

Degradación forestal y emisiones de carbono por el aprovechamiento forestal selectivo en la reserva forestal Imataca

Forest degradation and carbon emissions due to selective forest use in the Imataca forest reserve

Carlos Pacheco-Angulo^{*,}, Dimas Hernández^{**} y Christopher Camargo^{**}**

Recibido: 01-04-2022 / Aceptado:

Resumen

Se realizó el estudio de degradación de bosques y emisiones de Carbono producidas por el aprovechamiento selectivo en la Reserva Forestal Imataca, ubicada en el escudo Guayanés sector suroriental del país. Se utilizó una metodología sustentada en el sistema TerraAmazon y la serie temporal Landsat, para estimar el bosque degradado y las emisiones de CO₂ producto del aprovechamiento forestal selectivo en la zona de estudio. La propuesta metodológica consta de cuatro pasos: recopilación de la información descriptiva y descarga de la serie temporal Landsat, elaboración de la cartografía de aprovechamiento forestal selectivo (AFS) y degradación forestal (DF), validación de las cartografías de AFS y de la DF y estimación de las emisiones de carbono comprometidas (CCE). Como consecuencia del aprovechamiento selectivo, se encontró que la superficie del bosque degradado es el equivalente al 5,6 % del área total de la reserva. De las diferentes actividades de aprovechamiento, la construcción de vialidad es la principal responsable de degradación del bosque, con un valor promedio de 63,29 %. Con respecto al arrastre y la construcción de patios de acopio, el arrastre representó 21,55 % y los patios de acopio el 15,31 %. La cantidad de madera extraída presentó una relación directa entre volumen de madera aprovechado y grado de degradación del bosque. En relación a las emisiones comprometidas por diferentes fuentes de las actividades de aprovechamiento forestal sobre la biomasa aérea y por el volumen madera recolectada en las unidades de manejo de la reserva, la fuente de acarreo originó la mayor cantidad de emisiones con 75,36% (719,7 Mg CO₂ e ha⁻¹), seguida de la fuente de arrastre con 14,27% (136,3 Mg CO₂ e ha⁻¹) y la

*Especialista para la estimación de Carbono-emisiones y secuestro de Carbono, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación – Venezuela (FAOVE), CP-1060, Caracas, Venezuela.

**Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, CP-5101, Mérida, Venezuela.

Pachecocar@gmail.com; dimashernandez@gmail.com; ccamargoroa@gmail.com.

fuelle de tumba con 10,37% (99 Mg CO₂ e ha⁻¹).

Palabras clave: Reserva Forestal Imataca, degradación de bosque, emisión de carbono, tala selectiva, TerraAmazon.

Abstract

A study of forest degradation and Carbon emissions produced by selective logging in Imataca Forest Reserve was done, located in the Guiana shield, southeastern sector of the country. We used a methodology using TerraAmazon system and Landsat time series to analyze forest degradation and CO₂ emissions in four phases: analyze of descriptive information available, download a Landsat time series, mapping and validation of selective logging and degraded forest areas and quantify of carbon emissions. Forest degradation due to selective logging is about 5.6 % of the total area of Imataca Forest Reserve. Logging roads is the main source of degradation with 63.29 % of total forest degradation, logging gaps represents 21.55 % and log landings represents 15.31 %. Timber extracted presents a direct relation between volume extracted and forest degradation. In relation to carbon emissions produced by the sources of selective logging and timber volume extracted in Imataca Forest Reserve, higher values for emissions is from skidding source with 75.36 % (719,7 Mg CO₂ e ha⁻¹), logging gaps source with 14.27% (136,3 Mg CO₂ e ha⁻¹) and felling source with 10.37% (99 Mg CO₂ e ha⁻¹).

Keywords: Imataca Forest Reserve, forest degradation, carbon emissions, selective logging, TerraAmazon.

1. Introducción

La deforestación es un proceso de cambio de uso de la tierra; en este caso la transformación de tierras cubiertas por bosques para dedicarlas a otros usos (Pacheco *et al.*, 2011; Wheeler *et al.* 2021); es decir, la conversión de bosque en tierras no boscosas (Pacheco *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2021). Implica eliminar la cobertura de árboles para dedicar la tierra a otras actividades como la agricultura, minería, creación y mantenimiento de infraestructura, expansión de ciudades, entre otras (García, 2016). Por otra parte, la degradación del bosque se refiere a superficies boscosas que pierden parte de su cobertura debido a causas antropogénicas o naturales, pero no pierden su condición de bosque (Chen *et al.*, 2021) dando como resultado

alteraciones que afectan negativamente la estructura y/o función del rodal y el sitio, y disminuyen la capacidad para sostener un suministro continuo de productos y/o servicios (FAO, 2002). Esta degradación es un proceso gradual el cual ocasiona daños a largo plazo aun cuando se mantiene la permanencia del bosque (Gao *et al.*, 2020). De las cuatro causas más importantes que producen degradación del bosque, dos se encuentran asociadas directamente con la deforestación: la fragmentación del bosque y los efectos de borde; las otras dos causas corresponden a la ocurrencia de incendios forestales y el aprovechamiento selectivo (Beuchle *et al.*, 2021). Aun cuando se trata de conceptos diferentes, existe una fuerte relación entre deforestación y degradación de los bosques: en muchos casos la degradación es un precursor de deforestación, aunque en otras ocasiones los bosques pueden permanecer degradados durante mucho tiempo sin llegar al estado de deforestación (Armenteras y González, 2016).

En los últimos años, la degradación del bosque ha cobrado especial interés para la comunidad científica debido al potencial efecto que tiene con respecto a las emisiones de Carbono (Chen *et al.* 2021). Algunas estimaciones indican que hasta un 70% de las emisiones de Carbono provenientes de tierras boscosas corresponden a degradación del bosque observándose que el área afectada anualmente por procesos de degradación es hasta diez veces mayor que el área afectada por deforestaciones (Wheeler *et al.* 2021). Numerosos países han enfocado su atención a los bosques tropicales. Esta atención se debe a la importancia que tienen estos ecosistemas en el cambio climático, la conservación de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos (Casarim *et al.*, 2017).

Los bosques tropicales sirven de hábitat a más de 45.000 especies de árboles, almacenan el 66% de la biomasa terrestre (Gao *et al.*, 2020) y juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático. La deforestación y degradación de estos bosques representan emisiones de Carbono de 2,01 Pg año⁻¹. Se estima que más de 400 millones de ha de bosques tropicales son clasificados como bosques productores, observándose que las emisiones anuales de Carbono como consecuencia del aprovechamiento selectivo oscilan entre 800 y 2.000 Tg de CO₂ (Derroire *et al.* 2021). Estos bosques se encuentran sometidos a una alta presión de deforestación y degradación lo cual se refleja con pérdidas de más

de 2.000 Km² entre los años 2000 y 2012 (Gao *et al.*, 2020). Así como en algunas zonas de la Amazonía peruana, la tasa de deforestación disminuyó en 13% entre 2016 y 2017, en Brasil, especialmente en la región de Acre, aumentó a 25.700 ha en el 2017, 44.000 ha en el 2018 y 68.200 ha en el 2019 (Reygadas *et al.*, 2019).

Los principales bosques tropicales se encuentran en la Amazonía. Son bosques donde el proceso de degradación ha venido aumentando continuamente y, en la actualidad, ocupan mayor superficie que la representada por tierras deforestadas. La degradación forestal inducida por actividades humanas es el principal impulsor del deterioro socioambiental en la Amazonía y su extensión sigue aumentando. Durante el período 2003-2015 en la Amazonía brasileña, las emisiones de CO₂ derivadas de los incendios forestales (5.904 Tg) y de los efectos de borde (2.068 Tg) alcanzaron a significar el 88% de las emisiones por deforestación (9.108 Tg) (Silva Junior *et al.*, 2021). Las emisiones anuales de degradación forestal de 74 países en desarrollo, los cuales cubren cerca de 2,2 billones de hectáreas de bosques, representaron 2,1 billones de toneladas de CO₂ entre 2005 y 2010, de las cuales 53% se derivaron del aprovechamiento forestal, 30% de la recolección de leña y 17% de incendios forestales (Casarim *et al.*, 2017). El aprovechamiento selectivo, es decir la cosecha de pocos árboles por ha, es una actividad importante en los bosques tropicales y a menudo se percibe como una de las principales fuentes de degradación del bosque debido a la pérdida de biomasa asociada a los árboles extraídos, daños asociados con el aprovechamiento y el establecimiento de infraestructura (Derroire *et al.*, 2021). Adicionalmente, la degradación de bosques representa un incremento de las emisiones de Carbono contribuyendo con un 25% de las emisiones en los ambientes de bosques tropicales, con el aprovechamiento o tala selectiva como principal agente causal de la aparición de bosques degradados (Armenta-Montero *et al.*, 2020).

La tala selectiva es una de las principales metodologías de aprovechamiento del bosque y contribuye con un 15% del suministro de madera a escala global; sin embargo, también ha ocasionado una disminución de la capacidad productiva del bosque, un aumento en la tasa de degradación y de las emisiones de carbono, además de alterar el hábitat natural de especies silvestres (Poudyal *et al.*, 2019). El monitoreo del impacto por la tala selectiva es importante para mejorar el manejo forestal y la certificación de sostenibilidad, además de lograr la reducción de las emisiones de Carbono y los objetivos de conservación

de la biodiversidad (Hernández-Gómez *et al.*, 2020). El efecto del aprovechamiento selectivo en los bosques tropicales es muy variado. Se han reportado cambios en la composición florística, estructura del bosque, ciclo de nutrientes y en la diversidad genética. Por ejemplo, en bosques de la reserva ecológica de Guaxindiba (Brasil), al comparar bosques no aprovechados con bosques sometidos a extracción selectiva de madera, no se presentan diferencias significativas en cuanto al número de árboles por ha pero se encontraron alteraciones en la estructura del dosel al presentarse un incremento de la abundancia relativa de especies de las primeras etapas de bosques secundarios, un dosel abierto y disminución en las reservas de nutrientes en los bosques aprovechados mientras que los árboles de mayores dimensiones y las mayores alturas de dosel correspondieron a las zonas no aprovechadas (Villela *et al.*, 2006). Pérez (2019), en bosques semidecíduos de Guanahacabibes (Cuba), evidenció la afectación del estrato arbóreo superior en bosques sometidos a tala selectiva al encontrarse un estrato con aberturas o claros además de una disminución en la cantidad de árboles con diámetros superiores a 10 cm a medida que aumenta la intensidad del aprovechamiento.

A nivel de América Latina, se han realizado diferentes estudios de cuantificación de emisiones de Carbono a partir de bosques degradados. Armenta-Montero *et al.* (2020), estudiando dos zonas boscosas de Yucatán (México) sometidas a aprovechamiento selectivo, reportan que las emisiones de Carbono son de 1,3 a 1,5 Mg/m³ y un promedio de 1,32 Mg de Carbono/ha al año. Casarim *et al.* (2017) señalan que en Colombia, para el período 2010-2017, el total de las emisiones de la tala selectiva es aproximadamente 1,1 millones de tCO₂e entre 2010 y 2017, con un promedio anual de 140.652,8 tCO₂e/año. En Venezuela, el reporte más importante es el presentado por Pacheco-Angulo *et al.* (2021) donde indican que bajo el aprovechamiento selectivo en baja intensidad ($2,8 \pm 1,2$ árboles por ha ó $10,5 \pm 4,6$ m³ por ha) se producen emisiones de Carbono de $61 \pm 21,9$ Mg C/ha en una Unidad de Manejo de la Reserva Forestal Imataca. Por otra parte, en la Reserva Forestal Caparo se reportaron emisiones de Carbono de $2,21 \pm 0,32$ MtC/año para el período 1990-2000 y $1,56 \pm 0,19$ MtC/año para el período 2000-2010 y se redujo hasta $0,8 \pm 0,11$ MtC/año para el período 2010-2015 (Pacheco-Angulo *et al.*, 2017).

La Reserva Forestal Imataca posee una superficie boscosa que forma parte del Escudo Guayanés, sin embargo, tradicionalmente desde el punto de vista geográfico ha sido considerada como parte de la Amazonía (Eva y Huber, 2005; RAISG, 2009, 2015). Para el período 2000-2020, entre el 96 y 97% de la superficie total (3.827.517 ha) de la reserva está bajo cobertura boscosa, no obstante, en este período, el bosque degradado presentó incrementos significativos de 83.168 ha (Pacheco-Angulo y Hernández, (En revisión)). Algunos estudios (Delaney *et al.*, 1997; Avitabile *et al.*, 2016) indican que la región representa una de las áreas más ricas en carbono de Venezuela con un promedio de $205 \pm 15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en la biomasa aérea. El Fondo Mundial para la Naturaleza (siglas en inglés WWF) la incluye como uno de los frentes de deforestación identificados en América Latina con las actividades agrícolas y mineras como causas principales de transformación de las superficies boscosas (Pacheco *et al.*, 2021). La tala selectiva es la principal actividad de aprovechamiento forestal que se ha aplicado en la reserva desde la década de los 80 a través de los planes de manejo asignados en las diferentes unidades que conforman la reserva (Noguera *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2014; Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).

La alta tasa de degradación de bosque y su efecto en la emisión de Carbono hace indispensable establecer metodologías adecuadas para su determinación y cuantificación. Para cuantificar las emisiones de carbono causadas por la degradación forestal como resultado de la tala selectiva, se pueden utilizar dos técnicas analíticas: la primera combina tasas de tala, planes de manejo e imágenes de alta resolución para datos de actividad y el enfoque de ganancia / pérdida para emisión (Pearson *et al.*, 2014; Ellis *et al.*, 2019); el segundo, combina la detección remota de imágenes de resolución media para los datos de actividad y una evaluación de los cambios en las existencias de carbono para los factores de emisión (IPCC, 2019; GFOI, 2020). Los datos de actividad pueden obtenerse mediante un método directo, identificando y mapeando el daño del dosel o mapeando el daño del dosel en combinación con bosques intactos y parches de regeneración (Souza *et al.*, 2005; Pacheco-Angulo *et al.*, 2017, 2021; IPCC, 2019; Ota *et al.* 2019; Shimabukuro *et al.*, 2019; Bullock *et al.*, 2020; Hernández-Gómez *et al.*, 2020). Utilizando un método indirecto que implica identificar la tala selectiva en las imágenes, y la adición de áreas de amortiguamiento a través de herramientas del sistema de información geográfica (SIG), se puede cuantificar el área de bosques degradados debido a la tala (Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).

En este estudio se propone determinar el balance o secuestro de Carbono en un bosque de la Orinoquia venezolana (Reserva Forestal de Imataca) aplicando una adaptación al enfoque analítico propuesto por Pacheco-Angulo *et al.* (2021) basado en una serie de tiempo Landsat desarrollado para el Sistema de Monitoreo de la Deforestación de la Amazonía (TerraAmazon). Se considera que esta es una ventaja importante para realizar una evaluación de la degradación forestal producida por el aprovechamiento forestal selectivo en la Reserva Forestal Imataca de Venezuela durante un período de 36 años (1984-2020) en diferentes condiciones.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

La Reserva Forestal Imataca se encuentra ubicada en el sureste de Venezuela, entre los estados Bolívar y Delta Amacuro. Fue decretada como Reserva Forestal en el año 1961, tiene un área total de 3.821.900 ha, lo cual representa el 8,1 % del área de Venezuela (RBV, 2004). Políticamente, forma parte de los municipios Casacoima y Antonio Díaz del estado Delta Amacuro y de los municipios Sifontes, Padre Pedro Chien, Roscio y Piar del estado Bolívar (Berroterán, 2003). Azuaje (2018) señala que fue declarada como Reserva Forestal según Resolución N° 47 del Ministerio de Agricultura y Cría denominándose originalmente Reserva Forestal Selva El Dorado con una superficie de 600.000 ha. Posteriormente el Ministerio de Agricultura y Cría (MAC) modificó la Resolución N° 47 por la Resolución N° 15 del 7 de enero de 1963 ampliando la superficie de la reserva y denominándola Reserva Forestal Imataca. Se encuentra en la zona de vida de bosque húmedo tropical de acuerdo con el Sistema de Clasificación de Holdridge (Ewel *et al.*, 1976), presentando una precipitación promedio es de 1.000-3.000 mm/año, temperatura de 25-27 °C/año y una evapotranspiración de 1.250-1.400 mm/año (Fick y Hijmans, 2017). Según el Plan de Ordenación y Reglamento de Uso (PORU) se encuentra dividida en 23 unidades de manejo (RBV, 2004): la zona norte (2.046.451 ha) con doce unidades de las cuales una fue destinada a la producción de palmito (*Euterpe oleracea* Mart.), nueve a la producción de madera y dos para Reserva; la zona central (754.435 ha) y la zona sur (771.100 ha), cada una con seis unidades destinadas a la producción de madera (Figura 1). El manejo forestal a través de concesiones comienza en 1971: la Unidad N-I la cual fue otorgada a la empresa Ercole de Santis (Azuaje, 2018).

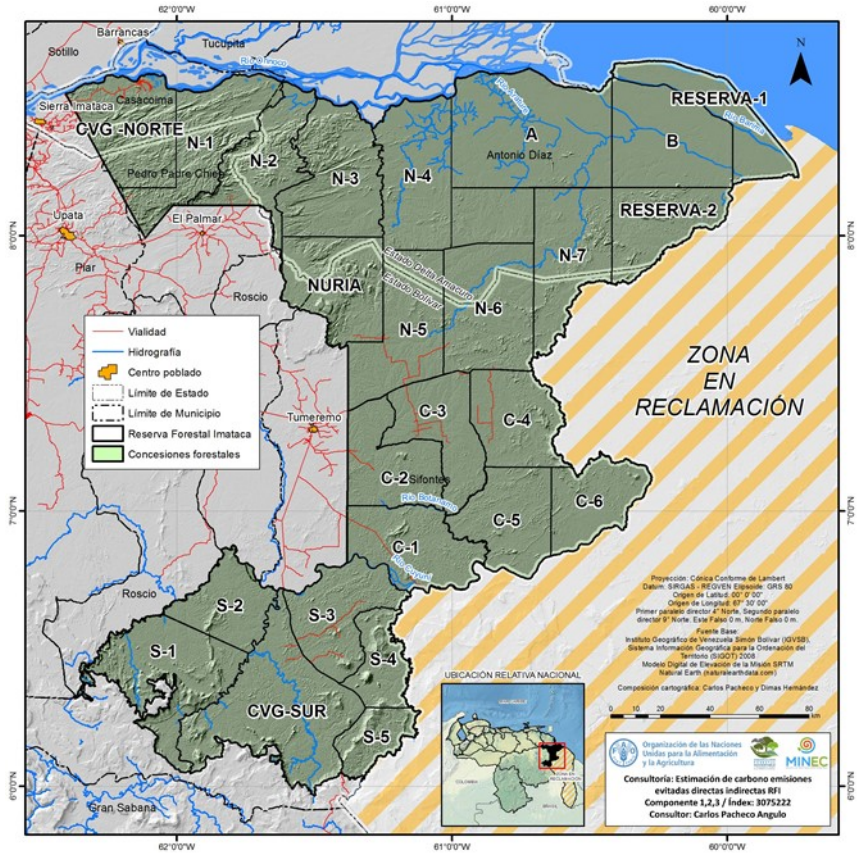


Figura 1. Ubicación relativa de la Reserva Forestal Imataca y sus unidades de manejo. Fuente: elaboración propia.

2.2. Materiales

2.2.1. Información descriptiva

Se tomaron en consideración cuatro aspectos fundamentales:

La información de aspectos legales, específicamente de la Ley de Bosques (RBV, 2013) y del Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso (PORU) de la Reserva Forestal Imataca (RBV, 2004).

Las directrices y orientaciones metodológicas, establecidas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), como el Refinamiento 2019 de las Directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2019), las Directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2006), y las Orientaciones de Buenas Prácticas (OBP) para Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) de 2003 (IPCC, 2003), y por organizaciones internacionales como la Iniciativa Mundial de Observación del Bosque de 2020 (GFOI, 2020) y las Observaciones Mundiales de la Cubierta Forestal y la Dinámica del Uso de la Tierra de 2016 (GOF-C-GOLD, 2016).

La información suministrada por la Dirección General de Patrimonio Forestal (DGPF) del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MINEC), relacionada con el aprovechamiento forestal selectivo en la reserva (Azuaje, 2018).

Los estudios científicos en materia de degradación forestal, aprovechamiento forestal selectivo y emisiones/absorciones de carbono productos de estas actividades.

2.2.2. Datos Cartográficos

Información básica

Se consideró como información cartográfica básica la generada por la DGPF del MINEC, a través de la materialización de los linderos de las unidades de manejo forestal que establece el PORU de la reserva, y de los compartimientos que establecieron las empresas madereras para los Planes de Ordenación y Manejo Forestal de dichas unidades. De igual manera, se consideró información de la cobertura vegetal propuesta por el antiguo Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables a través de los proyectos Recopilación y Análisis de Información Básica existente acerca de la Reserva

Forestal Imataca (CIERFI-MARN, 2001).

Serie de tiempo Landsat

Se utilizaron 1225 imágenes correspondiente a la serie temporal Landsat 4, 5, 7 y 8 sensores MSS, TM, ETM+ y OLI, con un nivel de corrección geométrica L1, las cuales pertenecen a los path/row 232/005, 2333/054 y 233/055. Estas se obtuvieron de la colección del Servicio Geológico de Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov/>), con un nivel de procesamiento L1T. El período de tiempo para estos conjuntos de datos se seleccionó aproximadamente entre uno y dos años después que ocurriera el aprovechamiento forestal selectivo, ya que el cierre rápido del dosel después de una perturbación y la revegetación del sotobosque inferior pueden inhibir la detección de la tala (Asner *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2009; Bullock *et al.*, 2020).

2.3. Métodos

La metodología empleada se basó en la adaptación de la propuesta planteada por Pacheco-Angulo *et al.*, (2021), sustentada en el sistema TerraAmazon y la serie temporal Landsat, para estimar el bosque degradado y las emisiones de CO₂ producto del aprovechamiento forestal selectivo en la región de la Amazonía venezolana.

Dicha adaptación metodológica consta de cuatro pasos: recopilación de la información descriptiva y descarga de la serie temporal Landsat, elaboración de la cartografía de aprovechamiento forestal selectivo (AFS) y degradación forestal (DF), validación de las cartografías de AFS y de la DF y estimación de las emisiones de carbono comprometidas (CCE). A continuación, se presentan el desarrollo de dichos pasos.

2.3.1. Recopilación de información descriptiva y de datos cartográficos

La información suministrada por la DGPF del MINEC fue compilada por Azuaje (2018) y actualizada con los funcionarios de dicha dirección. Específicamente se consideró la relacionada con el aprovechamiento forestal selectivo: fechas de aprovechamiento, número de árboles y volúmenes de madera autorizados y recolectados, superficies autorizadas y aprovechadas de cada compartimiento.

Dicha información se utilizó para definir con exactitud las fechas de las imágenes requeridas de la serie temporal de Landsat y ubicar espacialmente las unidades de manejo forestal con sus compartimientos. También se utilizó para realizar la estimación de las emisiones de CO₂, relacionándola con la cartografía generada de aprovechamiento forestal selectivo y degradación forestal.

2.3.2. Elaboración de la cartografía del aprovechamiento forestal selectivo (AFS) y degradación forestal (DF)

Tal y como lo plantearon Pacheco-Angulo *et al.*, (2021), para la elaboración de la cartografía de AFS y DF se aplicaron los siguientes pasos:

Configuración el sistema TerraAmazon que incluyó desde la creación de una base de datos en PostgreSQL, hasta la definición de las reglas y área de control (INPE-FUNCATE, 2013).

Exportación del conjunto de datos de la serie temporal de Landsat, para obtener el modelo lineal de mezcla espectral (MLME) de Shimabukuro (1991), en cada imagen.

Selección, a partir del MLME, de la capa sintética de suelo para aplicarle una máscara de nube y sombra de nube según los criterios de Vidal *et al.* (2015).

Con la fracción suelo, sin nubes ni sombra de nubes, se realizó una clasificación binaria con y sin aprovechamiento forestal selectivo (Shimabukuro *et al.*, 2019; Souza y Barreto, 2000), utilizando el algoritmo de árbol de decisión y el umbral que define por debajo de 37% evidencias de no aprovechamiento y entre 37 y 100% evidencias de aprovechamiento (Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).

Las diferentes actividades de aprovechamiento forestal selectivo se clasificaron cartográficamente, considerando los patios de acopio, vías de aprovechamiento y áreas de arrastres (Souza, 2013; GOF-C-GOLD, 2016).

A partir de la cartografía de AFS de cada uno de los compartimientos de las unidades de manejo, se determinó de manera indirecta la cartografía de DF, la cual se obtuvo mediante aplicación de un búfer cuadrado que consideró 300 m de umbral (Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).

2.3.3. Validación de las cartografías de AFS y de la DF

Para estimar la incertidumbre de la cartografía de AFS, se validó con una fuente externa que se consideró una representación realista de las características en el terreno (Chuvieco, 2016; Olofsson *et al.*, 2020). Esta se obtuvo de las composiciones a falso color 453 de Landsat 4, 5 y 7, y la composición 564 de Landsat 8 que se emplearon para generar el MLME. Sobre las mismas se determinaron de manera aleatoria 100 puntos de verdad-terreno de las categorías patio de acopio, vía forestal y área de arrastre. Estas muestras de verdad-terreno permitieron estimar con precisión y rapidez la calidad temática del mapa de tala selectiva (Congalton y Green, 2009), mediante la construcción de la matriz de confusión, de la cual se calcularon los errores de omisión y comisión, el nivel de precisión global y el índice kappa (Olofsson *et al.*, 2014).

La cartografía de degradación forestal fue validada mediante la comparación de las áreas obtenidas de la cartografía versus las medidas en el terreno reportadas por las empresas madereras, con ambas áreas se calcularon los errores de comisión y omisión (Congalton y Green, 2009).

2.3.4. Estimación de las emisiones de carbono comprometidas (CCE)

Para estimar las emisiones de CO₂ en el marco de las directrices del IPCC, se asumieron algunos supuestos simplificadores que permitieron establecer, en función de los datos y de los Niveles del IPCC, los métodos para las estimaciones (IPCC, 2006, 2019). Dichos supuestos son los siguientes:

Para simplificar el proceso de contabilidad de carbono se utilizó el enfoque de emisiones comprometidas, es decir, las emisiones que ocurren en su totalidad en el momento del aprovechamiento forestal selectivo. De igual manera se utilizó la suposición simplificadora del Nivel 1 del IPCC, que todo el carbono eliminado es emitido en el momento de su eliminación (Pearson *et al.*, 2014; IPCC, 2019).

Las emisiones de AGB se estimaron en cada compartimento, multiplicando las áreas de degradación forestal obtenidas de manera indirecta del mapa de aprovechamiento forestal selectivo (DA) por el valor promedio de emisiones de carbono de cada área (FE) planteado por Pacheco-Angulo *et al.* (2021). Estas se asociaron a las actividades de aprovechamiento forestal selectivo para conocer sus

influencias en las emisiones totales.

Se utilizaron los valores reportados de madera extraída de cada compartimento, para estimar las pérdidas de carbono del aprovechamiento, calculando el carbono equivalente del volumen de madera en rollo extraída, que consideró la densidad específica de la madera para obtener AGB. Se utilizó un factor de 0,5 para estimar la cantidad de carbono (Brown *et al.*, 2005; Feldpausch *et al.*, 2005).

Se vincularon los datos a las tres fuentes principales de emisiones propuestas por Pearson *et al.* (2014) y Ellis *et al.* (2019): (1) madera en rollo extraída con emisiones por tumba, (2) áreas de arrastre con emisiones por arrastre; (3) patios de acopio y vías forestales con emisiones por acarreo.

Finalmente, los valores del cambio neto de carbono en los diferentes depósitos se transformaron en valores de emisiones y absorciones equivalentes de dióxido de carbono (CO₂), multiplicando la cantidad estimada de carbono (expresada en Mg C ha⁻¹) por 44/12, que es la relación del peso molecular del carbono (Mg CO₂ e ha⁻¹) (IPCC, 2006).

3. Resultados and Discusión

3.1 Incertidumbre de la cartografía de aprovechamiento forestal selectivo (AFS) y degradación forestal (DF)

Los resultados de la matriz de confusión de la cartografía de AFS, arrojó que la vialidad fue la categoría que presentó mayor acierto con 93%, confundándose con la categoría patio de acopio en un 5% y áreas de arrastre en un 2%. La categoría de menor acierto fue la de áreas de arrastre con 88%, la cual se confundió con vialidad en un 12%. En relación a los errores de comisión (usuario) la categoría que presentó mayor valor fue la vialidad con 10,6%, y a los errores de omisión (productor) la categoría con mayor valor fue patios de acopio con 13% (Cuadro 1). A nivel de precisión global, la cartografía de AFS tuvo un valor de 89,33%, considerado según el GOFC-GOLD (2016), aceptable debido que es encuentran dentro de sus límites establecido entre 80 a 95%. Por su lado, el coeficiente k fue de 0,85, valor que según Landis y Koch (1977) posee una concordancia casi perfecta, debido a que se encuentran dentro de sus rangos 0,81 – 1,00.

Cuadro 1. Matriz de confusión y errores de comisión y emisión de la cartografía de AFS.

Verdad-Terreno				
Clases	Arrastre	Patio	Vialidad	Total
Arrastre	88	3	2	31
Patio	0	87	5	30,7
Vialidad	12	10	93	38,3
Total	100	100	100	100
Errores (%)				
Comisión	1,1	1,1	10,6	
Omisión	12	13	7	

Las áreas de degradación forestal en los 79 comportamientos aprovechados, tanto la reportada por las empresas madereras como las cartografiadas, arrojó que la de menor tamaño fue la PI 2 de la unidad de manejo de Nuria, con 597 ha reportada y 661 ha cartografiada; mientras que, la de mayor tamaño fue el compartimiento C7 con 6.069 ha reportada, y el compartimiento C2 con 6.284 ha cartografiada, ambos de la unidad de manejo C4 (Figura 2a). El 52% de las áreas de degradación de los compartimientos aprovechados tuvieron error de comisión (valor por encima de los reportados por las empresas madereras en el campo) y el 48% error de omisión (valor por debajo de los reportados por las empresas madereras en el campo). El error máximo de comisión lo presentó el compartimiento C13 de la unidad de manejo de Nuria con -19,9% y el mínimo la PI 2 de CVG-Norte con -0,6%, mientras que el mayor error omisión lo presentó el compartimiento C1 de la unidad de manejo N5 con 18,7%, y el mínimo el C14 de Nuria con 0,9 (Figura 2b).

Para tener una mayor comprensión entre las áreas de DF reportadas por las empresas madereras y las cartografiadas, se realizó un gráfico de dispersión de ambas para los compartimientos aprovechados, en este se puede apreciar que la relación del tamaño de ambas áreas es positiva, el ajuste de este modelo según el cálculo de R^2 es de 0,9112, es decir, el modelo explica el 91,12% de las áreas de DF cartografiadas a las áreas reportadas por las empresas (Figura 2c).

3.2. Degradación forestal y aprovechamiento forestal selectivo de la Reserva Forestal Imataca

De las 22 unidades de manejo forestal establecidas en el PORU para la reserva, desde la década de los ochenta hasta nuestros días, se han aprovechado once. No obstante, una de las unidades orientó su producción a un producto no maderero: la Unidad A, a cargo de la Empresa concesionaria Alimentos Delta C.A. (ALIDECA), la cual ejecutó 12 planes anuales desde 1983 hasta 2010, para la producción de palmito (*Euterpe oleracea* Mart.), actividad que genera perturbaciones que no son detectables con las imágenes Landsat, razón por la cual la degradación forestal en la RFI se analizó en 10 unidades.

A continuación, se presentan los resultados y análisis de degradación directa e indirecta generada por el aprovechamiento forestal selectivo para cada una de las unidades de manejo. En la figura 3 se aprecian espacialmente los compartimientos, en ellos se detallan, tanto la degradación directa, generada por el establecimiento de los patios de acopio (color rojo), la construcción de vías de aprovechamiento (color amarillo) y las zonas de arrastres (color rosado); como la indirecta, que se generó a partir de la directa (color verde). Asimismo, se observan sus métricas para cada compartimiento. En la degradación directa se analizan las perturbaciones en función de las actividades empleadas en el aprovechamiento (patios de acopios, vías de aprovechamiento y zonas de arrastre). En la degradación indirecta se analizan las áreas originadas de cada compartimiento dentro de la unidad.

En la primera unidad de manejo, denominada CVG - Sierra Imataca Sector Sur, se concedieron cuatro autorizaciones que fueron ejecutadas desde el año 1985 hasta 1992. Las tres primeras se otorgaron como parcelas de investigación (PI 1-3), es decir, sin un plan de aprovechamiento, y la última con plan de aprovechamiento anual (C1). Directamente los cuatro compartimientos afectaron el dosel del bosque en 574 ha; el 46,2% (265 ha) por las actividades de arrastre; el 43,4% (249 ha) por la construcción de 92 km de vías con

una intensidad de 2,7 km/ha; y el 10,4% (60 ha) por construcción 60 de patios de acopios con un promedio de 2,7 patios/ha. Indirectamente el aprovechamiento forestal selectivo degradó al bosque en 6.242 ha. El 9,25% de esta degradación fue detectada por los datos de sensores remotos directamente (Figura 3a, Anexo 1.1).

Por su parte, la unidad de manejo N-2 fue otorgada en concesión a la empresa Corporación de Desarrollo Forestal S.A. (CODEFORSA), quien ejecutó actividades de aprovechamiento forestal selectivo durante el periodo comprendido entre 1984 y 2010. En este periodo, dicha empresa aprovechó 14 compartimientos: los dos primeros fueron otorgados sin el plan anual de aprovechamiento como parcelas de investigación (PI 1, PI 2) para 1984 y 1985, y los 12 compartimientos restantes (C1-C12) con plan anual desde 1987 hasta 2010. Las actividades de aprovechamiento ejecutadas en estos compartimientos afectaron directamente 2.042 ha de dosel: el 46,5% (951 ha) por la construcción de 416 km de vías con una intensidad de 2,3 km/ha; el 28,6% (584 ha) por las actividades de arrastre; y el 24,8% (507 ha) por construcción 799 de patios de acopios con un promedio de 1,6 patios/ha. Indirectamente el aprovechamiento forestal selectivo degradó 32.813 ha de bosque; el 6,31% de esta degradación fue detectada por los datos de sensores remotos de manera directa (Figura 3b, Anexo 1.2).

En relación a la unidad N-3 fue otorgada a la empresa concesionaria Sociedad Maderera de Guayana (SOMAGUA), quien realizó actividades de aprovechamiento forestal selectivo en cuatro compartimientos durante 1982 y 1992, dos sin planes anuales de aprovechamiento denominados parcelas de investigación (PI 1, PI 2) y dos con planes anuales (C1, C2) en 1987 y 1992. El área del dosel afectada directamente por estas actividades fue de 605 ha, el 65,3% (395 ha) por la construcción de 140 km de vías con una intensidad de 2,8 km/ha; el 29,8% (180 ha) por construcción 266 de patios de acopios con un promedio de 1,4 patios/ha; y el 4,9% (30 ha) por las actividades de arrastre. Indirectamente el aprovechamiento forestal selectivo degradó 8.315 ha de bosque; el 7,1% fue detectada por los datos de sensores remotos de manera directa (Figura 3c, Anexo 1.3).

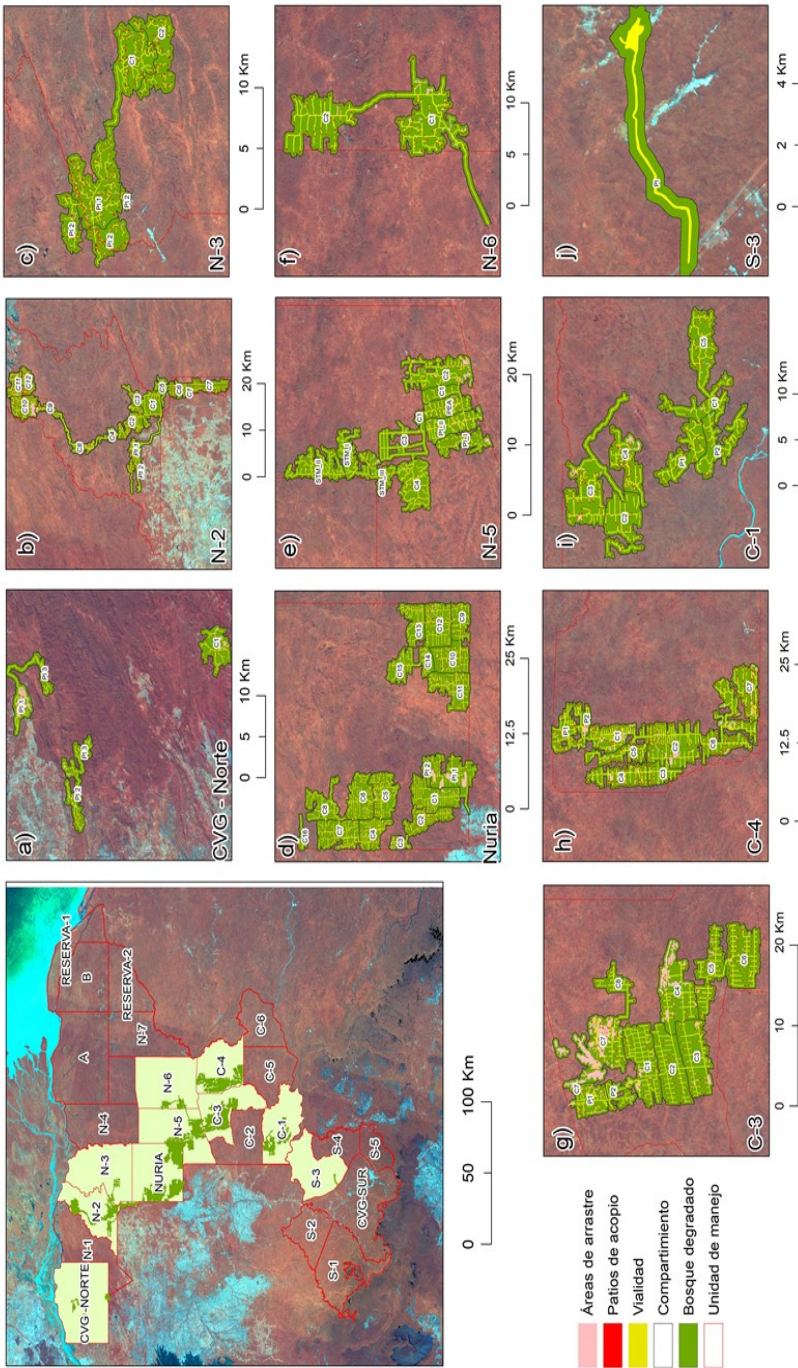


Figura 3. Degradación directa (áreas de arrastre, patios de acopio, vialidad) e indirecta (bosque degradado) en diez unidades de manejo de la Reserva Forestal Imataca. Fuente: elaboración propia.

La unidad de manejo otorgada en concesión a la Empresa Maderas Nuria I C.A. ha ejecutado 18 planes anuales, distribuidos en dos Parcelas de Investigación (PI 1 y PI 2) y 16 planes anuales (C1-16). Desde 1995 hasta 2007 se ejecutaron los primeros 12 planes, luego por cinco años entró en receso y después continuó con la ejecución hasta nuestros días. Las actividades de aprovechamiento ejecutadas a través de estos planes afectaron directamente 3.512 ha de dosel, de los cuales el 58,3% (2.047 ha) fue por la construcción de 787 km de vías con una intensidad de 2,6 km/ha; el 25,1% (882 ha) por la construcción de 1.758 patios de acopios con un promedio de 2 patios/ha; y el 16,6% (583 ha) por las actividades de arrastre. Indirectamente el aprovechamiento forestal selectivo degradó 49.648 ha de bosque. El 6,85% fue detectada por los datos de sensores remotos de manera directa (Figura 3d, Anexo 1.4).

En relación a la unidad de manejo N-5 fue otorgada inicialmente a la Empresa concesionaria Industria Técnica de Maderas C.A. (INTECMACA), la cual ejecutó siete planes de anuales, distribuidos en dos Parcelas de Investigación (PI 1 y PI 2) en 1985 y 1987, una Parcela Especial de Aprovechamiento (PEA) en 1988 y cuatro planes en 1990 hasta 1995 (C1-C4). Posteriormente esta unidad de manejo entró en receso hasta el 2012 donde fue otorgada a la Empresa Nacional Forestal (ENAFOR), la cual ejecutó tres planes desde 2012 hasta 2019 (STM I, II, y III). Las actividades de aprovechamiento ejecutadas por las dos empresas a través de estos planes, afectaron directamente 2.560 ha de dosel, el 74,2% (1.900 ha) fue por la construcción de 421 km de vías con una intensidad de 4,4 km/ha; el 15,5% (398 ha) por las actividades de arrastre; y el 10,3% (263 ha) por la construcción 569 patios de acopios con un promedio de 2,2 patios/ha. Indirectamente el aprovechamiento degradó 26.453 ha de bosque, el 9,4% de esta degradación fue detectada directamente por los datos de sensores remotos directa (Figura 3e, Anexo 1.5).

La unidad de manejo N-6 fue otorgada en concesión a la Industrializadora de Productos Forestales C.A. (INPROFORCA), la cual ejecutó dos planes anuales de aprovechamiento forestal (C1 y C2), el primero en 1996 y el segundo en el 2005. Los mismos afectaron directamente 854 ha de dosel, el 81,9% (700 ha) fue por la construcción de 117 km de vías con una intensidad de 6 km/ha; el 9,9% (85 ha) por las actividades de arrastre; y el 8,1% (69 ha) por la construcción 76 patios de acopios con un promedio de 1,1 patios/ha.

Indirectamente el aprovechamiento degradó 8.028 ha de bosque, el 10,5% fue detectada directamente por los datos de sensores remotos (Figura 3f, Anexo 1.6).

En relación a la unidad de manejo C-3 fue otorgada a la Empresa concesionaria Consorcio Maderero Forestal (COMAFOR), la cual ejecutó 10 planes anuales, distribuidos en dos Parcelas de Investigación (PI 1 y PI 2) en 1991 y 1993 y ocho planes de aprovechamiento (C1-C8) desde 1995 hasta 2010. Las actividades de aprovechamiento ejecutadas a través de estos planes afectaron directamente 4.785 ha de dosel, el 48,5% (2.322 ha) fue por la construcción de 453 km de vías con una intensidad de 5,1 km/ha; el 45,4% (2.171 ha) por las actividades de arrastre; y el 6,1% (292 ha) por la construcción 371 patios de acopios con un promedio de 1,25 patios/ha. Indirectamente el aprovechamiento degradó 31.782 ha de bosque y el 13,4% de esta degradación fue detectada directamente por los datos de sensores remotos directa (Figura 3g, Anexo 1.7).

Por su parte, la unidad de manejo C-4 fue otorgada a la Empresa concesionaria Hermanos Hernández, la cual ejecutó nueve planes anuales, distribuidos en dos Parcelas de Investigación (PI 1 y PI 2) en 1992 y 1993 y siete planes (C1-C7) desde 1995 hasta 2005. El aprovechamiento forestal selectivo realizado en los nueve compartimientos afectó el dosel directamente en 4.597 ha, de los cuales el 70,2% (3.227 ha) fue por la construcción de 469 km de vías con una intensidad de 6,9 km/ha; el 17,3% (795 ha) por las actividades de arrastre; y el 12,5% (576 ha) por la construcción 421 patios de acopios con un promedio de 1,4 patios/ha. Indirectamente el aprovechamiento degradó 31.782 ha de bosque; el 13,4% de esta degradación fue detectada directamente por los datos de sensores remotos (Figura 3h, Anexo 1.8).

Con respecto a la unidad de manejo C-1, otorgada a la Empresa concesionaria Maderas del Orinoco C.A. (MADERORCA), se ejecutaron siete planes anuales, distribuidos en dos Parcelas de Investigación (PI 1 y PI 2) en 1991 y 1993, además de cinco planes (C1-C5) desde 1995 hasta 2006. El aprovechamiento realizado en los siete compartimientos afectó el dosel directamente en 1.944 ha, de los cuales el 81,3% (1.580 ha) fue por la construcción de 243 km de vías con una intensidad de 6,5 km/ha; el 10,7% (209 ha) por la construcción de 207 patios de acopios con un promedio de 1,0 patio/ha; y el 8,0% (156 ha) por las actividades

de arrastre. Indirectamente el aprovechamiento degradó 18.209 ha de bosque, el 10,6% fue detectada directamente por los datos de sensores remotos (Figura 3i, Anexo 1.9). En relación a la unidad de manejo S-3, a cargo de la Empresa concesionaria Fundación la Salle, se ejecutó un solo plan anual (C1), desde 1992 hasta años después. El aprovechamiento que afectó al dosel de manera directa en 105 ha, principalmente por la construcción de 10 km de vías (Figura 3j, Anexo 1.10).

De las diferentes actividades (vialidad, arrastre y construcción de patios de acopio), la construcción de vialidad es la principal responsable de degradación del bosque. Esta actividad es responsable de un porcentaje de degradación que varió entre 43,4 y 81,9 %, con un valor promedio de 63,29 %. En todas las unidades estudiadas, los mayores porcentajes de degradación correspondieron a la vialidad con la excepción de la otorgada a CVG - Sierra Imataca Sector Sur donde la degradación por arrastre (46,2 %) fue ligeramente superior a la producida por la vialidad (43,4 %). Este aspecto cobra especial importancia si se toma en consideración lo indicado por Asner *et al.* (2009) y FAO (2020) en el sentido que el aprovechamiento puede ser un precursor de actividades de deforestación, especialmente por el incremento de acceso al bosque a través de la red vial. Bleuche *et al.* (2021) señalan que la construcción y mejora de vías principales en el aprovechamiento forestal guía a la construcción de caminos secundarios, terciarios e incluso vías ilegales y esa expansión de la red vial hasta zonas boscosas previamente inaccesibles, lo cual puede dar paso a actividades que den como resultado degradación adicional e incluso deforestación. Con respecto al arrastre y la construcción de patios de acopio, el comportamiento fue variable: en algunas unidades el arrastre representó mayor porcentaje de degradación en comparación con la construcción de patios y viceversa; pero en el promedio de todas las unidades, el arrastre representó 21,55 % y los patios de acopio el 15,31 %.

Es importante mencionar que, en algunos países tropicales como Nicaragua (Ruíz-Gómez *et al.* 2016) y Paraguay (Rejalaga, 2016), el aprovechamiento selectivo es uno de los factores con mayor incidencia en la degradación del bosque; mientras que en Costa Rica (Argotty *et al.*, 2016) se encuentra por debajo de otros factores incidentes como la tala ilegal, fuegos y pastoreo. En Colombia, el 85

% de la degradación forestal es producto de la tala selectiva (Casarim *et al.*, 2017). Para Venezuela, Pacheco-Angulo *et al.* (2017) señalan que en los bosques de la Reserva Forestal de Caparo, la tasa de degradación fue de 3.667 ha (2,1 % del área de la reserva) para el período 1990-2000, 737 ha (0,42 %) en el 2010-2015 y 515 ha (0,3 %) en el 2000-2010. Estas tasas de degradación están por debajo de las observadas en la Reserva Forestal Imataca donde ascienden a 5,6 % del área total de reserva. Sin embargo, es necesario acotar que el aprovechamiento selectivo bien manejado puede mantener valores apropiados de biodiversidad, reservas de Carbono y otros servicios ecosistémicos (Bleuche *et al.*, 2021).

De acuerdo con los criterios de Ramírez-Delgado (2016), los bosques de la Amazonía venezolana son clasificados en niveles de degradación que se consideran de altos a críticos. Sin embargo, esa categorización puede corresponder a las áreas que están siendo sometidas a un tipo de aprovechamiento (tala selectiva) que, según Pacheco-Angulo *et al.* (2021), se caracteriza por deficiencias en cuanto a planificación y eficiencia; esto podría ser determinante en los niveles de degradación (altos o críticos) pero el área de aprovechamiento (214.376 ha) representa, aproximadamente, el 5,6 % de la superficie de la reserva (3.827.517 ha).

3.3. Degradación del bosque versus madera recolectada

En la reserva forestal Imataca, las tierras forestales se han gestionado principalmente por el manejo forestal selectivo. Este manejo se ha realizado desde principio de la década de los ochenta hasta la actualidad, mediante concesiones dadas por el estado a empresas madereras, las cuales a través del método de aprovechamiento convencional, no planificado, y el método planificado, mediante un plan anual de manejo (recientemente mejorado mediante el uso de las tecnologías de la información geográfica), se han extraído del bosque volúmenes de maderas que han originado una degradación forestal y con ello emisiones de CO₂ a la atmosfera importantes para los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI).

Este volumen fue de 1.617.700 m³ rola⁻¹, extraído de 79 compartimientos desde 1982 hasta el 2020. Las especies aprovechadas más representativas fueron: Mureillo (*Erismia uncinatum*), Baramán

(*Catostemma commune* Sandwith), Carapa (*Carapa guianensis* Aubl.), Purguo (*Manilkara bidentata* (A. DC.) A. Chev.), Zapatero (*Peltogyne porphyrocardia* Benth.), Guacharaco (*Lecythis corrugata* Poit.), Pilón (*Pera bicolor* (Klotzsch) Müll.Arg.), Josefino (*Stryphnodendron guianense* (Aubl.) Benth.), Majagua (*Sterculia pruriens* (Aubl.) K. Schum.), Cedro Blanco (*Simarouba amara* Aubl.) y Pata de Danto (*Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell), Caraño (*Protium neglectum* Swart), Caramacate (*Piranhea longipedunculata* Jabl.), Chicle (*Ecclinusa guianensis* Eyma), Mora (*Mora gonggrijpii* Kleinhoonte), Guamo colorado (*Inga alba* (Sw.) Willd.), Leche de cochino (*Alexa imperatricis* (R. H. Schomb.) Baill.) y otras (Azuaje, 2018). Como resultado de la extracción de madera se generó un área de bosque degradado de 214.376 ha, es decir, el 5,6% de la superficie de la reserva (3.827.517 ha). En cuanto a la composición florística, la extracción selectiva podría tener efectos sobre la estructura del bosque, afectando principalmente a las heliófitas (Villela et al., 2006; Dias Gaudi et al., 2019) y se debe analizar el efecto que puede tener para la realización de aprovechamiento a largo plazo.

En la figura 4, se observa el bosque degradado versus el volumen de madera recolectada en cada unidad de manejo y destaca que la mayor área degradada la presentó la unidad de manejo de Nuria con 49.648 ha donde se recolectó el 25,6% ($414.050 \text{ m}^3 \text{ rola}^{-1}$) del volumen de madera de la RFI, seguida a esta se encuentra la unidad de manejo C4 con un área degradada de 32.147 ha y el 18,5 ($299.798 \text{ m}^3 \text{ rola}^{-1}$) del volumen de madera y la unidad de manejo N 2 con un área degradada de 32.813 ha y el 16,2 ($262.875 \text{ m}^3 \text{ rola}^{-1}$) del volumen de madera. Asimismo, la figura 4 revela que no existe una relación claramente marcada entre el área degradada y el volumen extraído por cada unidad de manejo. Por ejemplo, en las unidades N3, C4 y N5 se observa que el volumen extraído está por encima del área degradada, caso contrario la C1, C3 y N6 donde el volumen extraído está por debajo del área degradada.

La degradación forestal versus el volumen recolectado en la RFI por año se observa en la figura 5, tanto en gráfico de barras (Figura 5a) como en gráfico de dispersión (Figura 5b). En el gráfico de barra (Figura 5a) se puede apreciar que el aprovechamiento forestal selectivo en el transcurso de los años ha sido variable, en la cantidad de bosque degradado y en el volumen de madera recolectada.

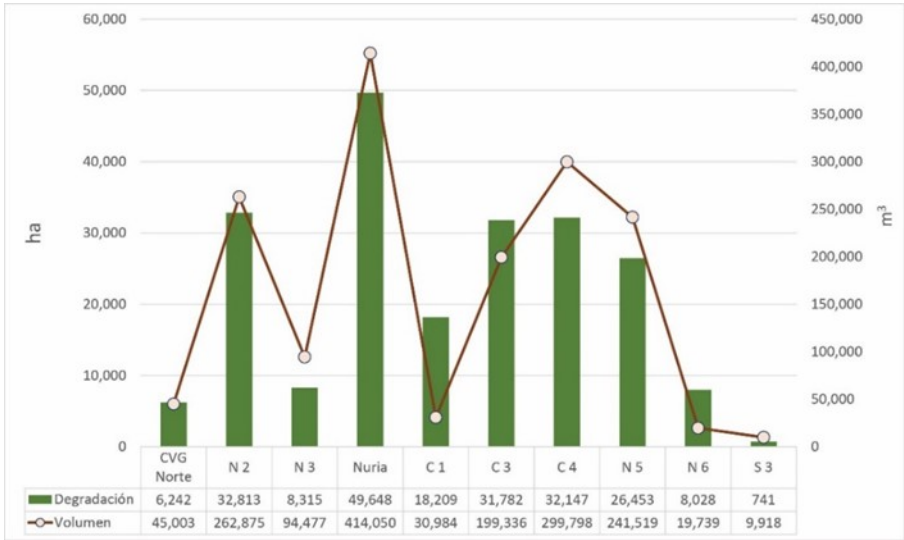


Figura 4. Bosque degradado versus volumen de madera recolectada.
Fuente: elaboración propia

De los 32 años en que se ha realizado el aprovechamiento forestal selectivo, el año 1995 fue donde se generó mayor área de degradación forestal, y se aprovechó mayor cantidad volumen de madera, con 16.463 ha (7,7%) y 118.572 m³ (7,1%) respectivamente. En ese año se realizó el aprovechamiento forestal en cinco compartimientos de las unidades de manejo C1 (C1), C3 (C4), C4 (C1), N2 (C4) y N5 (C4). Seguidamente se ubica el año 2002, con 15.507 ha (7,2%), 86.860 m³ (5,2%) y cuatro compartimientos aprovechados de las unidades de manejo C3 (C7), C4 (C6), N2 (C7) y Nuria (C5). Posteriormente se ubica el año 1988, con 14.196 ha (6,6%), 101.855 m³ (6,1%) y cinco compartimientos aprovechados de las unidades de manejo C3 (C2), CVG-Norte (PI2), N2 (C2), N5 (PI2) y Nuria (C1). El siguiente lugar lo ocupa el año 1997 con 13.950 ha (6,5%), 115.599 m³ (6,9%) y cinco compartimientos aprovechados de las unidades de manejo C1 (C2), C3 (C5), C4 (C2), N2 (C5) y Nuria (PI2). Finalmente se ubica el año 2005 con 13.141 ha (6,1%), 106.318 m³ (6,3%) y cuatro compartimientos aprovechados de las unidades de manejo C4 (C7), N2 (C9), N6 (PI2) y Nuria (C8).

En relación al gráfico de dispersión (Figura 5b), se puede apreciar una relación positiva, es decir, a mayor volumen de madera aprovechada se genera mayor área degradada. El ajuste de este modelo, según el cálculo de R², es de 0,7466, esto quiere decir, que el modelo se ajusta muy bien a la variable real, lo que se podría indicar que el modelo explica el 74,66% a la variable real. El 2020 fue donde se generó menor área de degradación forestal y se aprovechó la menor cantidad volumen de madera, con 743 ha (0,3%) y 6.197 m³ (0,4%) respectivamente. En este año se realizó el aprovechamiento forestal en el compartimiento C16 de la unidad de manejo de Nuria; seguido se ubica el año 2017, con 1.199 ha (0,6%), 9.999 m³ (0,6%) y el compartimiento C4 de la unidad de manejo Nuria; y el año 2010, con 1.655 ha (0,8%), 10.550 m³ (0,6%) y el compartimiento C12 de la unidad de manejo N2.

3.4. Emisiones de Carbono comprometidas (CEE) por el aprovechamiento forestal selectivo

En relación a las CEE generadas por fuentes de las actividades del aprovechamiento forestal sobre la biomasa aérea y por el volumen de madera recolectada en las unidades de manejo de la reserva, se

presentan en la figura 6a donde se detalla que la fuente de acarreo originó la mayor cantidad de emisiones con 75,36% (719,7 Mg CO₂ e ha⁻¹), seguida de la fuente de arrastre con 14,27% (136,3 Mg CO₂ e ha⁻¹) y la fuente de tumba con 10,37% (99 Mg CO₂ e ha⁻¹). Las unidades de manejo con mayor cantidad de emisiones por ha fueron N3 (Empresas SOMAGUA) con 15,4% (147,6 Mg CO₂ e ha⁻¹), C4 (Aserradero Hermanos Hernández C.A.) con 13,75% (131,3 Mg CO₂ e ha⁻¹) y Nuria con 13,2% (126,1 Mg CO₂ e ha⁻¹); en los tres casos la fuente de acarreo fue el principal responsable de las emisiones de carbono. Por otra parte, las menores emisiones correspondieron a las unidades N6 (INPROFORCA) con 3,31% (31,6 Mg CO₂ e ha⁻¹), S3 (Fundación La Salle) con 5,77% (55,1 Mg CO₂ e ha⁻¹) y C1 (MADERORCA) con 6,34% (60,6 Mg CO₂ e ha⁻¹) manteniéndose la fuente de acarreo como la principal fuente de emisión excepto en el caso de S3 donde las emisiones por fuente de acarreo y fuente de arrastre fueron similares (20,2 Mg CO₂ e ha⁻¹) (Figura 6a).

Para conocer la relación entre la actividad de aprovechamiento y las emisiones generadas por la misma en cada unidad de manejo, se construyó un gráfico de dispersión (Figura 6b), en éste se puede apreciar una relación positiva entre la cantidad de madera extraída (m³ ha⁻¹) y la cantidad de CO₂ emitida. El ajuste de este modelo, según el cálculo de R², es de 0,4289, esto quiere decir, que el modelo explica el 42,89% a la variable real.

Anualmente las CEE por hectárea (Mg CO₂ e ha⁻¹) originadas por fuentes de las actividades de aprovechamiento forestal se observan en la figura 7a, en esta se revela que los años donde hubo mayor emisión por estas fuentes fueron 1998 con 6,28% del total de emisiones (197 Mg CO₂ e ha⁻¹), 1990 con 5,2% (163 Mg CO₂ e ha⁻¹) y 2005 con 5,16% (162 Mg CO₂ e ha⁻¹). En los tres casos, las mayores emisiones correspondieron a la fuente de acarreo seguido por las fuentes de tumba y arrastre en 1990 y 1998; mientras que, en el 2005, la fuente de arrastre fue responsable de la mayor cantidad de emisiones en comparación con la fuente tumba (Figura 7a). En el año de mayor porcentaje de emisión, estuvieron en aprovechamiento cuatro unidades de manejo de las cuales dos fueron de las que reportaron mayor porcentaje de emisiones: C4 a cargo de Aserradero Hermanos Hernández y Nuria.

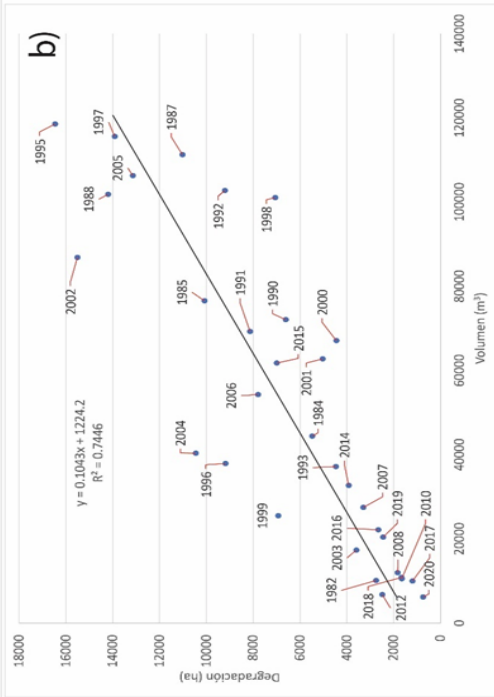
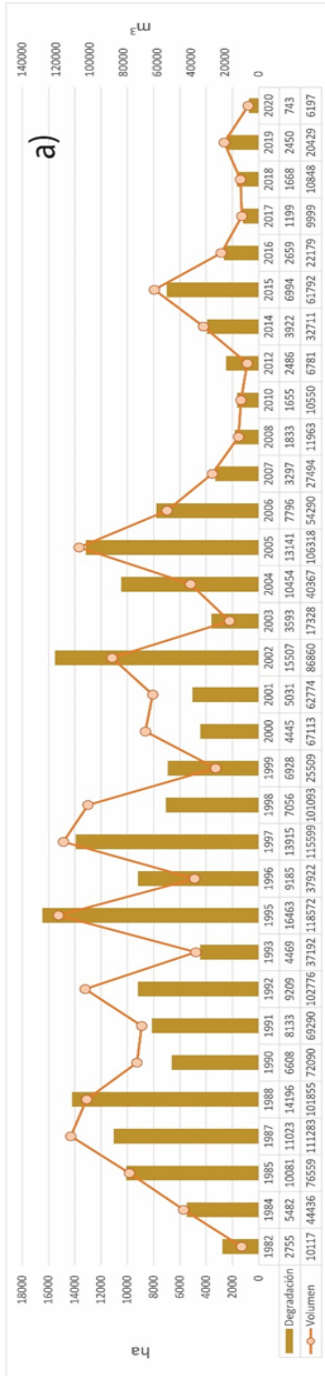


Figura 5. Bosque degradado versus volumen de madera recolectada por año en la RFI en gráfico de barras (a) y de dispersión (b). Fuente: elaboración propia.

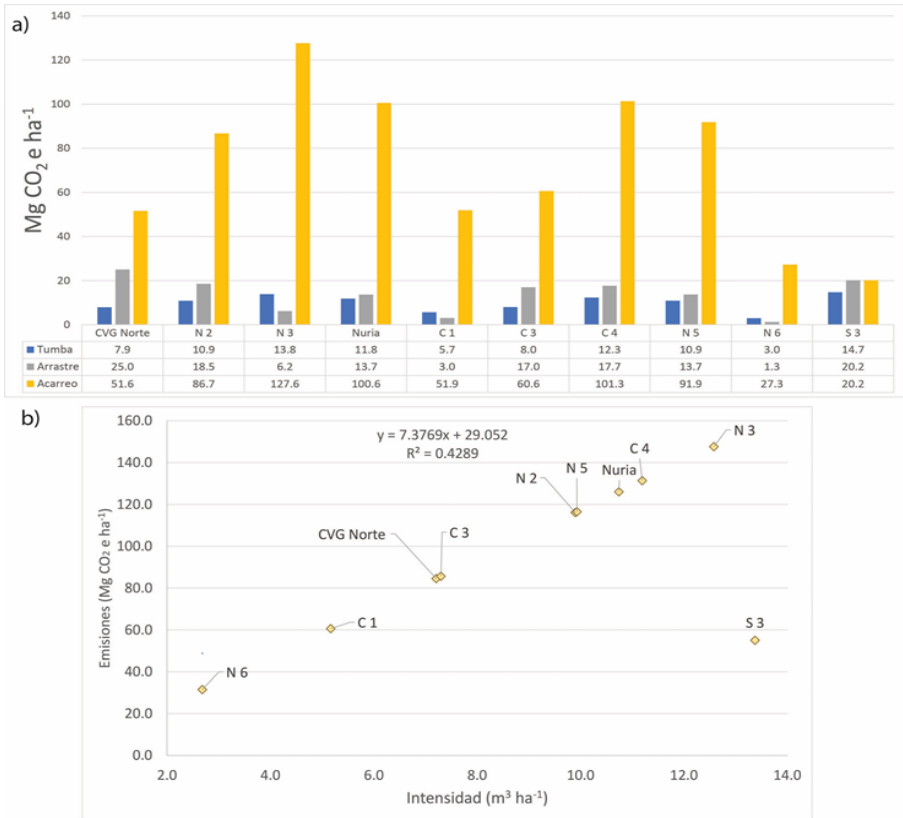


Figura 6. Emisión de CO₂ por hectárea (a) y gráfico de dispersión (b) emitidas por las actividades de aprovechamiento en cada unidad de manejo. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la menor cantidad CEE, correspondió al año 2012 con 1,02 % (32 Mg CO₂ e ha⁻¹), seguido de 1982 con 1,37% (43 Mg CO₂ e ha⁻¹) y 2004 con 1,4% (44 Mg CO₂ e ha⁻¹). El año de menor porcentaje de emisiones sólo hubo aprovechamiento en la unidad bajo responsabilidad de la empresa ENAFOR mientras que en el año 1982, las emisiones correspondieron al aprovechamiento de la unidad N3 (SOMAGUA). Para 2004, el porcentaje de emisiones fue bajo a pesar de haber estado en actividad cuatro unidades de manejo, pero sólo una correspondió a una de las empresas con mayor porcentaje de emisión (Nuria).

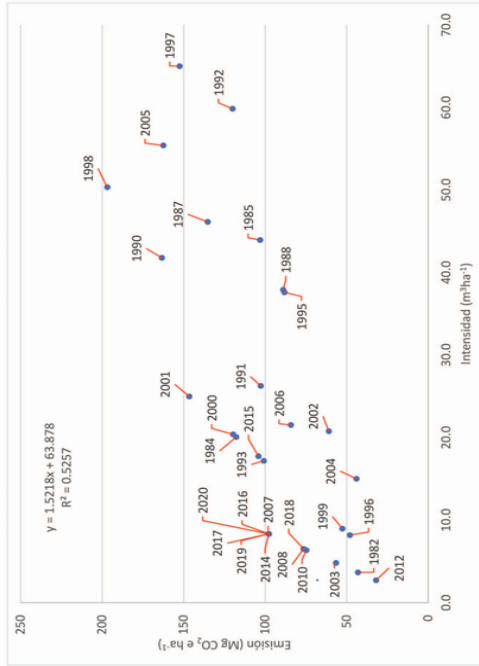
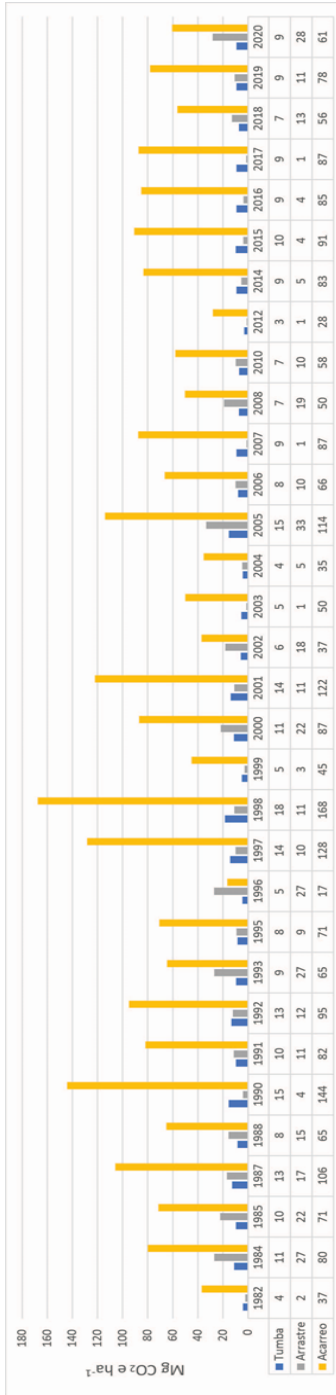


Figura 7. Emisión total (a) y por hectáreas (b) de CO₂, emitidas anualmente por las actividades de aprovechamiento y por volumen madera recolectada. Fuente: elaboración propia.

En relación al gráfico de dispersión de la intensidad de aprovechamiento y las emisiones generadas por año (Figura 7b), se puede apreciar una relación positiva entre la cantidad de madera extraída ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y las emisiones de CO_2 ($\text{Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$). El ajuste de este modelo, según el cálculo de R^2 , es de 0,5257, esto quiere decir, que el modelo explica el 52,57% a la variable real.

Las emisiones en la reserva ($98 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$) están por encima de lo reportado para algunos países del trópico africano como la República del Congo ($75,6 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$), Gabón ($74,88 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$) y la República Democrática del Congo con $48,6 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$ (Umunay *et al.*, 2019). También son notablemente inferiores a las reportadas en Indonesia donde Griscom *et al.* (2013) mencionan cifras de $188,39 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$.

Con respecto a países del continente americano, la cantidad de emisiones en la RFI ($98 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$) está por debajo de la reportada en Colombia donde, según Casarim *et al.* (2017), entre el 2000 y 2015, se elevaron a un promedio anual de 50,67 millones de $\text{MgCO}_2 \text{e}$. Adicionalmente, la tala selectiva en el período 2000-2017 fue responsable de un total de emisiones de 1,1 millones de $\text{tCO}_2 \text{e}$. En México, en dos bosques de la Península de Yucatán sometidos a tala selectiva, las emisiones de carbono promedio fueron de $1,31 \text{ Mg CO}_2 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ donde el 65 % corresponden a la fuente de tumba, las fuentes de arrastre son responsables del 11 % de las emisiones mientras que la fuente de acarreo produce cerca del 8 % de las emisiones (Armenta-Montero *et al.*, 2020); mientras que Ellis *et al.* (2019) mencionan emisiones de $12,89 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$ en tres estados de la Península de Yucatán. En Chile, las emisiones anuales por degradación forestal representan $9.149.391,8 \text{ tCO}_2 \text{e/año}$. Este volumen de emisiones se produce como resultado de la agregación de la degradación por transformación de bosque nativo en plantaciones forestales y las emisiones por degradación en bosque permanente (Montaner *et al.*, 2016). Con respecto a lo reportado por Zalman *et al.* (2019) para Surinam ($75,24 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$) y Goodman *et al.* (2019) para Perú ($37,08 \text{ Mg CO}_2 \text{e ha}^{-1}$), las emisiones en la Reserva Forestal Imataca están por encima de los reportes de esos dos países del trópico suramericano.

En Venezuela, Pacheco *et al.* (2017) indican que la emisión de Carbono en un bosque de los llanos occidentales (Reserva Forestal

Caparo), fueron de 2,21 Mt CO₂ año⁻¹ en el período 1990-2000 y se redujo a 1,56 Mt CO₂ año⁻¹ (2000-2010) y 0,8 Mt CO₂ año⁻¹ (2010-2015) observando que el 92,9-98,63 % de las emisiones son producto de deforestaciones y 1,37-7,79 % son consecuencia de la degradación forestal. Es importante mencionar que la cantidad total de emisiones de carbono en el país es de 307,98 MtCO₂ año⁻¹, mientras que el aprovechamiento selectivo en la Reserva Forestal Imataca genera 0,34 MtCO₂ año⁻¹ lo cual representa el 0,11 % de las emisiones de carbono que se producen anualmente en el país. Sin embargo, se debe tomar en consideración que, según Silva Jr. *et al.* (2021), las emisiones resultantes de la degradación del bosque no se manifiestan en su totalidad de manera inmediata y se observa que pueden continuar emitiendo más CO₂ durante muchos años convirtiéndose en una fuente significativa de suministro de Carbono a la atmósfera.

4. Conclusiones

La actividad de aprovechamiento forestal en la reserva forestal Imataca ha dado como resultado la intervención y degradación de 214.376 ha, es decir, el 5,6 % de la superficie de la reserva. Aun cuando se puede considerar que el grado de degradación en las superficies afectadas, no es extrapolable a toda la reserva si se toma en consideración que menos del 6 % del bosque pasa a la clase de degradado como consecuencia del aprovechamiento selectivo.

De las actividades de aprovechamiento consideradas (arrastre, vialidad, patios de acopio), la que mayor incidencia ejerce sobre la degradación del bosque son las operaciones asociadas a la construcción de la red vial. En promedio, el 63,29 % del bosque degradado se origina de la apertura de vías.

En los 32 años en que se ha realizado aprovechamiento forestal selectivo en la reserva forestal Imataca, la mayor área de degradación forestal se produjo en 1995, año en que también se aprovechó la mayor cantidad volumen de madera.

De las diez empresas concesionarias estudiadas, la que produjo mayor degradación de bosque fue Maderas Nuria. El nivel de degradación generado por esta empresa se debe a que es la que mayor área y número de compartimientos ha aprovechado además de ser la que ha extraído mayor cantidad de madera.

Con respecto a las CCE, el promedio anual en la reserva forestal Imataca es de 0,34 MtCO₂ año⁻¹, es decir el 0,11 % de las emisiones anuales producidas en el país. La fuente de acarreo es la que origina

la mayor cantidad de emisiones con 75,36%, seguida de la fuente arrastre con 14,27% y la fuente de tumba con 10,37%. Al igual que las tasas de degradación de bosques, una de las unidades de manejo con mayor cantidad de emisiones fue Nuria con 13,2%, sólo superada por Empresas SOMAGUA con 15,4% y Aserradero Hermanos Hernández C.A. con 13,75%.

Agradecimientos: los autores quieren expresar sus agradecimientos al proyecto "Ordenación forestal sustentable y conservación de bosque en la perspectiva Ecosocial", como uno de los aportes técnico científicos realizados en función de ofrecer información y herramientas para fortalecer el manejo forestal

Anexos

Anexo 1. Degradación forestal directa e indirecta realizada en los compartimientos de las diferentes unidades de manejo

Anexo 1.1. Sierra Imataca Sector Sur.

	Compartimientos				
	PI 1	PI 2	PI 3	C1	Total
Año de aprovechamiento	1985	1988	1991	1992	
Patios de acopio					
Áreas de patios (ha)	9,3	14	12,6	23,8	59,7
Nro. Patios	22	44	38	56	160
Nro. patios/ha	2,4	3,14	3	2,4	2,7
Vías de aprovechamiento					
Áreas de vías (ha)	68	53,1	57,4	70,9	249,4
Longitud de vías (Km)	24	21,8	21,8	24,4	92
Longitud/área (km/ha)	2,8	2,4	2,6	2,9	2,71
Zonas de arrastre					
Áreas de arrastre (ha)	186,7	28,5	6,2	43,9	265,3
Degradación directa (ha)	264	95,5	76,2	138,6	574,3
Degradación indirecta (ha)	1492,5	1509,3	1446,0	1794,3	6242,1
DD/DI (%)	17,7	6,3	5,3	7,7	9,2

Anexo 1.2 CODEFORSA (Unidad N-2).

Compartimientos															
	PI.1	PI.2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Total
	1984	1985	1987	1988	1990	1995	1997	1998	2002	2004	2005	2006	2008	2010	
Patos de acopio															
Áreas de patios (ha)	24,5	15,8	28,8	62,2	34,2	15,7	14,7	33,5	47,6	20,8	20,3	86,6	49,3	53,1	507,1
Nro. patios	34	24	57	87	47	27	37	72	81	24	25	125	77	82	799
Nro. patios/ha	1,4	1,5	2	1,4	1,4	1,7	2,1	2,1	1,7	1,1	1,2	1,4	1,6	1,5	1,6
Vías de aprovechamiento															
Áreas de vías (ha)	75,9	40,8	97,8	84	52,1	41,4	24,7	38	74,5	101,2	54,6	136	72	57,6	950,2
Longitud de vías (Km)	34	21,1	44,3	38,5	24,4	17,4	15,2	25,4	40,6	31,3	17,8	52	29,1	24,6	415,7
Longitud/área (km/ha)	2,2	1,9	2,2	2,2	2,1	2,4	1,6	1,5	1,8	3,2	3,1	2,6	2,5	2,3	2,28
Zonas de arraste															
Áreas de arrastre (ha)	186,7	28,5	6,2	43,9	-	-	-	-	-	28,3	30,4	195,3	46,1	18,8	584,2
Degradación directa (ha)	287,1	85,1	132,9	190,1	86,2	57,1	39,4	71,4	122,2	150,3	105,4	418	167,3	129,5	2042
Degradación indirecta (ha)	3606	3606	2764	2484	1556	2865	1236	1612	2622	2865	1074	3036	1834	1655	32815
DD/DI (%)	8	2,4	4,8	7,7	5,5	2	3,2	4,4	4,7	5,2	9,8	13,8	9,1	7,8	6,22

Anexo 1.3. SOMAGUA (Unidad N-3).

	Compartimientos				
	PI 1	PI 2	C1	C2	Total
Año	1982	1985	1987	1992	
Patios de acopio					
Áreas de patios (ha)	71,8	33	35,6	39,9	180,3
Nro. patios	110	55	52	49	266
Nro. patios/ha	1,5	1,7	1,5	1,2	1,5
Vías de aprovechamiento					
Áreas de vías (ha)	137,6	66,3	128,7	62,3	394,9
Longitud de vías (Km)	48,9	26,9	40,8	23,2	139,8
Longitud/área (km/ha)	2,8	2,5	3,2	2,7	2,82
Zonas de arraste					
Áreas de arraste (ha)	12,2	7,5	6,2	3,6	29,5
Degradación directa (ha)	222	107	170	106	605
Degradación indirecta (ha)	2755	1912	2006	1641	8314
DD/DI (%)	8,04	5,59	8,5	6,45	7,28

Anexo 1.4. Empresa Maderas Nuria I C.A

Compartimientos																			
Año	PI1	PI.2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	Total
Patios de acopio																			
Áreas de patios (ha)	50,3	8,2	59,3	75,8	16,7	59	68,8	65,8	78,7	44,4	41,7	57,5	66,6	75,7	46,4	21,8	37,4	8	882,1
Nro. patios	86	13	124	126	33	98	127	129	139	84	87	125	152	165	114	50	85	21	1758
Nro. patios/ha	1,7	1,6	2,1	1,7	2	1,7	1,8	2	2,1	1,9	2,1	2,2	2,3	2,8	2,5	2,3	2,3	2,6	2
Vías de aprovechamiento																			
Áreas de vías (ha)	123,1	21,3	147,9	110,4	31,2	136,9	147	154,1	181	116	93	133,3	178,4	174,7	116,2	49,5	105,6	27,2	2046,8
Longitud de vías (Km)	58,7	9,3	72,8	45,6	13,4	44,6	54,8	61,1	61,8	46,9	36,6	50,3	62,8	64,2	42,4	17,4	33,8	10,3	786,8
Longitud/área (km/ha)	2,1	2,3	2	2,4	2,3	3,1	2,7	2,5	2,9	2,5	2,5	2,6	2,8	2,7	2,7	2,8	3,1	2,6	46,6
Zonas de arraste																			
Áreas de arraste (ha)	378	1	22	11	20	21	23	6	18	11	3	16	11	7	1	19	16	584	
Degradación directa (ha)	551	30	230	197	68	216	239	226	278	171	135	193	261	261	170	72	162	52	3512
Degradación indirecta																			
Degradación indirecta (ha)	4641	661	3917	2722	874	2492	3462	3593	3861	3122	2258	3297	3922	3775	2659	1199	2450	743	49648
DD/DI (%)	11,9	4,6	5,9	7,2	7,8	8,7	6,9	6,3	7,2	5,5	6	5,9	6,6	6,9	6,4	6	6,6	6,9	7,07

Anexo 1.5. INTECMACA (PEA, PI, PI 2, C1-C4) y ENAFOR (STM I-STM III) (Unidad N5).

Compartimientos										
PEA	PI 1	PI 2	C1	C2	C3	C4	STMI	STMII	STMIII	Total
Año	1985	1987	1988	1990	1991	1992	1995	2012	2015	2018
Pacios de acopio										
Áreas de patios (ha)	23,1	16,1	25,1	12,6	30,8	19,5	52,1	27,7	34,1	21,5
Nro. patios	49	36	65	29	53	32	94	53	89	69
Nro. patios/ha	2,1	2,2	2,6	2,3	1,7	1,6	1,8	1,9	2,6	3,2
Vías de aprovechamiento										
Áreas de vías (ha)	191,7	106,1	194,8	76,1	339	232,2	270,2	193,1	207	89,9
Longitud de vías (Km)	39,1	27,8	46,4	17,4	63,2	47,2	57,4	40	51,8	30,6
Longitud/área (km/ha)	4,9	3,8	4,2	4,4	5,4	4,9	4,7	4,8	4	2,9
Zonas de arraste										
Áreas de arrastre (ha)	50	38	64	1	167	14	21	7	10	25
Degradación directa (ha)	265	160	284	90	536	266	344	228	251	137
Degradación indirecta (ha)	1975	2193	2634	1392	4492	2885	3510	2486	3219	1668
DD/DI (%)	13,4	7,3	10,8	6,4	11,9	9,2	9,8	9,2	7,8	8,2

Anexo 1.6. INPROFORCA (Unidad N6).

Año	Compartimientos		
	C1	C2	Total
1996	2005		
Patios de acopio			
Áreas de patios (ha)	32,8	36,5	69,3
Nro. patios	39	37	76
Nro. patios/ha	1,2	1	1,1
Vías de aprovechamiento			
Áreas de vías (ha)	400,3	299,8	700,1
Longitud de vías (Km)	67,1	50	117,1
Longitud/área (km/ha)	6	6	5,98
Zonas de arraste			
Áreas de arrastre (ha)	78	7	85
Degradación directa (ha)	511	343	854
Degradación indirecta (ha)	4544	3483	8027
DD/DI (%)	11,2	9,9	10,64

Anexo 1.7. COMAFOR (Unidad C-3).

Compartimientos											
PI 1	PI 2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Total	
Año	1984	1985	1987	1988	1990	1995	1997	1998	2002	2004	
Pacios de acopio											
Áreas de patios (ha)	23,9	6	33,5	30,3	30,8	27,5	40,2	45,4	40,9	13,8	292,3
Nro. patios	28	12	52	47	40	30	39	54	54	15	371
Nro. patios/ha	1,2	2	1,5	1,6	1,3	1,1	1	1,2	1,3	1,1	1,3
Vías de aprovechamiento											
Áreas de vías (ha)	177,3	64,7	344,9	248,2	235,9	295	261,5	321,7	244,7	128,1	2321,9
Longitud de vías (Km)	39,6	16,8	80,9	56,6	48,7	44,4	41,2	54,3	47,3	23,3	453,1
Longitud/área (km/ha)	4,5	3,9	4,3	4,4	4,8	6,6	6,3	5,9	5,2	5,5	5,12
Zonas de arraste											
Áreas de arraste (ha)	37	20	107	2	66	472	60	19	1383	4	2170
Degradación directa (ha)	238	90	486	281	332	795	362	387	1669	146	4786
Degradación indirecta (ha)	1877	1095	4061	3653	3660	4397	2951	3660	4914	1514	31782
DD/DI (%)	12,7	8,2	12	7,7	9,1	18,1	12,3	10,6	34	9,6	15,05

Anexo 1.8. Aserradero Hermanos Hernández C.A. (Unidad C-4).

Compartimientos										
Año	PI 1	PI 2	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Total
1992	1993	1995	1997	1998	2000	2001	2002	2005		
Pacios de acopio										
Áreas de patios (ha)	43,9	24,8	61,5	80,9	23,2	91,1	52,2	85,7	112,3	575,6
Nro. patios	43	19	59	75	14	49	32	55	75	421
Nro. patios/ha	1	1,3	1	1,1	1,7	1,9	1,6	1,6	1,5	1,4
Vías de aprovechamiento										
Áreas de vías (ha)	239,2	212	439,3	564,7	167,6	369,6	236,1	424,2	573,8	3226,5
Longitud de vías (Km)	39,4	30,6	66,1	96,1	24,3	47,3	33,6	56,6	75,1	469,1
Longitud/área (km/ha)	6,1	6,9	6,6	5,9	6,9	7,8	7	7,5	7,6	6,87
Zonas de arraste										
Áreas de arrastre (ha)	8	145	117	197	19	71	20	106	113	796
Degradación directa (ha)	291	381	618	842	209	532	308	616	799	4593
Degradación indirecta (ha)	2148	2086	3765	6284	1784	3571	2539	4509	5462	32148
DD/DI (%)	13,6	18,3	16,4	13,4	11,7	14,9	12,1	13,7	14,6	14,29

Anexo 1.9. MADERORCA (Unidad C-1).

	Compartimientos						Total	
	PI 1	PI 2	C1	C2	C3	C4		C5
	1991	1993	1995	1997	1999	2004	2006	
Pacios de acopio								
Áreas de patios (ha)	29,3	19,7	16,4	27	52,8	35,5	27,7	208,4
Nro. patios	24	21	20	31	45	34	32	207
Nro. patios/ha	1,2	0,9	0,8	0,9	1,2	1	0,9	1
Vías de aprovechamiento								
Áreas de vías (ha)	211,6	200,8	150,4	211,5	396,1	205,5	203,5	1579,4
Longitud de vías (Km)	30,4	30,7	26,2	34	57,4	30,2	34	242,9
Longitud/área (km/ha)	7	6,5	5,7	6,2	6,9	6,8	6	6,5
Zonas de arraste								
Áreas de arraste (ha)	6	12	11	3	47	68	9	156
Degradación directa (ha)	247	232	178	242	496	309	240	1944
Degradación indirecta (ha)	2195	2383	1927	2783	4206	2213	2502	18209
DD/DI (%)	11,2	9,8	9,2	8,7	11,8	13,9	9,6	10,67

Anexo 1.10. Fundación La Salle (Unidad S-3).

	Compartimientos
	C1
Año	1992
Vías de aprovechamiento	
Áreas de vías (ha)	105,2
Longitud de vías (Km)	10,4
Longitud/área (km/ha)	10,1
Degradación directa (ha)	105
Degradación indirecta (ha)	741
DD/DI (%)	14,2

Referencias

- Argotty, F., Herrera, M., J. Fernández. 2016. Costa Rica. In: *Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales* (D. Armenteras, T. González, J. Retana, J. Espelta (eds.)). Red Ibero REDD+. p. 34-35.
- Armenta-Montero, S.; Ellis, E.; Ellis, P.; Hunter M., R.; López-Binnquist, C.; Villaseñor P., J. 2020. Carbon emissions from selective logging in the southern Yucatan Peninsula, Mexico. *Madera y Bosques* 26. doi: 10.21829/myb.2019.2611891.
- Armenteras, D., T. González. 2016. Degradación de bosques: Contexto y definiciones. In: *Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales* (D. Armenteras, T. González, J. Retana, J. Espelta (eds.)). Red Ibero REDD+. p. 10-12.

- Asner, G.P.; Keller, M.; Pereira Rodrigo, J.; Zweede, J.C.; Silva, J.N.M. 2004. Canopy damage and recovery after selective logging in amazonia: Field and satellite studies. *Ecol. Appl.* 14: 280–298.
- Asner, G., Knapp, D., Balaji, A., & Paez-Acosta, G. 2009. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite: SPIE.
- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B. M., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Asner, G. P., . . . Willcock, S. 2016. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology* 22(4): 1406–1420. doi: 10.1111/gcb.13139.
- Azuaje C., F. 2018. *Restauracion, conservacion y manejo forestal sustentable (mfs) manejo sustentable de tierras (mst) de bosques en zonas afectadas por procesos de degradacion*. Proyecto ordenación forestal sustentable y conservación de bosques en la perspectiva ecosocial (GCP/VEN/011/GFF). Caracas, Venezuela. 413 p. (Segundo informe de avance).
- Berroterán, J. 2003. *Reserva Forestal Imataca, ecología y bases técnicas para el ordenamiento territorial*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela. pp. 208.
- Beuchle, R., Achard, F., Bourgoin, C., Vancutsem, C., Eva, H. D., Follador, M. 2021. *Deforestation and Forest Degradation in the Amazon. Status and trends up to year 2020*. Joint Research Centre. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/61682, JRC124955.
- 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*. Winrock International Report; USAID: Washington, DC, USA.
- Bullock, E.L.; Woodcock, C.E.; Souza, C., Jr.; Olofsson, P. 2020. Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon. *Glob. Chang. Biol.* 26: 2956–2969.
- Casarim, F.; Ramírez-Delgado, J.; Sidman, G., Bernal, B.; McMurray, A.; Pearson, T. 2017. *Estimación de Emisiones del Aprovechamiento Forestal por Tala Selectiva: Propuesta de un método operacional para Colombia*. Winrock International. pp. 24.
- Chen, S., Woodcock, C., Bullock, E., Arévalo, P., Torchinava, P., Peng, S., Olofsson, P. 2021. Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment* 265, 112648. Doi: 10.1016/j.rse.2021.112648.

- Chuvieco, E. 2016. *Fundamentals of Satellite Remote Sensing an Environmental. An Environmental Approach*. Taylor & Francis Group: Boca Ratón, FL, USA.
- CIERFI-MARN. 2001. Recopilación y Análisis de Información Básica existente acerca de la Reserva Forestal Imataca (RFI). [CD-ROM]. Documento Compilatorio, Sistema de Información Geográfica, y documentos anexos. Caracas. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.
- Congalton, R.; Green, K. 2009. *Assesing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- 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. *J. Trop. Ecol.* 13: 697–708.
- Derroire, G., C. Pioniot, L. Descroix, C. Bedeau, S. Traissac, O. Brunaux, B. Hérault. 2021. Prospective carbon balance of the wood sector in a tropical forest territory using a temporally-explicit model. *Forest Ecology and Management* 497: 119532.
- Dias Gai, T.; Capellotto C., F.; Coelho de Souza, F.; Mota A., M.; Costa de Carvalho, D.; Quintiliano R.; F. 2019. Long-term effect of selective logging on floristic composition: A 25 year experiment in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management* 440: 258–266.
- Ellis, P.W.; Gopalakrishna, T.; Goodman, R.C.; Putz, F.E.; Roopsind, A.; Umunay, P.M.; Zalman, J.; Ellis, E.A.; Mo, K.; Gregoire, T.G.; et al. 2019. Reduced-impact logging for climate change mitigation (RIL-C) can halve selective logging emissions from tropical forests. *For. Ecol. Manag.* 438: 255–266.
- Eva, H. y Huber, O. 2005. *Una propuesta para la definición de los límites geográficos de la Amazonía*. Síntesis de los resultados de un taller de consulta de expertos organizado por la Comisión Europea en colaboración con la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica / CCI Ispra, 7/8 de junio de 2005. JRC /OTCA. EUR 21808-ES. X + 39 pp.
- Ewel, J., Madriz, A. y Tosi, J. 1976. *Zonas de vida de Venezuela*. Ministerio de Agricultura y Cría. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Caracas, Venezuela. 270 p.

- FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020 Key Findings 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- FAO. 2002. Proceedings: second expert meeting on harmonising forest-related definitions for use by various stakeholders. Rome.
- Feldpausch, T.R.; Jirka, S.; Passos, C.A.M.; Jasper, F.; Riha, S.J. 2005. When big trees fall: Damage and carbon export by reduced impact logging in southern Amazonia. *For. Ecol. Manag.* 219: 199–215.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. 2017. WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology* 37: 4302-4315.
- Gao, Y., M. Skutsch, D. Jiménez-Rodríguez, J. Solórzano. 2020. Identifying variables to discriminate between conserved and degraded forest and to quantify the differences in biomass. *Forests* 11, 1020; doi:10.3390/f11091020.
- García, M. 2016. La deforestación: una práctica que agota nuestra biodiversidad. *Producción + Limpia*. 11: 161-168 - DOI: 10.22507/pml.v11n2a13.
- GFOI. 2020. *Integration of Remote-Sensing and Ground-Based Observations for Estimation of Emissions and Removals of Greenhouse Gases in Forests; Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative*. Global Forest Observations Initiative (GFOI); Group on Earth; Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- GOFC-GOLD. 2016. *A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring and Reporting Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals Associated with Deforestation, Gains and Losses of Carbon Stocks in Forests Remaining Forests, and Forestation, GOFC-GOLD*. Report Versio; GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University; Wageningen, The Netherlands.
- Goodman, R.; Aramburu, M.; Gopalakrishna, T.; & Putz, F.; Gutierrez, N.; Mena-Alvarez, J.; Aguilar-Amuchastegui, N.; Ellis, P. 2019. Carbon emissions and potential emissions reductions from low-intensity selective logging in southwestern Amazonia. *Forest Ecology and Management*. 439: 18-27. Doi: 10.1016/j.foreco.2019.02.037.

- Griscom, B.; Ellis, P.; Putz, F. 2013. Carbon emissions performance of commercial logging in East Kalimantan, Indonesia. *Global Change Biology*. Doi: 20. 10.1111/gcb.12386.
- Hernández-Gómez, I.; Vázquez-Luna, D.; Cerdan-Cabrera, C.; Navarro-Martínez, A.; Ellis, E. 2020. Mapping disturbance from selective logging in tropical forests of the Yucatan peninsula, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23 (2020): #10.
- IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, Prepared by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. (eds). Publicado por: IGES, Japón.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón.
- IPCC. 2019. *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Calvo Buen. IPCC: Bern, Switzerland. Publicado por: IGES, Japón.
- INPE-FUNCATE. 2013. *TerraAmazon 4.4 User's Guide Administrator*, INPE-FUNCATE: São José dos Campos, Brazil.
- Landis, J. y Koch, G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159-174.
- Montaner, D., Mattar, C., Trujillo, G., Moraga, J., J. Cano. 2016. *Anexo técnico de resultados REDD+*. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Santiago de Chile. 82 pp.
- Noguera, O., Pacheco, C., Plonczak, M., Jerez, M., Moret, A., Quevedo, A. y Carrero, O. 2007. Planificación de la explotación de impacto reducido como base para un manejo forestal sustentable en un sector de la Guayana venezolana. *Revista Forestal Venezolana*, 51(1): 67-78.
- Olofsson, P.; Arévalo, P.; Espejo, A.B.; Green, C.; Lindquist, E.; McRoberts, R.E.; Sanz, M.J. 2020. Mitigating the effects of omission errors on area and area change estimates. *Remote Sens. Environ.* 236, 111492.

- Olofsson, P.; Foody, G.M.; Herold, M.; Stehman, S.V.; Woodcock, C.E.; Wulder, M.A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.* 148: 42–57.
- Ota, T.; Ahmed, O.S.; Minn, S.T.; Khai, T.C.; Mizoue, N.; Yoshida, S. 2019. Estimating selective logging impacts on aboveground biomass in tropical forests using digital aerial photography obtained before and after a logging event from an unmanned aerial vehicle. *For. Ecol. Manag.* 433: 162–169.
- Pacheco-Angulo, C.; y Hernández, D. (En revisión). Cambios de cobertura y uso de la tierra en una Reserva Forestal de la Amazonia Venezolana, Período 2000-2020. Proyecto "Ordenación Forestal Sustentable y Conservación de Bosque en la Perspectiva Ecosocial (GCP/VEN/011/GFF)". FAO Venezuela.
- Pacheco, C., Aguado, I. y Mollicone, D. 2011. Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *Biollania*, 10, 281-292
- Pacheco, C., Aguado, I., Vilanova, E. y Martínez, S. 2012. Utilización de las tecnologías de la información geográfica (TIG) en el desarrollo de un sistema de medición, reporte y verificación (MRV) de emisiones de CO2 en tres áreas "hot spot" de deforestación en Venezuela. Documento presentado en el XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid, España.
- Pacheco C, Aguado I, Mollicone D. 2014. Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images. *Acta Amazon.* 44:185–96.
- Pacheco-Angulo A., C., Vilanova, E., Aguado, I., Monjardin, S. y Martínez, S. 2017. Carbon Emissions from Deforestation and Degradation in a Forest Reserve in Venezuela between 1990 and 2015. *Forests* 8, 291; doi:10.3390/f8080291.
- Pacheco-Angulo A., C.; Plata R., W.; Serrano, J.; Vilanova, E.; Monjardin A., S.; González, A.; Camargo, C. 2021. A low-cost and robust Landsat-based approach to study forest degradation and carbon emissions from selective logging in the Venezuelan Amazon. *Remote Sens.* 13, 1435. <https://doi.org/10.3390/rs13081435>.

- Pacheco, P., Mo, K., Dudley, N., Shapiro, A., Aguilar-Amuchastegui, N., Ling, P.Y., Anderson, C. and Marx, A. 2021. Frentes de deforestación: Causas y respuestas en un mundo cambiante. WWF, Gland, Switzerland.
- Pearson, H., Brown, S. Casarim, F. 2014. Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environ. Res. Lett.* 2014, 9, 1–11.
- Pérez R., E. 2019. Efecto del aprovechamiento forestal en bosques semidecíduos en la península de Guanahacabibes, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 7: 40-55.
- Poudyal, B. H.; Maraseni, T.; G. Cockfield. 2019. Implications of Selective Harvesting of Natural Forests for Forest Product Recovery and Forest Carbon Emissions: Cases from Tarai Nepal and Queensland Australia. *Forests* 10, 693. doi:10.3390/f10080693.
- RAISG. 2009. Amazonía 2009. *Áreas Protegidas y Territorios Indígenas*. AIDSEP-DIREN-EcoCiencia-ecoSIG-FAN-FGA-Instituto del Bien Común-ICV- Imazon-ISA- SINCHI.
- RAISG. 2015. *Deforestación en la Amazonía (1970-2013)* (pp. 48). www.raisg.socioambiental.org.
- Ramírez-Delgado, J. 2016. Colombia. In: *Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales* (D. Armenteras, T. González, J. Retana, J. Espelta (eds.). Red Ibero REDD+. p. 32-33.
- RBV. 2004. República Bolivariana de Venezuela. (22 de Septiembre de 2004). Decreto N° 3.110. Gaceta Oficial N° 38.028. Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso de la Reserva Forestal Imataca. Caracas - Venezuela.
- RBV. 2013. *Ley de Bosques*. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela. N° 40.222, de fecha 06/08/2013.
- Rejalaga, M. 2016. Paraguay. In: *Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales* (D. Armenteras, T. González, J. Retana, J. Espelta (eds.). Red Ibero REDD+. p. 43-48.

- Reygadas, Y., Jensen, J., Moisen, G. 2019. Forest Degradation Assessment Based on Trend Analysis of MODIS-Leaf Area Index: A Case Study in Mexico. *Remote Sensing* 11 (21) 2503. Doi <https://doi.org/10.3390/rs11212503>.
- Ruíz-Gómez, V., Herrera, A., Savé, R. 2016. Nicaragua. In: *Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales* (D. Armenteras, T. González, J. Retana, J. Espelta (eds.). Red Ibero REDD+. p. 38-42.
- Shimabukuro, Y.E.; Arai, E.; Duarte, V.; Jorge, A.; dos Santos, E.G.; Gasparini, K.A.C.; Dutra, A.C. 2019. Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 40: 5475–5496.
- 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.
- Silva Junior, C.H.L., Carvalho, N.S., Pessôa, A.C.M., Reis, J.B.C., Pontes-Lopes, A., Doblaz, J., Heinrich, V., Campanharo, W., Alencar, A., Silva, C., Lapola, D.M., Armenteras, D., Matricardi, E.A.T., Berenguer, E., Cassol, H., Numata, I., House, J., Ferreira, J., Barlow, J., Gatti, L., Brando, P., Fearnside, P.M., Saatchi, S., Silva, S., Sitch, S., Aguiar, A.P., Silva, C.A., Vancutsem, C., Achard, F., Beuchle, R., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., & Aragão, L.E.O.C. .2021. Amazonian forest degradation must be incorporated into the COP26 agenda. *Nature Geoscience*, 14, 634-635
- Souza, C. 2013. Monitoring of Forest Degradation: A Review of Methods in the Amazon Basin. In *Global Forest Monitoring from Earth Observation*; Archard, F., Hansen, M.C., Eds.; CRC Press Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA; pp. 171–194.
- Souza, J.R.; Barreto, P. 2000. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 21: 173–179.

- Souza, C.; Cochrane, M.; Sales, M.; Monteiro, A.; Mollicone, D. 2009. Integrating Forest Transects and Remote Sensing data to Quantify Carbon Loss due to Forest Degradation: A case study of the Brazilian Amazon. In *Case Studies on Measuring and Assessing Forest Degradation*. Forest Resources Assessment WorkingPaper161; FAO: Rome, Italy, 20p.
- Souza, C.M.; Roberts, D. 2005. Mapping forest degradation in the Amazon region with Ikonos images. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 425-429.
- Umunay, P.; Gregoire, T.; Gopalakrishna, T.; Ellis, P., Putz, F. 2019. Selective logging emissions and potential emission reductions from reduced-impact logging in the Congo Basin. *Forest Ecology and Management*. 437. 360-371.
- Vidal, D.; Corrêa, M.; Gama, A.; Guerreiro, C.; De Almeida, A.; Corrêa, M.; Cavalcante, N.; Sant'Ana, J. 2015. Testes para definição dos parâmetros de detecção de nuvens e sombras em imagens do sensor AWIFS no plugin Cloud Detection, do aplicativo TerraAmazon. In *Proceedings of the An. XVII Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto—SBSR*, João Pessoa, Brazil, 25–29 April, 2015.
- Villela, D., Nascimento, M., Arago, L. de; Gama, D. 2006. Effect of selective logging on forest structure and nutrient cycling in a seasonally dry Brazilian Atlantic forest. *J. Biogeogr.* 33: 506–516.
- Wheeler, C., Mitchard, E., Nalasco, E., Iñiguez, G., Márquez, J., Carstairs, H., Williams, M. 2021. A New Field Protocol for Monitoring Forest Degradation. *Frontiers in Forest and Global Change* Vol. 4, Article 655280. Doi: 10.3389/ffgc.2021655280.
- Zalman, J.; Ellis, P.; Crabbe, S.; Roopsind, A. 2019. Opportunities for carbon emissions reduction from selective logging in Suriname. *Forest Ecology and Management* 439: 9-17.

Acrónimos, abreviaturas y siglas

AFOLU	agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra
AGB	biomasa aérea
CIC	capacidad de intercambio catiónico
CODEFORSA	Corporación de Desarrollo Forestal S.A.
COS	carbono orgánico en el suelo
DA	datos de actividad / densidad aparente
Dac	densidades aparentes corregidas
DGPF	Dirección General de Patrimonio Forestal
ENFORESTAL	Empresa Nacional Forestal S.A.
EQ	equivalente
FCFA	Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
FEB	factores de expansión de la biomasa
FRA	Evaluación de los Recursos Forestales
FE	factores de emisión
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEE	Google Earth Engine
GEF	Fondo Mundial para el Medio Ambiente
GEI	inventarios de gases de efecto invernadero
IGVSB	Instituto Geográfico Venezolano. Simón Bolívar
INPROFORCA	Industrializadora de Productos Forestales C.A. Imataca
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
MADEFORCA	Maderas del Orinoco C.A.
MDE	modelo digital de elevación
MDT	modelos de elevación del terreno
MDS	modelo digital de superficie
MINEC	Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo

MO	materia orgánica
MVR	monitoreo, verificación y reporte
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PORU	Plan de ordenación y reglamento de uso
RFI	reserva forestal Imataca
SB	saturación de bases
SIGOT	Sistema de información para la gestión y ordenación del territorio
TMAD	tasa media anual de deforestación
UPF-EPSC	unidad de producción forestal de la empresa propiedad social di-
UMI	unidad mínima de interpretación
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climáti-
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
UTCUTS	cambio de uso de la tierra y silvicultura
UTM	Universal Transversal Mercator
WWF	Fondo mundial para la naturaleza
ZMF	zona de manejo forestal
ZMFL	zona de manejo forestal con limitaciones
ZMEFAPCI	zona de manejo especial forestal con alta presencia de comunida-
ZMEFM	zona de manejo especial forestal-minero
ZMEFMAPCI	zona de manejo especial forestal-minero con alta presencia de
ZMEAF	zona de manejo especial agroforestal
ZMEAAPCI	zona de manejo especial agroforestal con alta presencia de comu-
ZP	zona de protección

ZRG zona de reservorio de genes

ZR zona de recuperación