices Kappa > 0,8 en los bosques del este de Bélgica (Desclée *et al.*, 2006) y en los bosques de la cuenca del río Congo precisiones > 91% (Duveiller *et al.*, 2008). Esto es debido, principalmente, a que a medida que el paisaje evaluado es más complejo, los valores de fiabilidad van siendo menores (Desclée *et al.*, 2006), en nuestro caso el paisaje evaluado posee una alta dinámica de pérdida del bosque, los cuales se encuentran en su mayoría fragmentados.

6. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación fue el análisis comparativo de los métodos que actualmente se utilizan para el monitoreo de la deforestación, a nivel nacional, regional y global. Este análisis se realizó con la finalidad de conocer cuál de las metodologías se adapta mejor a los ambientes tropicales de Venezuela, de cara a realizar una evaluación de la pérdida de la cobertura del bosque y así ayudar a reducir las incertidumbres en las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (Eva *et al.*, 2010), para de esta manera, dar cumplimiento a lo establecido por el IPCC.

Para ello, por un lado, se seleccionó la RFC, un área de bosques tropicales de tierra baja, con una alta dinámica de procesos de pérdida de los mismos, que han sido reemplazados, en su mayoría, por pastizales. Y por otro lado, se aplicaron las metodologías con los parámetros originales. Esto trajo como consecuencia que su evaluación fuese compleja, tanto para la cartografía de bosque – no bosque de 2007 y 2009 como para la de deforestación.

Sin embargo, a pesar de estos inconvenientes, se diferenciaron los métodos evaluados. Así se tiene que la cartografía de bosque de 2007 y 2009, fue mejor clasificada por la metodología FRA RSS – TREES 3, seguida por el método CLASlite, PRODES y FSI. Por su parte, para la cartografía de deforestación, tanto en los resultados generados de la matriz de confusión, como los de la regresión lineal, el método PRODES ofreció valores ligeramente superiores a las demás. Se observa por otro lado, que algunas metodologías con buenos resultados en la validación con la matriz de confusión no presentaron la misma tendencia en el análisis de regresión (Congalton, 2001), así se evidenció en la metodología FRA RSS – TREES 3 que obtuvo ajustes aceptables en el primer análisis pero no en el análisis de regresión.

Por otro lado, sería interesante probar estas metodologías en otros ambientes venezolanos, como en la región montañosa de los Andes, las costas del centro y norte del país, ó en las regiones amazónicas de los estados de Amazonas y Bolívar, ya que son espacios que según un estudio anterior (Pacheco *et al.*, en revisión Capítulo III) sufren una alta tasa de cambio. Sin embargo, para hacer uso óptimo de las metodologías evaluadas, es necesario contar con personas conocedoras de los bosques, así como realizar chequeos en campo para mejorar y garantizar la calidad de los resultados que de éstas se generen.

Los resultados de las metodologías utilizadas se podrían mejorar, mediante la adaptación de sus parámetros al área de estudio. Tal es el caso, de la metodología CLASlite donde se puede adaptar mejor el umbral utilizado en el árbol de decisión para separar la categoría de bosque y no bosque, ó de los parámetros de agrupación de datos, con el mínimo de similitud y el valor área mínima, para el proceso de segmentación, en la metodología PRODES. Esto mejoraría la cartografía de bosque – no bosque y por defecto la cartografía de deforestación.

7. Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la tesis doctoral del autor C. Pacheco desarrollada durante su estancia en el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá. Nos gustaría agradecer al Laboratorio de Procesamiento Avanzado de Imágenes de Satélite (LPAIS) de Venezuela, las facilidades ofrecidas para utilizar las imágenes SPOT. Asimismo al equipo CLASlite del Departamento de Ecología Global de la Institución Carnegie para la Ciencia por proporcionar el programa CLASlite. El desarrollo del mismo ha sido posible gracias al soporte de la Fundación Gordon y Betty Moore, la Fundación John D. y Catherine T. MacArthur y el fondo de la Institución Carnegie para la Ciencia.

8. Referencias

- Achard, F., Eva, H.D., Glinni, 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. Joint Research Center EC, Ispra, Italy, p. 99.
- 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.
- Asner, G.P., 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64, 234-253.
- Asner, G.P., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M., Knapp, D.E., Silva, J.N.M., 2006. Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 12947-12950.
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Balaji, A., Paez-Acosta, G., 2009. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. SPIE.
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M., Silva, J.N., 2005a. Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Science* 310, 480-482.
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Cooper, A.N., Bustamante, M.M.C., Olander, L.P., 2005b. Ecosystem Structure throughout the Brazilian Amazon from Landsat Observations and Automated Spectral Unmixing. *Earth Interactions* 9, 1-31.
- Asner, G.P., Powell, G.V.N., Mascaro, J., Knapp, D.E., Clark, J.K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., Hughes, R.F., 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 16738-16742.
- Baatz, M., Schape, A., 2000. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In. Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G., Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 12-23.

- Baker, D.J., Richards, G., Grainger, A., Gonzalez, P., Brown, S., DeFries, R., Held, A., Kellndorfer, J., Ndunda, P., Ojima, D., Skrovseth, P.-E., Souza Jr, C., Stolle, F., 2010. Achieving forest carbon information with higher certainty: A five-part plan. *Environmental Science & Policy* 13, 249-260.
- Bins, S.A., Fonseca, L.M.G., Erthal, G.J., Li, M., 1993. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In, *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, Salvador, Brazil.
- Bontemps, S., Defourny, P., van Bogaert, E., 2010. GlobCover 2009 Products description and validation report. In, *European Space Agency (ESA) & The Université Catholique de Louvain, Belgium*.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 1996. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20, 395-403.
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20, 37-46.
- Cohen, W., Fiorella, M., Gray, J., Helmer, E., Anderson, K., 1998. An efficient and accurate method for mapping forest clearcuts in the Pacific Northwest using Landsat imagery. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Bethesda, MD, ETATS-UNIS.
- Congalton, R., Green, K., 2009. *Assesing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices*. Taylor and Francis Group, London, New York, CRC Press, .
- Denman, K., Brasseur, G., 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. In. Cambridge University Cambridge Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Desclée, B., Bogaert, P., Defourny, P., 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment* 102, 1-11.
- Duveiller, G., Defourny, P., Desclée, B., Mayaux, P., 2008. Deforestation in Central Africa: Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts. *Remote Sensing of Environment* 112, 1969-1981.
- Eva, H., Carboni, S., Achard, F., Stach, N., Durieux, L., Faure, J.-F., Mollicone, D., 2010. Monitoring forest areas from continental to territorial levels using a sample of medium spatial resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 191-197.
- FAO, 2009. The FRA 2010 Remote Sensing Survey, an outline of objectives, data, methods and approach. In: *Programme, F.R.A. (Ed.)*, Rome, Italy, p. 16.
- FSI, 2009. *State of Forest Report 2009*. . In. Ministry of Environment and Forests, Government of India, Dehradun, India, p. 226.
- GOFC-GOLD, 2010. A sourcebook of methods 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 forestation. In, *GOFC-GOLD Report version COP16-1*. GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
- Houghton, R., 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11, 945-958.
- INPE-DPI, 1999. *Manual do usuario do SPRING: verso 3.4*. . In, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais., Brazil.
- INPE, 2010. *Monitoring of the Brazilian Amazonian: Projeto PRODES* In, <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>, Brazil.

- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). In, p. 632.
- Landis, J.R., 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., Scholes, R.J., 2005. A Synthesis of Information on Rapid Land-cover Change for the Period 1981–2000. *BioScience* 55, 115-124.
- Lobo, A., 1997. Image segmentation and discriminant analysis for the identification of land cover units in ecology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 1136–1145.
- López, J., Pernía, E., Pozzobon, E., 1996. Avance de las deforestaciones en la reserva forestal Caparo, Estado Barinas, Venezuela, entre 1987 y 1994. *Revista Forestal Venezolana* 40, 29-36.
- Maldonado, H., 2009. Análisis de la Deforestación en la Reserva Forestal Caparo-Venezuela, Periodos 1987-1994, 1994-2007 y 1987-2007. In, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes, Mérida. Venezuela, p. 190.
- Morton, D.C., DeFries, R.S., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Del Bon Espirito-Santo, F., Hansen, M., Carroll, M., 2005. Rapid Assessment of Annual Deforestation in the Brazilian Amazon Using MODIS Data. *Earth Interactions* 9, 1-22.
- Oliveira, P.J.C., Asner, G.P., Knapp, D.E., Almeyda, A., Galván-Gildemeister, R., Keene, S., Raybin, R.F., Smith, R.C., 2007. Land-Use Allocation Protects the Peruvian Amazon. *Science* 317, 1233-1236.
- Pacheco, C., Mollicone, D., Aguado, I., en revisión Capítulo III. Identification and characterization of deforestation hot spot areas in Venezuela from satellite images and expert opinion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- 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.
- 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., Turner, 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, Berlín, pp. 9 - 40.
- Rosenfield, G.H., Fitzpatrick-Lins, A., 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52, 223-227.
- Sanhueza, E., 2011. Acuerdo de Cancún: un fracaso vitoreado. *Interciencia* 36, 2.
- Shimabukuro, Y.E., Smith, J.A., 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 29, 16-20.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et, a., 2007. Technical summary. 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*. In: Press, C.U. (Ed.), Cambridge, UK.
- UNFCCC, 2001. COP-7: The Marrakech accords. In: Secretariat, U. (Ed.), Bonn, Germany, p. 245.
- van der Werf, G.R., Morton, D.C., DeFries, R.S., Olivier, J.G.J., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., Collatz, G.J., Randerson, J.T., 2009. CO2 emissions from forest loss. *Nature Geosci* 2, 737-738.

Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J., Herman, M., Morcrette, J., 1997. Second simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S : An overview. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, ETATS-UNIS.

Capítulo V. Estimación de las emisiones de CO₂ procedentes de la deforestación y degradación del bosque en la reserva forestal de Caparo, Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+

Publicación derivada:

Pacheco, C., Emilio Vilanova, E., Aguado, I. (en preparación). Estimación de las emisiones de CO₂ procedentes de la deforestación y degradación del bosque en la reserva forestal de Caparo, Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+

Resumen

Esta investigación presenta por primera vez en Venezuela, un análisis de la deforestación y degradación del bosque, en forma conjunta, estimando además, la cantidad de emisiones de CO₂ derivadas de ambos procesos. El período de estudio abarca las dos últimas décadas 1990-2000 y 2000-2010. El estudio se realiza siguiendo la metodología propuesta por el IPCC con la finalidad de proponer el establecimiento de estrategias REDD+, en el marco de la UNFCCC. Para ello se ha seleccionado la Reserva Forestal de Caparo, área emblemática de los Llanos Occidentales venezolanos, considerada un área hotspot de deforestación en los últimos años. La metodología seguida combina un análisis espacial y multitemporal con imágenes Landsat, junto con la utilización de datos de campo sobre la biomasa aérea almacenada en el bosque, a partir de parcelas permanentes monitoreadas durante el período de estudio. Los resultados muestran una deforestación y una degradación del bosque de 50.300 ha y 4.035 ha respectivamente, entre 1990-2000 y de 28.409 ha y 1.069 ha entre 2000-2010. La tasa media anual de deforestación fue de -3,7% (1990-2000) y -3,4% (2000-2010), superior a la media anual nacional (-0,57 y -0,61). Las estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en la vegetación coinciden con los resultados encontrados para otros bosques estacionales tropicales con un promedio de $163,58 \pm 10,71$ t/ha ($81,79 \pm 5,36$ t C/ha). Tanto la deforestación como la degradación del bosque generaron emisiones equivalentes de CO₂ de 1,67 Mt CO₂ año para 1990-2000, y de 0,93 Mt CO₂ año para 2000-2010. En el período 1990-2000, el 92,8% de las emisiones en esta área, correspondieron a la deforestación y el 7,2% a la degradación del bosque. Entre los años 2000 y 2010 la deforestación contribuyó con un 96,4% a las emisiones en esta región. Tomando como base el año 2000, y de acuerdo con los datos disponibles, a nivel nacional, la deforestación y la degradación de los bosques en Caparo, representan alrededor del 3,62% de las emisiones de deforestación, a escala nacional. Para finalizar, se aportan algunas recomendaciones para el uso de la información generada en este trabajo como base para el establecimiento de una potencial estrategia REDD+ en la zona.

Palabras claves: Deforestación, degradación del bosque, Carbono, Emisiones de CO₂, REDD+, Cambio climático, Venezuela.

Abstract

This research shows, for the first in Venezuela, an analysis of deforestation and forest degradation together, also estimating the amount of CO₂ emissions derived from the two processes. The research period covers the last two decades 1990-2000 and 2000-2010. The study was carried out using the methodology proposed by the IPCC with the purpose of establishing REDD+ strategies in the UNFCCC framework. For this goal the Forest Reservation of Caparo, an emblematic area of the Venezuelan 'Llanos Occidentales' considered a deforestation hotspot in the last years, was selected. The methodology used combines multi-temporal and spatial analysis of Landsat imagery with aerial biomass stored in forests data obtained from sampling plots permanently monitored throughout the study period. The results show deforestation and forest degradation up to 50.300 ha and 4.035 respectively, for the 1990-2000 decade and 28.409 ha and 1.069 ha for the 2000-2010 decade. The annual rate of deforestation was 3,7% (1990-2000) and 3,4% (2000-2010), higher than the annual average of the country (-0,57% and -0,61%). The areal biomass and stored carbon estimations for the vegetation match with the results found in other seasonal tropical forests (comprueba esto Carlos no estoy seguro) with an average of $163,58 \pm 10,71$ t/ha ($81,79 \pm 5,36$ t C/ha). Both deforestation and forest degradation generated equivalent CO₂ emissions of 1,67 Mt CO₂ per year for the 1990-2000 decade, and 0,93 MT CO₂ per year for the 2000-2010 decade. Almost 92,8% of the emissions from 1990-2000 corresponded to deforestation and 7,2% to forest degradation. For the 2000-2010 period deforestation contributed with the 96,4% of the emissions. Taking year 2000 as a basis, and according to the available data, deforestation and degradation of Caparo's forests represent around 3,62% of the deforestation caused emissions at national level. To conclude some recommendations are made for anyone who wants to use the data generated during this study as a foundation for the implementation of potential REDD+ strategies in the area.

Key words: Deforestation, forest degradation, carbon, CO₂ emissions, REDD+, Climate Change, Venezuela.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales abarcan una superficie cercana a los 19,6 millones de km² (Asner, 2009) y comprenden alrededor del 50% del área forestal mundial. Representan epicentros de biodiversidad y ecosistemas con una importancia clave en el sistema climático global. A pesar de esto, la velocidad con la que son eliminados, a través del cambio del uso de la tierra para diferentes fines es preocupante. Aunque se reconoce una reducción en la tasa de deforestación en años recientes, se estima que entre 5 y 8 millones de ha fueron deforestadas anualmente, durante la década 2000-2010 (FAO, 2011) en su mayoría en la región tropical. Las causas son diversas, pero la obtención de tierras para la expansión agrícola y pecuaria, es la más importante (Geist and Lambin, 2002; Rudel *et al.*, 2009; DeFries *et al.*, 2010; Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I).

La pérdida de la biodiversidad es la consecuencia más destacada en la mayoría de la literatura revisada sobre la deforestación en los bosques tropicales. Sin embargo, es en estos ecosistemas donde se almacena la mayor cantidad de carbono en la vegetación, a escala global, con una biomasa aérea que promedia cerca de 300 a 600 Mg de carbono ha⁻¹, valores muy superiores a otros bosques en el mundo (Brown, 1997; Malhi *et al.*, 1999). En consecuencia, la deforestación de los bosques tropicales ha comenzado a ser considerada por la comunidad científica internacional del cambio climático como un factor de mucha importancia en el ciclo global del carbono (Achard *et al.*, 2010). Por un lado, estos ecosistemas, dependiendo de numerosos factores, funcionan como importantes sumideros, capturando cerca del 15% de las emisiones antrópicas de carbono a escala global (Trummer *et al.*, 2009). Por otro lado, cerca de 1,6 billones de toneladas de carbono son emitidas a partir de la deforestación, añadiendo a la atmósfera una cantidad de carbono equivalente a casi el 10-20% del total de las emisiones globales (IPCC, 2007; Houghton, 2010; Kanninen *et al.*, 2010). Esta deforestación viene acompañada inicialmente de procesos de degradación del bosque, que pueden ser originados por las actividades de una explotación forestal selectiva (caminos forestales, patios de acopio, la caídas de árboles, etc), los incendios forestales ó una sobreexplotación de leña u otros usos locales de la madera (GOFC-GOLD, 2010).

A pesar de que la deforestación tropical produce más pérdida de reserva de carbono por unidad de superficie que los procesos de degradación de los bosques, que tan solo producen reducción de carbono (Achard *et al.*, 2010; Asner *et al.*, 2010), ambos procesos han sido abordados dentro del marco de la UNFCCC (*United Nations Frameworks Convention on Climate Change*). Desde 2005, en la COP-11 (11^a *Conference of Parties*), celebrada en Montreal, se puso en marcha un mecanismo para investigar los elementos técnicos capaces de reducir estas emisiones, originando para los países en vías de desarrollo, el programa REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and Degradation*). Posteriormente, en la COP-15, celebrada en Copenhague (2009), se discutieron los elementos metodológicos del mecanismo para dar inicio a las iniciativas REDD+ (FCCC/CP/2009/11/Add.1, 2009), con apoyo financiero por parte de los países desarrollados. En la última COP-16, celebrada en Cancún (2010), se incluyeron nuevos enfoques políticos para gestionar lo relativo a la reducción de las emisiones, considerando el papel fundamental de la conservación, gestión sostenible de los bosques y el aumento de las existencias del carbono forestal en los países en desarrollo (Draft/decision/CP.16, 2010).

El principio es sencillo: aquellos países que estén dispuestos a reducir emisiones producidas por deforestación y degradación deberían ser compensados económicamente. No obstante, los países en desarrollo que estén dispuestos a participar en este mecanismo de mitigación REDD+ en el marco de la UNFCCC deberán establecer un sólido y transparente sistema de vigilancia del bosque, como parte de un sistema nacional de monitoreo, conforme a lo acordado por la Conferencia de las Partes. Sin embargo, en la actualidad no existe una visión clara sobre cómo abordar esta temática desde el punto de vista científico y metodológico (Maniatis and Mollicone, 2010). Es por ello que, cualquier país que quiera realizar un inventario nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) teniendo en cuenta las recientes decisiones sobre REDD+ deberá ajustarse al marco metodológico que ofrece la guía metodológica del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (IPCC, 2003) y sus directrices (IPCC, 2006), que fueron originadas con la finalidad de ayudar a los países en la elaboración de los inventarios nacionales de GEI.

En tal sentido, Venezuela es uno de los diez primeros países tropicales que posee una de las mayores tasas de deforestación con -0,61% equivalente a -288.000 ha/año de

bosque para el período 2005-2010 (FAO, 2010). Su cobertura forestal entre 1920 y 2008 se ha reducido en un -26,43% con una tasa promedio anual de -0,30% (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo II). Es a partir de los años cincuenta cuando es visible, en varias zonas del país, una reducción paulatina en la superficie cubierta por diferentes formas de bosque. La mayoría de los bosques del país (90%) se encuentran ahora al sur del río Orinoco, mientras que para 1950, un 36% se encontraban al norte (Torres-Lezama *et al.*, 2008). La región más impactada ha sido la que agrupa diferentes formaciones vegetales, conocidas como “Selvas Alisias” de los Llanos Occidentales del país (Guevara *et al.*, 2011). Un análisis detallado de las principales causas que han provocado la deforestación en Venezuela y de la dinámica histórica de la deforestación en dicho país pueden encontrarse en Pacheco *et al.* (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I, 2011 Capítulo II).

En la actualidad Venezuela, no cuenta con cifras globales sobre el potencial de captura de carbono de sus bosques, aunque si se dispone de algunos estudios parciales. En este sentido, Delaney *et al.* (1997) encontraron, para cinco biomas del país, un rango de biomasa aérea entre 70 a 179 toneladas (t/ha) para individuos arbóreos con un diámetro mayor a 10 cm (diámetro a la altura de pecho (D) = 1,3 m por encima del suelo). También, Hernández (2001) estimó para la región del Caura en la Guayana venezolana una biomasa aérea de $237 \pm 49 \text{ Mg ha}^{-1}$. Asimismo, recientemente se ha incluido información de bosques venezolanos en investigaciones hechas a escala regional (Malhi *et al.*, 2006). Un análisis del efecto que tiene la explotación forestal, como una actividad de degradación importante sobre el carbono, en los bosques de tierras bajas de la Guayana es presentado en Vilanova *et al.* (2010). Allí se puede apreciar cómo el aprovechamiento no planificado de maderas puede llegar a reducir casi en un 50% la cantidad de biomasa almacenada en la vegetación.

Venezuela es un país donde la producción de petróleo es el principal motor de la economía nacional, por tanto es lógico pensar que la principal fuente de emisiones de GEI provenga del sector energético e industrial. En este sentido, en MARN (2005) se estima que aproximadamente el 44,62% de las emisiones de CO₂ para el año 1999 provenían de la industria de la energía (petróleo y gas y generación hidroeléctrica), un 32,09% corresponde al sector transporte (terrestre y aéreo), un 14,13% a la industria manufacturera (hierro, acero, pulpa y papel, alimentos), 5,18% al sector residencial,

2,43% a fugas y venteos, 1,17% al sector comercial y un 0,37% que corresponde conjuntamente a los sectores agrícola, forestal y pesquero (cambio de uso de la tierra principalmente). La información oficial reciente, (MinAmb, en línea¹) indica que las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) presentaron fluctuaciones a lo largo del período que va desde 1997 hasta 2006, alcanzando el valor mínimo de 131,8 millones de toneladas métricas (MtC) en 1997 y el valor máximo de 172,5 MtC en 2003. Entre 2004 y 2006 se observó un incremento en las emisiones, al pasar de 135,9 MtC en 1999 a 171,5 en 2004, lo que representa un incremento del 26%.

Otras estimaciones similares asignan una proporción considerablemente mayor a las emisiones producidas a partir de procesos de cambio del uso de la tierra, debido fundamentalmente a intensos procesos de deforestación. Por ejemplo, Bonduki y Swisher (1995) indican que hasta un 44% de las emisiones nacionales de CO₂, entre 1980 y 1990 fueron originadas por la pérdida de casi 520.000 ha de bosque por año. También, Murray y Olander (2008) estiman una emisión global de CO₂ entre el 2000 y el 2005 equivalente a 46,1 MtC /año producto de la deforestación. Esto representaría un poco más de la mitad de las emisiones nacionales del año 2000. (CAIT, 2008) indica que entre 1990 y 2000 ocurrió una disminución en las emisiones de CO₂ debidas a la deforestación en casi un 3,5% anual, siendo coherente esta cifra con el descenso en las tasas de deforestación anual reportado en años recientes en el país (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo II). Se espera que próximamente el gobierno nacional aporte una actualización de las emisiones producidas en Venezuela.

En este contexto se planteó como objetivos de este trabajo analizar la deforestación y la degradación forestal, asimismo estimar las emisiones de dióxido de carbono producidas, en el marco metodológico del IPCC, con la finalidad de informar sobre los cambios en las existencias de carbono para una potencial estrategia REDD+, dentro de la UNFCCC. Se ha seleccionado como área piloto una zona emblemática de los Llanos Occidentales venezolanos, la Reserva Forestal de Caparo (RFC). La RFC es un área de gran dinamismo, que ha experimentado, a lo largo de los últimos años, procesos generalizados de pérdida de ecosistemas naturales y que fue seleccionada como una de las áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela (Pacheco *et al.*, en revisión Capítulo III). Se presentan al final del artículo algunas recomendaciones

¹ <http://www.minamb.gob.ve/files/planificacion-y-presupuesto/IndicadoresAmbientales.htm>

relacionadas con el uso de la tierra y con la necesidad de realizar estudios que fortalezcan la investigación sobre el cambio climático y los bosques en Venezuela.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La RFC está ubicada en los Llanos Occidentales de Venezuela, al sur-oeste del Estado de Barinas, geográficamente se localiza entre las coordenadas longitud 71° 3' 35'' y 70° 28' 35'' Oeste y la latitud 7° 18' 00'' y 7° 39' 50'' Norte, y posee una superficie de 1.744,84 Km² (Figura V.. 1). Se encuentra sobre una planicie de desborde activa de edad reciente, con una altitud que varía de este a oeste de 120 a 140 m; geomorfológicamente, pertenece a una cuenca sedimentaria compuesta por un manto de sedimentos cretácicos y cenozoicos. Posee una estación seca (noviembre-abril) y una húmeda (mayo-octubre), con una precipitación media anual de 2.156 mm y una temperatura media anual de 24,96 °C (Maldonado, 2008).

Destinada por la legislación a la producción de madera, en la RFC la actividad extractiva de las empresas concesionarias y las sucesivas intervenciones por parte de grupos sociales han venido sustituyendo los paisajes con bosques, sabanas húmedas y/o esteros, casi en su mayoría, por un paisaje de pastizal. En este trabajo no se analizan en detalle las causas que han llevado a la deforestación de la RFC. Más detalles sobre este proceso pueden verse en Acevedo *et al.* (2007). Actualmente, su vegetación está conformada principalmente por: *pastizales*, con un estrato gramíneo y escasos elementos arbóreos; *rastrojos*, un tipo de matorral con vegetación secundaria que se establece en áreas abandonadas; *matorrales*, conformada predominantemente por estratos arbustivos y herbáceos; *plantaciones*, representadas de forma más o menos regular en pequeñas superficies, pero en número abundante; *bosques*, es quizás la formación más interesante, debido fundamentalmente a su importancia ecológica y su carácter representativo de uno de los últimos relictos de bosque natural en los Llanos Occidentales; *bosques de galería*, asociados a los cursos de agua permanentes y/o semipermanentes y a áreas de influencia freática; *casildales*, dominados por la especie *Acacia articulata*, un pequeño árbol de 6 a 13 m; y *palmares*, formación compuesta por comunidades casi puras de palmas (Arends *et al.*, 1993).

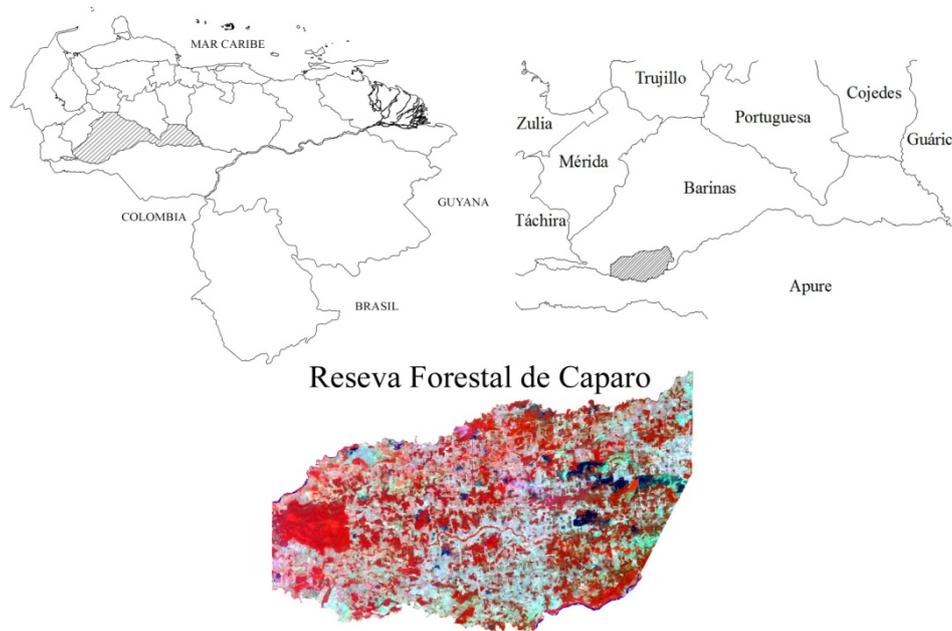


Figura V. 1. Ubicación del área de estudio. Imagen Landsat del 2011.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Material

En este estudio se han utilizado tanto datos procedentes de imágenes Landsat, como datos obtenidos en campo. Asimismo, en distintas etapas del trabajo se recurre al uso de información cartográfica auxiliar. A continuación, se detallan los datos empleados y los procesos seguidos para su utilización.

3.1.1. Imágenes Landsat

Debido a las condiciones climáticas tropicales, en las cuales las superficies boscosas están cubiertas la mayor parte del año por nubes y sombras de nubes, las imágenes del satélite Landsat empleadas fueron tomadas dentro del período de sequía (noviembre-abril) y con más o menos 2 años de diferencia con los establecidos como referencia (1990, 2000 y 2010). Este último criterio es el utilizado en 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). Estas imágenes corresponden al *path* 006 y *row* 55 con coordenadas del centro

de la imagen de latitud 7,2° y longitud -70,8°. Fueron tomadas el 20 de enero de 1988 (Landsat 4), el 16 de febrero de 2001 (Landsat 5) y el 31 de diciembre de 2009 (Landsat 7). Las mismas proceden de la colección del USGS (U.S. *Geological Survey*) (<http://glovis.usgs.gov/>) de distribución libre y poseen un nivel de corrección radiométrico y geométrico L1T. Para el análisis se emplearon las bandas de reflectividad: rojo (0,63-0,69 µm), infrarrojo cercano (0,76-0,90 µm) e infrarrojo medio (1,55-1,75 µm).

3.1.2. Información Cartográfica Auxiliar

Para extraer las muestras de validación utilizadas para contrastar la fiabilidad de los mapas generados, se utilizó un mapa de Usos de la tierra, del año 1987, realizado con intensivos chequeos de campo, tanto para la toma de muestras, la interpretación inicial y la validación, lo que confiere una buena fiabilidad. Fue generado a través de una imagen Spot 3 HRV de 20 m de resolución, de la cual se originó una composición en falso color, que se interpretó visualmente en papel fotográfico, obteniendo un mapa a escala 1:100.000 con una precisión global de 93,8% (Pozzobon, 1995).

De igual manera, para tratar de explicar el uso del fuego en los procesos de deforestación y degradación del bosque dentro de la RFC, se utilizó el producto global de incendios activos de MODIS denominado FIRMS (*Fire Information For Resource Management System*), este detecta las zonas “hotspot” de incendios, dentro del centro de cada píxel de las imágenes MODIS, a bordo de los satélites de la NASA Aqua y TERRA (Giglio *et al.*, 2003). Este producto tiene una cobertura mundial de los incendios ocurridos desde 2001 hasta la fecha, es de distribución libre y puede encontrarse en formato Shapefile (<http://firefly.geog.umd.edu/>).

3.1.3 Datos de campo

En varias zonas de Caparo se establecieron durante los años 90 un conjunto de parcelas permanentes con el objetivo de monitorear la dinámica del bosque con énfasis en el crecimiento y ecología de las especies de árboles. Estas parcelas se ubican en un sector del extremo oeste de la RFC, en éste se encuentra un lote de bosque de 7.000 ha, correspondiente a la estación experimental de Caparo, área

concedida, para fines científicos, a la Universidad de Los Andes, desde 1970. No se cuenta a la fecha con información de campo del resto de la RFC. Por tanto, para efectos de este trabajo este lote de bosque se considera como representativo de los demás bosques de la reserva.

Las parcelas utilizadas como referencia conforman dos grupos, el primero se estableció en los años 1989-1990 y lo conforman parcelas rectangulares de 1.000 m de longitud por 10 m de ancho (fajas de 1 ha), distribuidas en forma sistemática. El segundo grupo de monitoreo se estableció en el año 1991 en el Área Ecobiológica de la unidad (Rodales 11, 12, 13 y 23). Para su establecimiento se diseñó un muestreo aleatorio de seis parcelas cuadradas de 50 m de lado (0,25 ha). En total se han medido 40 parcelas en las que se han estudiado todas las especies arbóreas incluyendo las palmas, todas ellas mayores de 10 cm de diámetro, dando un promedio aproximado de unas 70 especies/ha. Se ha utilizado la información para todo el período de medición aunque se hace énfasis en las fechas de referencia. Para efectos comparativos entre las imágenes de satélite y los datos de campo se utilizaron las mediciones del período 1991-2009. Cabe destacar que desde el año 2010, los datos de estas parcelas han sido incluidos en el proyecto RAINFOR (Red Amazónica de Inventarios Forestales²), a través de una base de datos que agrupa información de parcelas permanentes en muchas zonas tropicales, descrita con amplitud en Peacock *et al.* (2007) y que puede consultarse a través del portal <http://www.forestplots.net/>.

3.2. Métodos

El enfoque metodológico utilizado para estimar las emisiones de CO₂ proviene de la guía de buenas prácticas del IPCC (IPCC, 2003, 2006), la cual utiliza una ecuación básica donde se combinan los *Datos de Actividad*, que se refieren a la extensión de las superficies deforestadas y degradadas (expresadas en hectáreas), con los *Factores de Emisión*, que se refieren a los coeficientes que cuantifican la cantidad de carbono (en términos de CO₂ equiv emitido o absorbido por unidad de superficie). El esquema de esta metodología puede observarse en la Figura V. 2. El cálculo de estas emisiones se realizó utilizando como nivel de referencia los últimos 20 años, tal y

² <http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/index.html>

como lo sugiere el IPCC (2003, 2006), es decir, a partir del año 1990 se evaluaron dos periodos: 1990-2000 y 2000-2010.

3.2.1. Datos de actividad

Tal y como se estableció en el punto 3.1.1. para estimar las áreas de pérdida de la biomasa y el carbono procedentes de la deforestación y degradación del bosque, se utilizaron imágenes Landsat. Siguiendo la metodología propuesta por Câmara *et al.* (1996) a las imágenes procedentes del satélite Landsat se les aplicó una técnica de restauración de la imagen, con la finalidad de mejorar las distorsiones insertadas por el sensor, que ocasionan un efecto de desenfoque en las mismas. Esta corrección se realizó mediante un filtro lineal, donde las ponderaciones de restauración de filtro se obtuvieron de las características del sensor, y no de forma empírica, ya que se llevó a cabo con los filtros tradicionales de mejora. Posteriormente, se procedió a realizar por un lado, la cartografía de la deforestación y por otro lado, la cartografía de degradación del bosque, ambas se realizaron con el programa de dominio público SPRING del Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br/>).

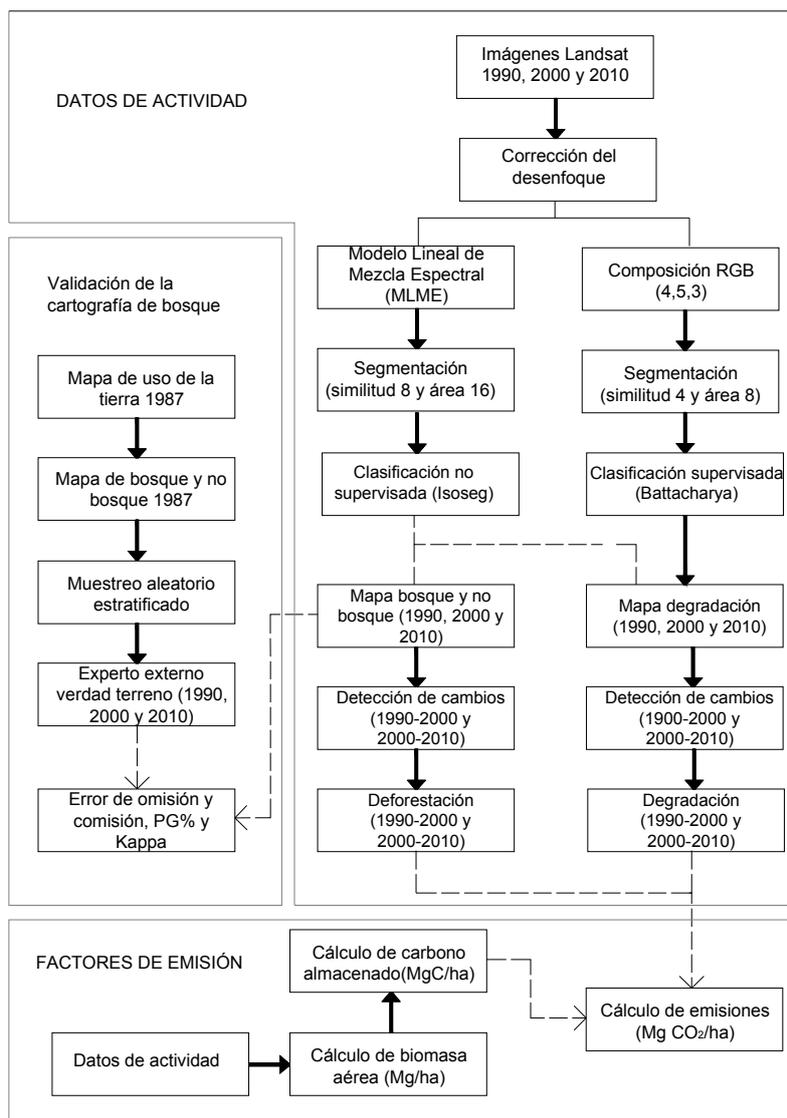


Figura V. 2. Esquema metodológico utilizado en este trabajo.

3.2.1.1. Cartografía de deforestación

Para realizar la cartografía de bosque y las áreas consideradas como “no bosque” en cada año (1990, 2000 y 2010) y posteriormente la cartografía de deforestación, se utilizó como metodología la establecida en el proyecto PRODES (*Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia*) desarrollado por el INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*) de Brasil. Dicha metodología se adapta bien a estos ambientes tropicales, ya que fue contrastada en esta misma zona de estudio, mediante una

comparación de metodologías para el monitoreo de la deforestación (Pacheco *et al.*, en preparación Capítulo IV).

La metodología utiliza la técnica del Modelo Lineal de Mezclas Espectrales (MLME) planteada por Shimabukuro y Smith (1991), la cual estima la proporción de los componentes suelo, vegetación y sombra para cada píxel, a partir de la respuesta espectral de las bandas de Landsat, dando como resultado imágenes del fragmento suelo, vegetación y sombra, a través de la ecuación:

$$r_i = a * vege_i + b * suelo_i + c * sombra_i + e_i$$

Donde r_i es la respuesta del píxel en la banda i ; a , b , y c son las proporciones de vegetación, suelo y sombra (o agua), respectivamente; $vege_i$, $suelo_i$ 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 , indicando i la banda. En el proceso se utilizan las bandas 3, 4 y 5 formando un sistema de ecuaciones lineales que pueden resolverse usando el método de mínimos cuadrados (Shimabukuro and Smith, 1991).

De las tres bandas sintéticas generadas, la que proporciona mayor contraste entre el suelo desnudo y el bosque es la banda del componente suelo. Por 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).

Posteriormente, se generó un archivo de contexto con la imagen segmentada, la fracción suelo y se utilizó como clasificador el de regiones (INPE-DPI, 1999). Con este archivo de contexto y el algoritmo de clasificación no supervisado (Isoseg), empleando un umbral del 95%, se clasificó la imagen. Las clases de las imágenes resultantes de la clasificación fueron reagrupadas en bosque y no bosque. La definición de bosque asumida en este estudio está dentro de los criterios del Protocolo 17 de Kioto, a través del Acuerdo de Marrakech (UNFCCC, 2001), donde se toma como superficie mínima de bosque 1 ha, altura mínima de 2 m y cobertura mínima de copa del 10 %.

Con el fin de generar un mapa definitivo, donde se consideren además, las áreas correspondientes a la degradación, los mapas de bosque y no bosque se interceptaron con los mapas de degradación que fueron obtenidos de las mismas imágenes Landsat, pero con una técnica de procesamiento más refinada. Esta intercepción tiene como objetivo extraer dichas áreas de degradación para que no sean posteriormente contabilizadas como bosque. Con la finalidad de obtener una cartografía y cuantificar la deforestación para los períodos 1990-2000 y 2000-2010, a estos mapas de bosque y no bosque definitivos, se le aplicó una técnica de detección de cambios a través de la diferencia de mapas.

De igual manera, para conocer como ha sido la tasa media anual de deforestación, se utilizó la ecuación planteada por Sader y Armon (1988):

$$\text{Porcentaje por año} = \left(\frac{(B_1 - B_2) * 100}{(B_1 * N)} \right)$$

Donde, B_1 es el área de bosque en la fecha inicial, B_2 es el área de bosque en la fecha final y N el número de años del período.

3.2.1.2. Cartografía de Degradación

Para realizar la cartografía de degradación del bosque de cada año y posteriormente cuantificar la degradación de los stocks de carbono para cada período, se empleó un enfoque directo que utiliza las imágenes de alta resolución Landsat (Cochrane and Souza, 1998; Stone and Lefebvre, 1998; Asner *et al.*, 2002; Monteiro *et al.*, 2003; Souza and Roberts, 2005), específicamente las bandas 3, 4 y 5. Con éstas se realizó una composición en falso color (453). A estas composiciones se les aplicó un ajuste del contraste con la finalidad de mejorar la firma espectral de la degradación, diferenciando las diferentes mezclas de cobertura de la tierra (vegetación, árboles muertos, suelos y sombra) y resaltando los cambios de las áreas dentro del bosque (GOFC-GOLD, 2010).

Para identificar las clases de degradación en estas composiciones ajustadas, se utilizó una segmentación automática de la imagen (GOFC-GOLD, 2010), con criterios más afinados que los utilizados en la cartografía de deforestación. De esta manera se

obtiene una mejor discriminación a la hora de agrupar los píxeles, de acuerdo a su similitud espectral. En tal sentido, se empleó un criterio mínimo de similitud, de 4 y un valor de área mínima, de 8 (Bins *et al.*, 1993). Con esta imagen segmentada, la composición RGB y el clasificador de regiones se generó un archivo de contexto.

Por otro lado, se creó un archivo de muestras de entrenamiento, utilizando las categorías de degradación y no degradación, las cuales fueron definidas utilizando los objetos de la imagen segmentada. Posteriormente, con el archivo de contexto y las muestras de entrenamiento, se aplicó un algoritmo supervisado, basado en la distancia de Battacharya, con un umbral de aceptación del 99% (INPE-DPI, 1999).

Los resultados de estas clasificaciones fueron editados, eliminando los polígonos que fueron clasificados como degradación, pero que en la realidad no lo son, ya que se ubicaron fuera de los bosques. De esta manera se obtuvo el mapa de degradación para los años 1990, 2000 y 2010. Estos mapas fueron utilizados, por un lado, para extraer las áreas de degradación dentro de los mapas de bosque y no bosque de cada año y, por otro lado, para realizar una detección de cambios mediante la diferencia de mapas. Ésta se realizó para detectar los polígonos de degradación de la fecha anterior, con la finalidad de no contabilizarlo de nuevo en la última fecha.

3.2.1.3. Validación de la cartografía

De los productos cartográficos generados, se validaron las cartografías definitivas de bosque y no bosque para los años 1990, 2000 y 2010. Las mismas contienen tanto información del bosque como de la degradación. Para ello, se reclasificó el mapa de uso de la tierra de 1987 (Pozzobon, 1995), en bosque y no bosque. Con la finalidad de realizar sobre éste un muestreo aleatorio estratificado de 100 puntos de muestra para cada categoría (Figura V., 3), el doble del número recomendado por los científicos (Congalton, 1988).

Este grupo de puntos muestrales se triplicó, para obtener un grupo de datos de verdad-terreno que valide cada mapa (1990, 2000 y 2010). Para esto se utilizó un experto externo según lo sugerido por Congalton y Green (2009), este experto identificó las categorías de bosques y no bosque en los puntos perteneciente a cada

grupo, empleando para ello la imagen Landsat utilizada en la construcción de cada mapa.

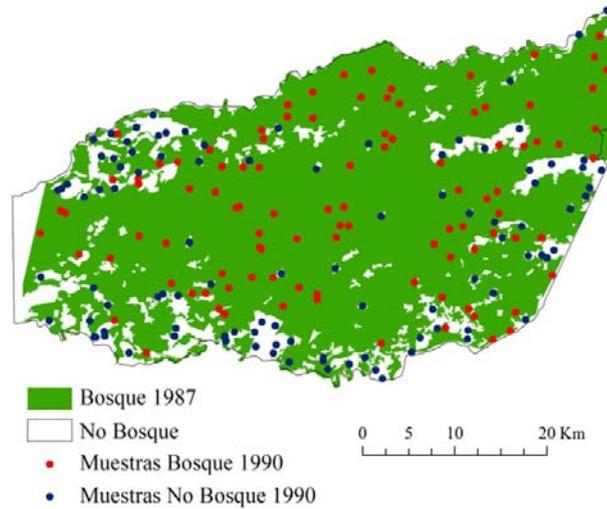


Figura V. 3. Distribución aleatoria de los puntos muestrales en la categoría bosque (rojo) y no bosque (azul) para el año de 1990, sobre el mapa reclasificado de 1987.

Con estos grupos de datos de verdad-terreno se cuantificó de manera detallada la exactitud de las cartografías de cada año. Este análisis se centró en el cálculo de la matriz de confusión, a partir de la cual se calcularon los errores de la proporción de los cambios de los elementos omitidos (*error de omisión*) y de la proporción de la falsa detección de los elementos no cambiantes (*error de comisión*), así como el de los elementos de cambios y no cambios que son correctamente clasificado por el método (*error de precisión global*) (Congalton and Green, 2009).

De igual manera, 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 and Fitzpatrick-Lins, 1986), mediante la siguiente ecuación.

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1,n} X_{jj} - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{+i}}$$

Donde, n es el número total de casos, X_{ij} se refiere al acuerdo observado y X_{i+} y X_{+i} son los marginales de cada categoría.

3.2.2. Factores de emisión

Para calcular los coeficientes que cuantifican las emisiones de carbono producidas por la deforestación y degradación, se utilizaron los datos de campo, cumpliendo con los requisitos establecidos por GOF-C-GOLD (2010) para el establecimiento de mecanismos REDD+, ya que los datos fueron recopilados en los últimos 18 años (1991-2009). Éstos pertenecen a las parcelas descritas en el punto 3.1.3. Con estos datos se calculó la biomasa aérea de manera indirecta, por medio de una ecuación que fue construida a escala pantropical con base en datos de 2.410 árboles con diámetros mayores a 5 cm y descrita en Chave *et al.* (2005). La regresión utilizada fue la siguiente:

$$(AGB)_{est} = \rho * \exp \left(-0,667 + 7,784 \ln(D) + 0,207 (\ln(D))^2 - 0,0281 (\ln(D))^3 \right)$$

Donde:

- AGB es la biomasa aérea del árbol expresada en kilogramos (kg),
- ρ la densidad de la madera expresada en g/cm³. Una base de datos de libre acceso³ ha servido para recopilar cerca del 90% de la información de todas las especies encontradas en las parcelas.
- exp es el valor de “e” (exponencial) equivalente a 2,71828.

Posteriormente, para estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea se utilizó 0,5 como factor de conversión de biomasa aérea a carbono (Brown *et al.*, 2005). Una vez calculado el carbono almacenado, se estimaron las emisiones equivalentes de dióxido de carbono (CO₂). Para ello, se ha seguido una metodología estandarizada descrita en WRI (2005), que consiste en multiplicar la cantidad de carbono estimada (t C/ha) por 44/12 que es la relación de peso molecular de dióxido de carbono y el peso molecular del carbono (t CO₂/ha). Para obtener la cantidad de carbono emitido procedente de la deforestación y la degradación, este valor fue multiplicado por el área total estimada de deforestación y degradación del bosque para cada período evaluado y de esta manera se determinó el valor total de emisiones para cada uno de los períodos evaluados.

³ Global Wood Density database <http://datadryad.org/repo/handle/10255/dryad.235>

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cartografía de la deforestación y degradación del bosque

En la Figura V. 4 se observan los resultados correspondientes a la cartografía de bosque, no bosque y degradación. En ésta se detalla la disminución secuencial desde 1990, 2000 y 2010, conservándose intacta, únicamente hacia el extremo oeste, la porción correspondiente a la Estación Experimental de Caparo. La magnitud de esta disminución se evidencia cuando en el año 1990, la RFC estaba cubierta por un 76,62% de bosque (134.621 ha), en el 2000 por un 47,99% (84.321 ha) y en el 2010 por un 31,82% (55.911 ha). Por otro lado, las imágenes Landsat permitieron detectar algunos caminos forestales, patios de acopios y zonas quemadas. En la Figura V. 4, estos cambios están representados en color rojo y representan un 5,80% (7.808 ha), 5,81% (4.897 ha) y 2,29% (1.281 ha), para los bosques de 1990, 2000 y 2010 respectivamente.

Para puntualizar estos procesos de deforestación y degradación del bosque, se ofrece en cada mapa de la Figura V. 4 una vista en detalle, donde se observa la pérdida gradual del bosque a través del tiempo. La deforestación viene acompañada de procesos de degradación que van siendo menores o nulos, a medida que la superficie ocupada por bosques disminuye. Dicho proceso puede observarse en la Figura V. 4, así apreciamos que en el año 1990, en la zona norte de la RFC se aprecian pequeños sectores de degradación (color rojo), origen del establecimiento de carreteras forestales. Estas superficies en el año 2000 dividen el bosque en dos porciones y en el 2010 ya no se diferencian por lo fragmentados que se encuentran estos bosques.

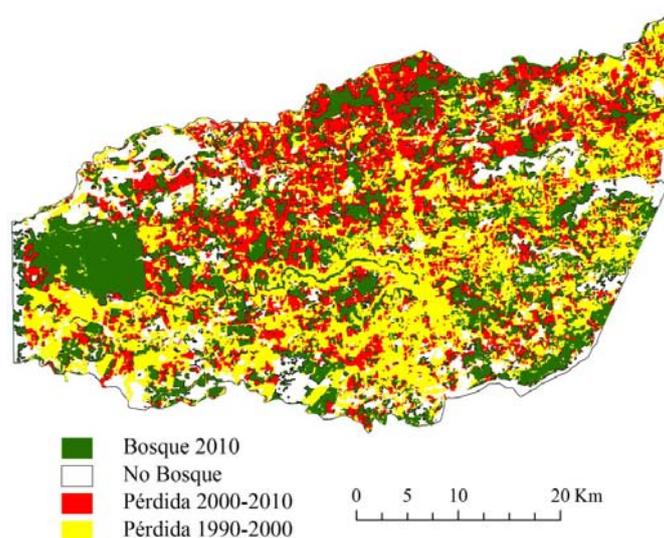


Figura V. 5. Deforestación para los periodos 1990-2000 y 2000-2010 en la RFC.

Tanto la deforestación como la degradación de los bosques en la RFC para los períodos evaluados, tienen su origen en las actividades de extracción selectiva de las especies forestales que se iniciaron en los años 80 con la asignación de concesiones forestales en tres unidades de manejo forestal (Rodríguez *et al.*, 2000). Posteriormente, alentados por factores políticos e institucionales, en la zona se produjeron intensos procesos migratorios, que fomentaron la ocupación de tierras para el establecimiento de actividades agropecuarias. De este modo, se constata un aumento de la actividad económica debido a la presión demográfica y a diversos factores de tipo cultural (Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo I). Esta población se asentó principalmente, en las vías primarias y secundarias y los patios de acopio que dejaron las empresas madereras, por otro lado, se utilizaron técnicas de roza y quema para expandir las fronteras agropecuarias dentro de la RFC.

En un intento de explicar el uso del fuego como técnica utilizada en estos procesos de expansión de las fronteras agropecuarias, se consultó el producto global de incendios activos FIRMS. El total de focos de incendios activos detectado desde 2001 hasta el 2009, dentro de la RFC, fue de 1605. Del total de incendios, el 51,6% (828 incendios) se originaron en los bosques que fueron deforestados y degradados en el período 2000-2010 (Figura V. 6) y el otro 48,4% (777 incendios) en las áreas de no deforestación y degradación. La distribución espacial de estos focos de incendios

indican que la zona centro norte y la nororiental de la RFC fue la más afectada, coincidiendo con las áreas de mayor deforestación para este período. Mientras, su distribución temporal anual, indica que el 53% de los incendios se generaron en el año 2003, siendo este año el de mayor actividad del fuego, dentro de la RFC y uno de los años de mayor deforestación.

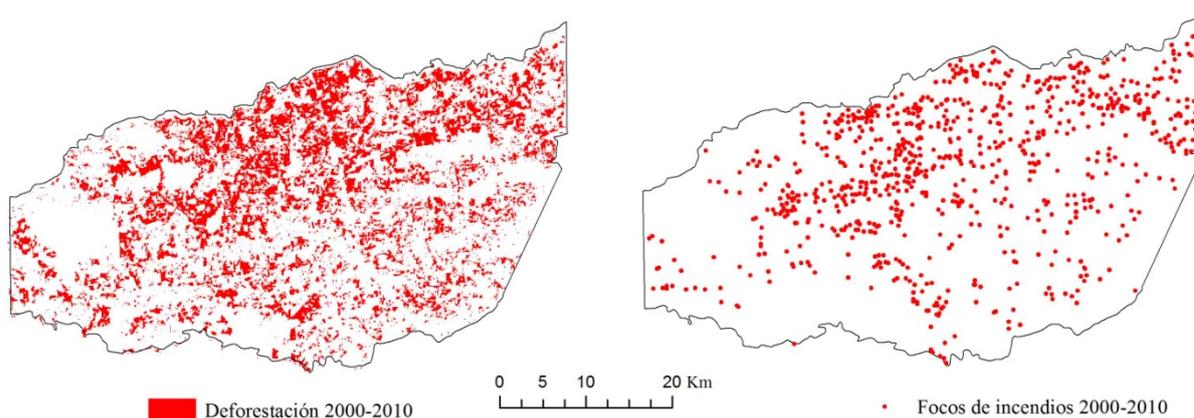


Figura V. 6. Áreas deforestadas y número de incendios activos detectados por MODIS dentro de la RFC para el período 2000-2010.

4.2. Validación de la cartografía de bosques

En la tabla V.1 se visualizan los índices de fiabilidad obtenidos para cada mapa definitivo de bosque y no bosque. Se puede detallar que en la categoría de bosques los errores del usuario (comisión) fueron menores que en la categoría no bosque, excepto en el mapa de 1990 que fue ligeramente superior. Por su parte, para los errores del productor (omisión) ocurrió lo contrario, ya que en la categoría bosque fueron superiores a los de la categoría no bosque, excepto en el mapa 1990 que fue superior. Por otro lado, las precisiones globales obtenidas están dentro de los límites establecidos (80 a 95%) por los científicos para diferenciar estas categorías, y posteriormente evaluar sus cambios (GOFC-GOLD, 2010). Mientras, los índices kappa ofrecen un grado de acuerdo sustancial, según Landis y Koch (1977), ya que sus valores se encuentran dentro del rango de 0,61 – 0,80. Estos resultados de fiabilidad, demuestran que a medida que el bosque en la RFC se va fragmentando, los índices de precisión van disminuyendo.

Tabla V. 1. Índices de fiabilidad de los mapas de bosque de 1990, 2000 y 2010.

| | Error (%) | Mapas | | |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|
| | | 1990 | 2000 | 2010 |
| Bosque | Comisión | 12,38 | 8,00 | 5,66 |
| | Omisión | 8,00 | 24,18 | 32,43 |
| No Bosque | Comisión | 8,51 | 17,74 | 16,44 |
| | Omisión | 14,00 | 6,42 | 3,17 |
| Precisión Global (%) | | 89,00 | 85,50 | 86,00 |
| Kappa | | 0,78 | 0,71 | 0,68 |

4.3. Estimación de biomasa del bosque y emisiones de CO₂

Las estimaciones de la biomasa aérea al inicio y al final del período considerado en este estudio, para los últimos 18 años se muestran en la Figura V. 7. Los valores estimados de biomasa aérea coinciden con los rangos encontrados para este tipo de bosques (Delaney *et al.*, 1997) y son considerablemente más bajos, si se comparan con bosques húmedos, como los encontrados al sur del Orinoco en la Guayana venezolana (Malhi *et al.*, 2006; Vilanova *et al.*, 2010). Cuando se calcula la tasa anual de acumulación de biomasa se encuentra una tendencia positiva para los últimos 18 años equivalente a +1,56 t/ha/año (+0,78 t C/ha/año). Esta acumulación positiva indica el comportamiento de estos bosques como potenciales “sumideros” de carbono. Esta dinámica de acumulación es coherente con la hipótesis recientemente formulada que indica que los bosques primarios del neotrópico han venido incrementando su crecimiento, favorecidos fundamentalmente por el efecto del aumento en las emisiones de carbono disponibles en la atmósfera (Phillips *et al.*, 2009). No obstante, para el caso de la RFC esto puede ser discutible, ya que de acuerdo a otros estudios, la mayoría de los bosques de los Llanos Occidentales serían comunidades jóvenes, secundarias, de más de un siglo, que se desarrollaron después de que las llanuras fueron sometidas al fuego para el establecimiento de ganado durante el período colonial y luego despobladas y abandonadas como consecuencia de la guerra de la independencia (Veillón, 1977; Ramírez *et al.*, 2010).

Para el período analizado, la dinámica de reclutamiento favorece positivamente la incorporación progresiva de una mayor cantidad de individuos de la regeneración avanzada hacia categorías de tamaño superiores a lo largo del tiempo. Asimismo, los

árboles grandes (> 40 cm D) componen casi el 70% de la biomasa aérea. Este resultado es de gran relevancia para efectos de actividades de degradación como el aprovechamiento forestal que suele concentrarse en los árboles de mayor tamaño que tienden a ser los que mayor biomasa acumulan. Por ejemplo, Clark y Clark (1996) indican que en los bosques tropicales húmedos, un solo árbol de 150 cm de diámetro, a la altura de pecho, puede llegar a acumular una biomasa aérea equivalente a aproximadamente 607 árboles de 10 cm de diámetro, sugiriendo la enorme importancia que tienen durante el proceso de determinación de la biomasa.

Aunque parece observarse una tendencia hacia el aumento en la cantidad de carbono almacenado en la vegetación remanente en la RFC, debe tomarse en cuenta que los bosques tropicales han mostrado ser altamente sensibles a los fenómenos extremos de sequías relacionados fundamentalmente a un aumento en la periodicidad de años “Niño” (ENSO). Por ejemplo, en Phillips *et al.*, (2010) se muestran resultados de mediciones de biomasa realizados antes y después de períodos extremos de sequías. Allí se observa un cambio drástico donde los bosques pasan a convertirse en fuente de carbono debido a un aumento inusual de la mortalidad de árboles grandes afectados por la reducción de agua disponible en el ecosistema.

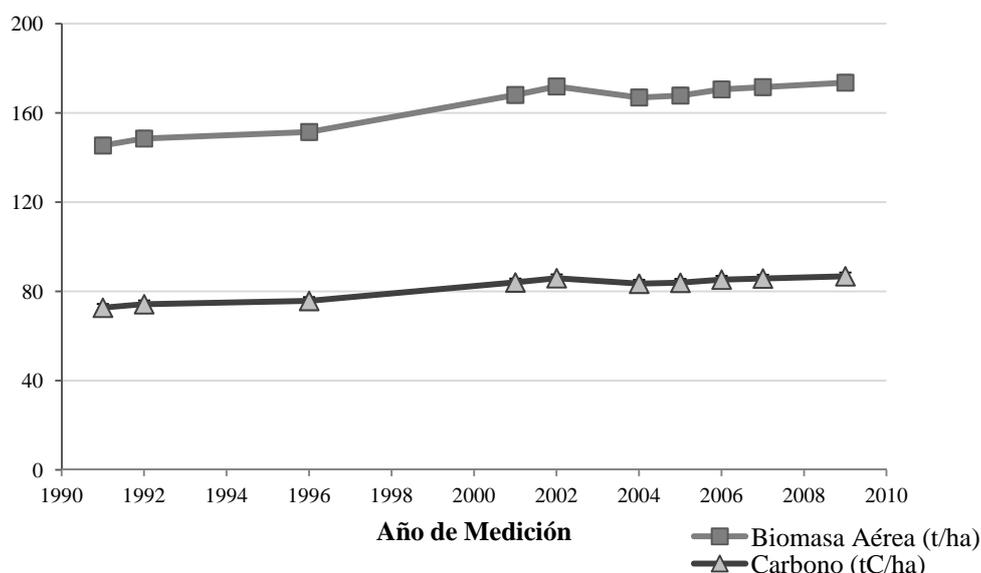


Figura V. 7. Dinámica temporal de la biomasa aérea y carbono en bosques de la RFC. El carbono corresponde al 50% de la biomasa aérea.

Capítulo V. Estimación de las emisiones de CO₂ procedentes de la deforestación y degradación del bosque en la reserva forestal de Caparo, Venezuela: bases para el establecimiento de una estrategia REDD+

Para calcular las emisiones equivalentes por deforestación y degradación del bosque para los periodos 1990-2000 y 2000-2010, se tomaron como base, los datos de biomasa de los años 2000 y 2009, a los cuales se les aplicó el coeficiente de carbono almacenado y el CO₂ equivalente (Tabla V.2).

Tabla V.2. Valores base de la biomasa, carbono y equivalentes para el cálculo de las emisiones.

| Año | Biomasa (t/ha) | Carbono (tC/ha) | CO ₂ equivalente (tCO ₂ equiv/ha) |
|------|----------------|-----------------|---|
| 1990 | 145,40 | 72,70 | 266,57 |
| 2000 | 168,08 | 84,04 | 308,15 |
| 2009 | 173,57 | 86,79 | 318,21 |

Con estos valores bases y con los valores de deforestación y degradación del bosque para los períodos 1990-2000 y 2000-2010 se realizó la estimación de las emisiones (Tabla V.3). Los resultados indican que, al haber una mayor superficie deforestada, las mayores emisiones fueron para el período 1990-2000 con 1,67 Millones de toneladas/año (Mt CO₂/año), de las cuales 1,55 Mt/año correspondieron a la deforestación y 0,12 Mt/año a la degradación del bosque. Mientras que las emisiones para el período 2000-2010 fueron de 0,93 Mt/año, 0,90 por deforestación y 0,03 por degradación.

Tabla V.3. Emisiones anuales de CO₂ para los periodos 1990-2000 y 2000-2010 en la RFC.

| Emisiones (MtCO ₂ /año) | Deforestación | Degradación | Total |
|------------------------------------|---------------|-------------|-------|
| 1990-2000 | 1,55 | 0,12 | 1,67 |
| 2000-2010 | 0,90 | 0,03 | 0,93 |

Pacheco *et al.* (2011 Capítulo II) demuestran la dificultad que ha representado obtener estimaciones precisas de la deforestación en Venezuela debido a la falta de una evaluación continua y sistemática sobre la cobertura forestal en Venezuela. En este sentido, hasta la fecha no se conocen para Venezuela estimaciones similares de emisiones producidas por la deforestación y la degradación en otras áreas boscosas, por lo que comparar los resultados mostrados aquí con el objeto de validar mejor el

estudio resulta una tarea compleja. En todo caso, los resultados mostrados pretenden guiar la aplicación de otros estudios similares que permitan contar con un adecuado marco de referencia para la generación de información sobre las emisiones de deforestación y degradación en Venezuela.

Gibbs *et al.*, (2007) presentaron resultados comparativos de las potenciales reservas de carbono de la vegetación para varios países tropicales incluyendo Venezuela. Allí se indica que los diferentes tipos de bosques de Venezuela pueden llegar a contener entre 2326 a 9202 MtC de carbono en la biomasa aérea. Tomando como referencia estos valores y las tasas conocidas de deforestación (FAO, 2010; Pacheco *et al.*, 2011 Capítulo II) Murray y Olander (2008) infieren que las emisiones potenciales causadas por actividades de deforestación y degradación alcanzarían cerca de 46,1 MtCO₂/año para el período 2000-2005. En consecuencia, las emisiones procedentes de la deforestación y la degradación en la RFC representarían cerca del 4% de las emisiones producidas por la pérdida de vegetación para el período 1990-2000 y aproximadamente el 2% para el período 2000-2010.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, para el año 2010 la RFC contaba con una superficie estimada de bosques de 55.911 ha, por lo que de mantenerse una tasa de deforestación similar a la del período 2000-2010 (-3,4% anual) Venezuela podría estar emitiendo anualmente una cantidad importante de carbono con graves consecuencias desde el punto de vista climático y por supuesto agravaría aún más la situación actual de conservación de biodiversidad en ecosistemas sumamente frágiles. Frenar totalmente la deforestación y la degradación en Caparo permitiría mantener cerca de 17,8 MtCO_{2equiv} almacenados en la vegetación. Estas estimaciones pueden considerarse como elevadas, si se tiene en cuenta que sólo se ha analizado los bosques de la RFC, que para el 2010 representa el 0,12%, de la superficie forestal del país que es de 46.275.000 ha (FAO, 2010).

4.4. Bases para el establecimiento de una estrategia REDD+ en la RFC

Los resultados de este trabajo muestran cómo la deforestación y las actividades de degradación en la RFC han contribuido en los últimos 20 años a la reducción de la superficie boscosa en una importante zona de los Llanos Occidentales venezolanos.

Asimismo, como consecuencia de este proceso, una elevada cantidad de emisiones de carbono fueron liberadas a la atmósfera. La existencia de una considerable superficie remanente de bosques y el incremento permanente de la presión por ampliar la frontera agropecuaria suponen un escenario, donde se hace urgente la atención a las causas de la deforestación, usualmente asociadas en Caparo a la pobreza, tráfico ilegal de madera y a la especulación por tierras agrícolas.

Las estrategias de Reducción de Emisiones de Deforestación y Degradación del Bosque (REDD+) buscan crear incentivos económicos que permitan contribuir a la reducción de la deforestación y las emisiones producidas por ésta. Para ello, uno de los principales desafíos técnicos tiene que ver con la obtención de información confiable sobre ambos parámetros. Con la investigación desarrollada en este trabajo se ha logrado, al menos parcialmente, resolver este interrogante. Otras limitaciones, quizás más relevantes, tienen que ver con aspectos institucionales, económicos y operativos que han llevado a que aún no exista ningún país con un proyecto REDD+ completamente verificable (Asner, 2011). No obstante, las iniciativas por lograrlo han ido incrementándose, notablemente en el trópico y algunos ejemplos para Latinoamérica pueden verse en Cenamo *et al.* (2009). Allí se pueden observar diferentes estimaciones de las emisiones potenciales que se reducirían en varios bosques de la región, a través de proyectos REDD+. Las cifras estimadas encajan dentro del rango reseñado en dicho trabajo. Finalmente, de acuerdo a lo evaluado aquí, creemos que existen al menos cuatro oportunidades para el establecimiento de una estrategia REDD+ en Caparo porque:

- 1) El desarrollo de un sistema continuo de evaluación, siguiendo el protocolo propuesto en este trabajo, podría contribuir a fortalecer la capacidad de muchas instituciones a nivel nacional, interesadas en la reducción de la deforestación y la degradación en los ecosistemas forestales más amenazados del país.
- 2) El diseño de un esquema REDD+, a escala nacional, podría reducir la discusión y la especulación sobre aspectos legales y de soberanía que ha implicado la transferencia de recursos económicos a nivel internacional.
- 3) La puesta en marcha de actividades de conservación y manejo, como el establecimiento de plantaciones forestales y sistemas agroforestales,

actualmente desarrolladas con bastantes limitaciones en la RFC, podrían ser impulsadas considerablemente, a través de incentivos económicos basados en un potencial comercio nacional de emisiones.

- 4) Los bosques aún remanentes de la RFC constituyen ecosistemas de carácter relictual que deben ser preservados por su biodiversidad y su potencial como sumidero de carbono. Por otro lado, a través de REDD+ podrían beneficiarse, al mismo tiempo, las estrategias nacionales y los compromisos de mitigación frente al cambio climático.

5. CONCLUSIONES

La elaboración de esta investigación muestra, por primera vez en una superficie forestal de Venezuela, la estimación de las emisiones de CO₂ por procesos de deforestación y degradación del bosque, de cara a proponer el establecimiento de estrategias REDD+ dentro del UNFCCC. Para ello, por un lado, se seleccionó la RFC, área emblemática en los Llanos Occidentales venezolanos que ha experimentado procesos de pérdida de ecosistemas naturales, a lo largo de los últimos años y que constituye sin lugar a dudas una de las áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela (Pacheco *et al.*, en revisión Capítulo III). Por otro lado, se aplicó el marco metodológico del IPCC (IPCC, 2003, 2006), con los enfoques de estimación del Nivel II para los *Datos de Actividades*, que implica el seguimiento espacial de la conversión de la tierra y del Nivel III para los *Factores de Emisión*, que implica la utilización de datos de carbono locales (Asner, 2009).

A partir de la elaboración de este estudio se pudo demostrar, que sin ningún costo en la adquisición de imágenes satelitales y programas para su procesamiento, cualquier país que esté dispuesto a estimar las emisiones de CO₂, procedentes de la deforestación y la degradación del bosque, lo puede realizar, ya que en la actualidad éstos son de dominio público. Tal es el caso de las imágenes obtenidas de la colección del USGS ó del programa SPRING del INPE de Brasil. Asimismo, a pesar de no existir una posición clara sobre cómo abordar científica y metodológicamente el mecanismo REDD+ (Maniatis and Mollicone, 2010), el uso de la guía de buenas prácticas del IPCC (IPCC, 2003, 2006) y el seguimiento de las recomendaciones del

GOFC - GOLD (2010), son una buena alternativa para el monitoreo y la estimación de carbono.

Un aspecto importante aquí es corroborar que la degradación del bosque, estimada a través de datos de sensores remotos de alta resolución, es más difícil de detectar que la deforestación. Principalmente, porque la firma espectral de los bosques degradados cambia después de dos años, por el rebrote de la vegetación y el cierre rápido del dosel, lo que impide la identificación de algunas actividades, como la explotación forestal selectiva o la identificación de áreas de bosques quemados (Souza and Roberts, 2005). No obstante, en este estudio, al igual que en otros casos (Cochrane and Souza, 1998; Stone and Lefebvre, 1998; Souza and Barreto, 2000; Asner *et al.*, 2002; Monteiro *et al.*, 2003) la aplicación de técnicas digitales a datos de alta resolución, permitió detectar actividades de explotación forestal, como algunos caminos forestales y patios de acopio. También, se identificaron algunas zonas quemadas, a través del producto global de incendios activos FIRMS y se estableció la relación existente con los procesos de deforestación en la RFC. Sin embargo, se requieren estudios que examinen otras técnicas digitales, y así determinar cuál de ellas ofrece mejores resultados en estos ambientes tropicales. Asimismo, es necesario continuar con trabajos de campo que permitan mejorar la estimación del carbono almacenado en la vegetación. Un aspecto relevante tiene que ver con el análisis de diferentes estados sucesionales, tales como bosques secundarios, matorrales y pastizales, que también son afectados por la deforestación y la degradación, debido a que las emisiones asociadas a este proceso son aún un tema de discusión. Finalmente, es necesario fortalecer la conexión entre la investigación y la gestión forestal, con el apoyo de trabajos científicos, y de esta forma contribuir a mejorar el proceso de toma de decisiones relacionados con la conservación y el uso sostenible de los bosques tropicales.

6. Agradecimientos

El primer autor quiere agradecer a la Universidad de Los Andes la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado en la Universidad de Alcalá de Henares (UAH), España. Asimismo, este trabajo ha sido posible por el apoyo brindado por el Departamento de Geografía de la UAH durante el período de formación de C.

Pacheco. Especial reconocimiento al Ing. Julio Serrano y el Per. For. Pedro Salcedo y a todo el personal de la Estación Experimental Caparo por su colaboración en la toma de datos de campo.

7. Referencias

- Acevedo, M., Rosales, J., Delgado, L., Ablan, M.D., J., Callicot, J., Monticino, M., 2007. Modelos de interacción humanoambiental: el enfoque de la Biocomplejidad. *Ecosistemas* 16, 56-68.
- 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.
- Arends, E., Guevara, J., Carreco, O., 1993. Características de la vegetación de la unidad experimental de la reserva forestal de Caparo. Estado Barinas. In: 21, C.d.c.U.M.N. (Ed.). Universidad de Los Andes, Facultad de ciencias Forestales y Ambientales, Mérida.
- Asner, G.P., 2009. Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters* 4, 034009.
- Asner, G.P., 2011. Painting the world REDD: addressing scientific barriers to monitoring emissions from tropical forests. *Environmental Research Letters* 6, 021002.
- Asner, G.P., Keller, M., Pereira Jr, R., Zweede, J.C., 2002. Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment* 80, 483-496.
- Asner, G.P., Powell, G.V.N., Mascaró, J., Knapp, D.E., Clark, J.K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., Hughes, R.F., 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 16738-16742.
- Bins, S.A., Fonseca, L.M.G., Erthal, G.J., Li, M., 1993. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In, *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, Salvador, Brazil.
- Bonduki, Y., Swisher, J., 1995. Options for mitigation greenhouse gas emissions in Venezuela's forest sector: a general overview. *Interciencia* 20, 380-387.
- Brown, S., 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. In: PAPER, F.F. (Ed.), Roma, Italy, p. 235.

- Brown, S., Pearson, T., Moore, N., Parveen, A., Ambagis, S., Shoch, D., 2005. Impact of selective logging on the carbon stocks of tropical forests: Republic of Congo as a case study. . In. Winrock International Report, USAID, p. 21.
- CAIT, 2008. Climate Analysis Indicators Tool Version 5.0. . In: Institute, W.R. (Ed.), Washington, DC.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 1996. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20, 395-403.
- Câmara, G., Valeriano, D., Soares, J., 2006. Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal. In. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brazil, p. 13.
- Cenamo, M., Nogueira-Pavan, M., Thereza-Campos, M., Barros, A., Carvalho, F., 2009. Casebook of REDD projects in Latin America. In: (TNC), T.N.C. (Ed.), Manaus, Brazil, p. 45.
- Clark, D., Clark, D., 1996. Abundance, growth and mortality of very large trees in a neotropical lowland rain forest. *Forest Ecol Manag* 80, 235-244.
- Cochrane, M.A., Souza, C.M., 1998. Linear mixture model classification of burned forests in the Eastern Amazon. *Int J Remote Sens* 19, 3433–3440.
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20, 37-46.
- Congalton, R., 1988. comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54, 593-600.
- Congalton, R., Green, K., 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices. Taylor and Francis Group, London, New York, CRC Press, .
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, E.T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. . *Oecologia* 145, 87-99.
- DeFries, R.S., Rudel, T., Uriarte, M., Hansen, M., 2010. Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nat Geosci* 3, 178-181.
- Delaney, M., Brown, S., Lugo, A., Torres-Lezama, A., Bello-Quintero, N., 1997. The distribution of organic carbon in major components of forests located in five life zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 13, 697-708.

- Draft/decision/CP.16, 2010. Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on long-term Cooperative Action under the Convention - C. Policy approaches and positive incentives on issues relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries; and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries In.
- FAO, 2009. The FRA 2010 Remote Sensing Survey, an outline of objectives, data, methods and approach. In: Programme, F.R.A. (Ed.), Rome, Italy, p. 16.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report. In. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, p. 378.
- FAO, 2011. Situación de los Bosques del Mundo 2011. In, Roma, Italia, p. 143.
- FCCC/CP/2009/11/Add.1, 2009. UNFCCC Decision 4/CP.15. Methodological guidance for activities relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries In.
- Geist, H., Lambin, E., 2002. Proximate cause and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52, 143-150.
- Gibbs, H., Brown, S., Niles, J., Foley, J., 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2, 045023
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O., Kaufman, Y.J., 2003. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87, 273-282.
- GOFC-GOLD, 2010. A sourcebook of methods 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 forestation. In, GOFC-GOLD Report version COP16-1. GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
- Guevara, J., Carrero, O., Costa, M., Magallanes, A., 2011. Las selvas Alisias: hipótesis fitogeográfica para el área transicional del piedemonte andino y los altos llanos occidentales de Venezuela. *Biollania* 10, 178-188.
- Hernández, L., 2001. Densidad de biomasa aérea en bosques extensos del Neotrópico húmedo. Caso de la Cuenca del Río Caura, Venezuela. *Revista Forestal Iberoamericana* 1, 24-34.
- Houghton, R.A., 2010. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change? *Tellus B* 62, 337-351.

- INPE-DPI, 1999. Manual do usuario do SPRING: verso 3.4. . In, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais., Brazil.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). In, p. 632.
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4 -Agriculture, Land Use and Forestry (AFOLU). In.
- IPCC, 2007. 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 Expertos sobre el Cambio Climático. In: (Ippc), I.P.C.C. (Ed.), Ginebra, Suiza, p. 104.
- Kanninen, M., Brockhaus, M., Murdiyarso, D., Nabuurs, G., 2010. Harnessing forests for climate change mitigation through REDD+. In: Series, I.W. (Ed.), International Union of Forest Research Organizations (Iufro). IUFRO, Vienna, Austria, pp. 43-54.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33, 159-174.
- Maldonado, H., 2008. Análisis de la Deforestación en la Reserva Forestal Caparo-Venezuela, Períodos 1987-1994, 1994-2007 y 1987-2007. In, Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, p. 190.
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D., Jarvis, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell & Environment* 22, 715-740.
- Malhi, Y., Wood, D., Baker, T.R., Wright, J., Phillips, O.L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Monteagudo, A., Neill, D.A., Vargas, P.N., Pitman, N.C.A., Quesada, C.A., Salomão, R., Silva, J.N.M., Lezama, A.T., Terborgh, J., Martínez, R.V., Vinceti, B., 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology* 12, 1107-1138.
- Maniatis, D., Mollicone, D., 2010. Options for sampling and stratification for national forest inventories to implement REDD+ under the UNFCCC. *Carbon Balance and Management* 5, 9.
- MARN, 2005. Primera comunicación nacional en cambio climático de Venezuela. In: Naturales, M.d.A.y.d.I.R. (Ed.), Caracas, Venezuela, p. 164.
- Monteiro, A.L., Souza, C.M., Barreto, P., 2003. Detection of logging in Amazonian transition forests using spectral mixture models. *Int J Remote Sens* 24, 151-159.

- Murray, B., Olander, L., 2008. A Core Participation Requirement for Creation of a REDD market. Nicholas School of the Environment and Earth Sciences. In. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, p. 2.
- Pacheco, C., Aguado, I., Lopez, J., en preparación Capítulo IV. Monitoreo de la deforestación tropical para implementación de estrategias REDD: comparación de métodos en los bosques de los Llanos venezolano.
- Pacheco, C., Aguado, I., Mollicone, D., 2011 Capítulo I. Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *Biollania* 10, 281-292.
- Pacheco, C., Aguado, I., Mollicone, D., 2011 Capítulo II. Dinámica de la deforestación en Venezuela: análisis de los cambios a partir de mapas históricos. *Interciencia* 36, 578-586.
- Pacheco, C., Mollicone, D., Aguado, I., en revisión Capítulo III. Identification of deforestation hot spot areas in Venezuela from satellite images and expert opinion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Peacock, J., Baker, T., Lewis, S.L., Lopez-Gonzalez, G., Phillips, O.L., 2007. The RAINFOR database: Monitoring forest biomass and dynamics. *Journal of Vegetation Science* 18, 535-542.
- Phillips, O., Higuchi, N., Vieira, S., Baker, T., Chao, K., Lewis, S., 2009. Changes in Amazonian Forest Biomass, dynamics, and Composition, 1980–2002. *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series* 186, 373-387.
- Phillips, O.L., van der Heijden, G., G., L.-G., L.E.O.C., A., S.L., L., Lloyd, J., Malhi, Y., Monteagudo, A., Almeida, S., E., A.D., Amaral, I., Andelman, S., Andrade, A., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Blanc, L., Bonal, D., Alves de Oliveira, A.C., Chao, K.-J., Dávila, C.N., da Costa, L., Feldpausch, T.R., Fisher, J.B., Fyllas, N.M., Freitas, M.A., Galbraith, D., Gloor, E., Higuchi, N., Honorio, E., Jiménez, E., Keeling, H., Killeen, T.J., Lovett, J.C., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Núñez, V.P., Patiño, S., Peh, K., Peña Cruz, A., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramírez, F., Ramírez, H., Rudas, A., Salamão, R., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Sonké, B., Sota Thomas, A., Stropp, J., Vásquez, R., Taplin, J., Vilanova, E., 2010. Drought mortality relationships for tropical forests. *New Phytologist* 187, 631-646.
- Pozzobon, E., 1995. Estudio de la dinámica de las deforestaciones en la Reserva Forestal de Caparo mediante imágenes HRV SPOT. In, Facultad de Ciencias Forestales, Ingeniería Forestal. Universidad de Los Andes, Mérida, p. 46.

- Ramírez, H., Acevedo, M., Ataroff, M., Torres-Lezama, A., 2010. Adaptación de un modelo de claros para el estudio de la dinámica de un bosque estacional en los llanos occidentales de Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 54, 207-226.
- Rodríguez, L.E., Zambrano, T., Vincent, L., Jerez, M., Plonczak, M., 2000. Investigación Silvicultural con fines de manejo del Bosque Tropical Alto en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo, Venezuela. In: Universidad de Los Andes, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Mérida, Venezuela, p. 119.
- Rosenfield, G.H., Fitzpatrick-Lins, A., 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52, 223-227.
- 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.
- Sader, A., 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20, 11-19.
- Shimabukuro, Y.E., Smith, J.A., 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 29, 16-20.
- Souza, C.M., Roberts, D., 2005. Mapping forest degradation in the Amazon region with Ikonos images. *Int J Remote Sens* 26, 425-429.
- Souza, J., Barreto, P., 2000. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. *Int J Remote Sens* 21, 173-179.
- Stone, T.A., Lefebvre, P., 1998. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in Para, Brazil. *Int J Remote Sens* 19, 2517-2526.
- Torres-Lezama, A., Ramírez-Angulo, H., Vilanova, E., Barros, R., 2008. Forest resources in Venezuela: current status and prospects for sustainable management. *Bois et Forêt des Tropiques* 259, 21-33.
- Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., van Der Heijden, G., Jenkins, P., Manning, P., 2009. ¿La solución natural? El papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático. Una evaluación rápida del Pnuma. In: Ambiente, P.d.I.N.U.p.e.M. (Ed.), Cambridge, United Kingdom. , p. 39.
- UNFCCC, 2001. COP-7: The Marrakech accords. In: Secretariat, U. (Ed.), Bonn, Germany, p. 245.
- Veillón, J., 1977. Las deforestaciones en los Llanos Occidentales de Venezuela desde 1950 a 1975. In: Venezuela, C.d.I.B.H.d. (Ed.), Caracas, Venezuela, pp. 97-110.

- Vilanova, E., Ramírez-Angulo, H., Torres-Lezama, A., 2010. El almacenamiento de carbono en la biomasa aérea como un indicador del impacto de la extracción selectiva de maderas en la Reserva Forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia* 35, 659-665.
- WRI, 2005. The greenhouse gas protocol: The Land Use, Land-Use Change, and Forestry Guidance for GHG Project Accounting. In. World Resources Institute Washington D.C p. 100.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

La elaboración de esta tesis doctoral muestra por primera vez en Venezuela, una serie de resultados sobre la deforestación y degradación del bosque. Estos fueron extraídos de la investigación realizada en cada capítulo, donde se estudiaron: los elementos causales de la deforestación; la dinámica de los bosques venezolanos; las áreas de cambios en la cobertura forestal a escala nacional, en los últimos 5 años y previsiblemente, para un futuro cercano; una valoración de los métodos, actualmente utilizados para el monitoreo de la deforestación, a escala nacional, regional y global, el área de estudio se localizó en los Llanos venezolanos, uno de los focos de deforestación; y finalmente, la estimación de las emisiones de CO₂ por procesos de deforestación y degradación del bosque, en este capítulo se seleccionó la Reserva Forestal de Caparo como área de estudio. De esta investigación se han derivado las siguientes conclusiones principales:

La disminución de los bosques venezolanos se debe a la combinación de causas principales y fuerzas motrices subyacentes que tienen mayor o menor fuerza dependiendo de su contexto geográfico e histórico. No obstante, se puede señalar que la causa principal y subyacente con mayor influencia en la deforestación ha sido la expansión agrícola y el crecimiento demográfico, respectivamente, ambas con el 41,8% de participación.

El patrón más frecuente de interacción entre causas principales y subyacentes desde la época precolombina hasta nuestros días y en las diferentes regiones del país, se derivó de las migraciones regionales, nacionales e internacionales que fomentaron la ocupación de tierras para el establecimiento de la agricultura. A su vez, este proceso de ocupación, estuvo alentado por factores políticos e institucionales, que aumentaron la actividad económica debido a la presión demográfica y a factores de tipo cultural.

Para el período de 1920-2008, se perdió el -26,43% (-17.935.800ha) de los bosques venezolanos, con una tasa promedio anual de -0,30%, siendo las zonas más afectadas del país, la región Noroccidental, específicamente los Llanos occidentales y el sur del Lago de Maracaibo. Por su parte, la mayor recuperación de bosques se produjo entre 1920-1960 con 8.699.600ha, mientras que las mayores pérdidas y

cambios netos se presentaron entre 1960-1982, con -15.168.200ha y -10.877.800ha, respectivamente. El período entre 1982 y 1995 fue el más crítico para todo el país, por presentar la tasa promedio anual de pérdida más alta del período de estudio con -0,93% (-528.522ha). A pesar de que en la última década ha habido una recuperación del bosque de 3,27% (1.631.600ha), debido principalmente al proceso de expansión natural, la deforestación continúa de manera alarmante con pérdidas de -288.000ha/año.

Derivado de estos datos se aprecia la necesidad urgente de evaluar, de forma frecuente, la deforestación en Venezuela. En este sentido, la teledetección se manifiesta como la fuente de datos más importante en la actualidad para estimar la dinámica forestal. La utilidad del seguimiento de la deforestación a partir de imágenes de satélite queda corroborado por distintos proyectos desarrollados en otros entornos tropicales. Sirvan como ejemplo Brasil que desde 1988 realiza anualmente, estimaciones de deforestación, con imágenes Landsat de 30m, utilizando como metodología de trabajo un enfoque wall-to-wall; también con ese método en la India, se evalúa la deforestación del país, bianualmente desde 1981 con imágenes Landsat 80 y 30m y con imágenes IRS P6- LISS III de 36,25m y 23,5m. También actualmente la FAO en unión con el JRC, estima la deforestación a escala global, a través del programa FRA 2010, desarrollando el proyecto TREESIII, en este caso el seguimiento se hace a partir de parcelas de muestreo.

La deforestación en Venezuela no se distribuye al azar o de manera uniforme, sino de manera concentrada en 17 zonas, 8 de estas zonas se localizaron al norte del río Orinoco, donde actualmente se localizan, el 8,63% de los bosques del país. Las pérdidas en algunas zonas de esta región superan la tasa media de deforestación del país (-0,6%), a pesar de que estos bosques se encuentran, en su mayoría, protegidos por áreas bajo régimen de administración especial. Las restantes 9 zonas identificadas se localizan al sur del río Orinoco, donde se ubica la Amazonía venezolana.

Los resultados de comparar las metodologías más utilizadas en la actualidad en la estimación de la deforestación nos indican que el método propuesto en el proyecto FRA RSS – TREES 3, seguida de CLASlite, PRODES y FSI, fueron las que mejor clasificaron las zonas de bosque y no bosque, en los ambientes tropicales de los Llanos venezolanos. Mientras, el método PRODES ofreció resultados ligeramente superiores a las demás en el momento de elaborar la cartografía de deforestación,

tanto en los resultados generados de la matriz de confusión, como los aportados por la regresión lineal.

Finalmente, el último estudio incluido en esta tesis nos permitió determinar que en la Reserva Forestal de Caparo, tanto la deforestación como la degradación del bosque generaron emisiones equivalentes de CO₂ de 1,67 Mt CO₂ año para el período 1990-2000 y de 0,94 Mt CO₂ año para el período 2000-2010. Estos resultados se obtuvieron combinando el análisis multitemporal de imágenes Landsat, y datos sobre la biomasa aérea almacenada en el bosque, tomados de parcelas permanentes, monitoreadas en los últimos 20 años.

Se demostró que sin ningún costo de adquisición de imágenes satelitales y de programas para su procesamiento, cualquier país en desarrollo que esté dispuesto a estimar las emisiones de CO₂ por deforestación y degradación del bosque, lo puede realizar, ya que en la actualidad estos son de dominio público, tal es el caso, de las imágenes obtenidas de la colección del USGS (<http://glovis.usgs.gov/>) ó del programa Spring del INPE de Brasil (<http://www.dpi.inpe.br/spring/>). Asimismo, se demostró que el uso de la guía de buenas prácticas del IPCC (IPCC, 2003 y 2006) y el seguimiento de las recomendaciones del GOF - GOLD (2010), son una buena alternativa para el monitoreo y la estimación de carbono.

Los resultados de esta tesis doctoral pueden ser considerados como un primer avance en los estudios de cambio climático y del ciclo de carbono, pérdida de biodiversidad, sostenibilidad de la agricultura o de sumidero de agua potable, ya que servirán para mejorar los datos de referencia, establecidos por la comunidad científica nacional e internacional.

De igual manera, estos resultados muestran como la deforestación y la degradación del bosque han contribuido históricamente a la reducción de la superficie boscosa del país. Como consecuencia de estos procesos, una cantidad de emisiones de carbono fueron liberadas a la atmosfera. Estas son desconocidas, sin embargo, contribuyen considerablemente al total de emisiones de CO₂ del país. Ejemplo de ello, la estimación realizada en una de las 17 áreas "hot spot" de deforestación, correspondiente a la RFC, que contribuyó con el 3,62% de las emisiones totales del país, en el año 2000 al 3,62% de las emisiones totales del país.

En este sentido, uno de los proyectos inmediatos de investigación que dará continuidad a esta tesis, será conocer con precisión las emisiones totales CO₂ generadas por los procesos de deforestación y degradación del bosque en el país, esto se logrará replicando la última investigación de la tesis en el resto de las áreas “hot spot” identificada en el Capítulo III.

Por otra parte, las líneas futuras de investigación deberán orientarse a la mejora en los *Datos de Actividades*, referidos a la extensión de la superficie deforestada y degradada, y de los *Factores de Emisión*, referidos a los coeficientes que cuantifican la cantidad de carbono. Ya que ambos son necesarios para estimar la emisión/ absorción de CO₂. Respecto a los Datos de Actividad se requiere continuar profundizando en los siguientes temas:

- Examinar otras técnicas digitales, para compararlas con la técnica aplicada en el análisis de la degradación del bosque.
- Comparar diferentes datos de sensores remotos, como las imágenes ópticas de alta y muy alta resolución, los datos LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) y los datos de RADAR (*Radio Detection and Ranging*).

En cuanto a los *Factores de Emisión* se pretende:

- Continuar con los trabajos de campo en las diferentes parcelas de Caparo para mejorar la estimación del carbono almacenado en la vegetación, así como realizar un análisis de diferentes estados sucesionales, tales como bosques secundarios, matorrales y pastizales, que también son afectados por la deforestación y la degradación, debido a que las emisiones asociadas a este proceso son aún un tema de discusión.
- Recopilar datos de campo donde se hayan medido los parámetros necesarios para estimar la biomasa de los bosques, estos datos pueden proceder de parcelas con fines científicos o de inventarios realizados para aprovechamiento forestal.
- Eventualmente, podrán realizarse estimaciones de biomasa, en aquellos bosques donde se carece de información, a partir de datos LIDAR.
- La mejora en el conocimiento de estos Factores de Emisión nos permitirá obtener un mapa de referencia de biomasa y de carbono para todo el país.

Por otro lado, tomando como referencia los resultados alcanzados en esta tesis se pueden recomendar otras acciones para reducir y controlar las emisiones. Estas acciones permitirán llevar a cabo la implantación de una estrategia REDD, para ello:

- Se hace preciso desarrollar un sistema de monitoreo permanente que contribuya a fortalecer la capacidad de muchas instituciones, a nivel nacional, interesadas en la reducción de la deforestación y la degradación de los bosques más amenazados del país.
- Discutir los aspectos legales y de soberanía que impliquen la transferencia de recursos económicos a nivel internacional ó en su defecto, establecer un sistema a nivel nacional, que funcione con recursos propios del país.
- Establecer actividades de conservación y manejo de la masa boscosa, como el establecimiento de plantaciones y sistemas agroforestales en aquellas áreas “hot spot” de deforestación identificada, éstas pueden ser impulsadas a través de incentivos económicos.
- Establecer políticas que permitan a través de iniciativas REDD+ o similares, la protección y conservación de los bosques remanentes, junto a ello, otras acciones como: fortalecer las políticas de reforma de la tierra, gestionar más efectivamente las áreas protegidas, mejorar la gobernanza forestal a través de nuevos planes de manejo forestal y reducir la demanda de tierras forestales.

Junto a estas acciones, es necesario fortalecer la conexión entre la investigación y la política, propiciando así que los trabajos científicos contribuyan a mejorar el proceso de toma de decisiones, relacionadas con la conservación y el uso sostenible de los bosques tropicales.

Todo ello permitirá a Venezuela cumplir con los compromisos adquiridos ante el IPCC de la UNFCCC, el cual fue firmado por 155 países en la “Cumbre de la Tierra”, con el propósito de estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero que producen el calentamiento global.