



Tecnologías para el monitoreo de impactos y emisiones de carbono del aprovechamiento forestal y de la trazabilidad de la madera de bosques naturales en Latinoamérica y el Caribe

Natalia Ruiz-Guevara, Diego Delgado-Rodríguez, Fernando Carrera Gambetta



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo
Ruiz-Guevara, Natalia.**

Tecnologías para el monitoreo de impactos y emisiones de carbono del aprovechamiento forestal y de la trazabilidad de la madera de bosques naturales en Latinoamérica y el Caribe / Natalia Ruíz-Guevara, Diego Delgado-Rodríguez, Fernando Carrera Gambetta.
p. cm. — (Monografía del BID ; 794)
Incluye referencias bibliográficas.
978-9977-57-713-5 (PDF)

1. Forest monitoring-Latin America. 2. Forest monitoring-Caribbean Area. 3. Forest management-Latin America. 4. Forest management-Caribbean Area. 5. Deforestation-Latin America. 6. Deforestation-Caribbean Area. 7. Climatic changes-Latin America. 8. Climatic changes-Caribbean Area. I. Delgado-Rodríguez, Diego. II. Carrera Gambetta, Fernando III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IV. Título. V. Serie.
IDB-MG-794

Códigos JEL: Q2, Q23

Palabras clave: Cambio Climático, Monitoreo Forestal, Tecnologías en Monitoreo, Deforestación.

Esta publicación analiza el uso de tecnologías para la medición y monitoreo del aprovechamiento forestal en bosques naturales de Latinoamérica y el Caribe y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, así como para la trazabilidad de productos forestales maderables. Se describen las tecnologías comúnmente utilizadas y se dan ejemplos de su uso en la región, represando una serie de barreras y condiciones habilitadoras para la adopción de nuevas tecnologías.

Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



El proyecto *Mecanismos y redes de transferencia de tecnología relacionada con el cambio climático en América Latina y el Caribe* es implementado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). El CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) lidera las acciones del proyecto dirigidas a la transferencia de tecnologías que mejoren los sistemas de monitoreo de recursos forestales.

Este informe forma parte de una serie de reportes que buscan sistematizar las experiencias en monitoreo forestal y las tecnologías utilizadas para este fin en Latinoamérica y el Caribe. Otros estudios de esta serie tratan sobre experiencias de monitoreo forestal en Brasil, Guatemala y un estudio regional sobre el estado del monitoreo forestal en Latinoamérica y el Caribe.

La información aportada en este documento no pretende ofrecer un análisis exhaustivo sobre el monitoreo forestal en Latinoamérica y el Caribe, sino una breve sistematización de las experiencias generadas en la región. Este documento fue preparado a partir de información proveniente de fuentes públicas y entrevistas con especialistas de distintos países.

Créditos

Elaborado por

Natalia Ruiz-Guevara
Diego Delgado-Rodríguez
Fernando Carrera Gambetta

Dirección y revisión técnica

Mario Chacón León
Miguel Cifuentes Jara
Programa de Bosques, Biodiversidad y Cambio
Climático, CATIE

Diseño y diagramación

Rocío Jiménez,
Tecnología de Información y Comunicación, CATI

Colaboración

Francisco Arango
Claudio Alatorre Frenk
Claudia Hernández
Javier Puig
División de Cambio Climático - BID

Fotografías

Geoffey Venegas, Juan José Serrano,
Mario Chacón, Stephan Pleyfair, Miguel
Cifuentes

Contenido

Acrónimos	6
Agradecimientos	8
Resumen ejecutivo	9
Introducción	15
Metodología	17
Capítulo 1: impactos del aprovechamiento forestal en bosques naturales tropicales de Latinoamérica y el Caribe y tecnologías para su medición y monitoreo	20
1.1. El monitoreo del manejo forestal maderable	21
1.1.1. El aprovechamiento de madera en bosques naturales tropicales y sus principales impactos	21
1.2. Experiencias, barreras e incentivos para el monitoreo del manejo forestal en Latinoamérica y el Caribe	23
1.2.1. Experiencias de monitoreo de impactos del manejo forestal en LAC	26
1.2.2. Condiciones habilitadoras, incentivos y barreras para el monitoreo de impactos del manejo forestal en Latinoamérica y el Caribe	30
1.3. Tecnologías para el monitoreo de impactos del manejo forestal	33
1.3.1. Tecnologías para monitorear cambios en biomasa y daños en árboles remanentes	33
1.3.2. Tecnologías para monitorear áreas perturbadas y su ambiente lumínico	39
1.3.2.1. Sensores remotos para la medición de áreas perturbadas: escala de unidad de manejo y de paisaje	40
1.3.2.2. Equipos para la medición de entrada de luz en el bosque	52
1.3.3. Plataformas para el monitoreo de la cobertura forestal	55
Capítulo 2: tecnologías para la medición y el monitoreo de flujos de carbono debido a impactos del aprovechamiento forestal	57
2.1. Generalidades para la medición de carbono en bosques tropicales	57
2.1.1. Consideraciones metodológicas para la determinación de factores de emisión de carbono en bosques bajo aprovechamiento forestal	58
2.1.2. Desafíos metodológicos para el monitoreo de emisiones de carbono en bosques tropicales bajo manejo forestal	60

2.2. La medición de carbono en bosques tropicales bajo manejo forestal: experiencias, barreras e incentivos	61
2.2.1. Experiencias de medición de emisiones de carbono en bosques bajo manejo en Latinoamérica y el Caribe	61
2.2.2. Barreras e incentivos para el monitoreo del flujo de emisiones en áreas bajo manejo forestal en Latinoamérica y el Caribe	62
2.3. Tecnologías para la medición de carbono en bosques tropicales bajo manejo forestal	63
2.3.1. Recursos informáticos para el cálculo de biomasa y carbono	65
2.3.2. Equipos para la medición de flujos de carbono	69
Capítulo 3: tecnologías para la trazabilidad del aprovechamiento de árboles maderables de bosques naturales	74
3.1. La trazabilidad forestal en la región Latinoamérica y el Caribe	74
3.1.1. Contexto normativo y de mercado para la trazabilidad forestal en Latinoamérica y el Caribe	75
3.2. Condiciones habilitadoras, barreras y brechas para implementar tecnologías de trazabilidad de productos forestales en Latinoamérica y el Caribe	76
3.2.1. Condiciones habilitadoras para implementar tecnologías de trazabilidad de productos forestales	76
3.2.2. Barreras y brechas para implementar tecnologías de trazabilidad de productos forestales	78
3.3. Tecnologías para la trazabilidad de productos forestales	79
3.3.1. Dispositivos para el marcado de productos forestales	81
3.3.2. Softwares para la transferencia y procesamiento de la información	86
Capítulo 4. reflexiones finales y recomendaciones	91
4.1 Respecto al monitoreo de impactos del manejo forestal, el flujo de carbono y el uso de tecnologías	91
4.2. Respecto a las tecnologías para la trazabilidad de la madera	94
4.3. Recomendaciones generales sobre la implementación de innovaciones tecnológicas	95
Referencias bibliográficas	96
Anexos	105

Acrónimos

AC	Aprovechamiento convencional (forestal)
AFOLU	Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra (del inglés Agriculture, Forestry and Other Land Use)
AGO	Oficina del Efecto Invernadero de Australia (del inglés Australian Greenhouse Office)
AIR	Aprovechamiento de impacto reducido (forestal)
ASV	Autorización de supresión de vegetación
AVA	Acuerdo voluntario de asociación
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CELOS	Centro para la Investigación en Agricultura en Surinam (del holandés Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek in Suriname)
CIRAD	Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (del francés Centre de Coopération Internationale in Recherche Agronomique Pour le Développement)
DA	Datos de actividad
Dap	Diámetro a la altura del pecho
Dibaf	Departamento de Innovación en Sistemas Biológicos, Agroalimentarios y Forestales
DOF	Documento de origen forestal
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (del inglés Food and Agriculture Organization of the United Nations)
FE	Factor de emisión
FLEGT	Plan de Acción sobre Aplicación de las Leyes, Gobernanza y Comercio Forestal (del inglés Forest Law Enforcement, Governance and Trade)
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial (Global Environment Facility – GEF por sus siglas en inglés)
FSC	Consejo de Administración Forestal (del inglés Forest Stewardship Council)
GEI	Gases de efecto invernadero
GPS	Sistema de posicionamiento global (del inglés global positioning system)
Ibama	Instituto Brasileño del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (del portugués Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis)
ICF	Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Honduras
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (del inglés Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISO	Organización internacional de normalización (del inglés International Organization for Standardization)
ITTO	Organización Internacional de Maderas Tropicales (del inglés International Tropical Timber Organization)
LAC	Latinoamérica y el Caribe
LiDAR	Detección de luz y rangos (del inglés Light Detection and Ranging)
MDL	Mecanismos de desarrollo limpio

NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (del inglés National Aeronautics and Space Administration)
NFC	Comunicación de campo cercano (del inglés Near Field Communication)
OIMT	Organización Internacional de Maderas Tropicales
ONG	Organización no gubernamental
ONU-REDD	Programa de colaboración de las Naciones Unidas para la Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los Bosques
ORFEO	Observación Federada de la Tierra Óptica y de Radar (del inglés Optical & Radar Federated Earth Observation)
PDA	Asistente personal digital (del inglés Personal Digital Assistant)
PMFS	Plan de manejo forestal sostenible
PPM	Parcela permanente de muestreo
QR	Código de respuesta rápida (del inglés quick response)
Rafa	Radiación fotosintéticamente activa
REDD+	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la deforestación y degradación de los bosques
Rifid	Dispositivos de identificación por radiofrecuencia (del inglés Radio Frequency Identification)
RMUE	Reglamento de la madera de la Unión Europea
SBB	Fundación para la Gestión Forestal y la Supervisión Forestal de Surinam (del holandés Stichting Bosbeheer en Bostoezicht)
SBCBI	Sistema boliviano de certificación de bosques e incentivos
SCC	Sistema de Cadena de Custodia de Brasil
SCTF	Sistema de trazabilidad y control forestal de Panamá
SEINEF	Sistema electrónico de información de empresas forestales de Guatemala
SERFOR	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre de Perú
SIG	Sistema de información geográfica
Sinaflor	Sistema nacional de control del origen de los productos forestales (del portugués Sistema nacional de controle da origem dos produtos florestais)
Sitepap	Sistema de trazabilidad digital de industria y mercado de Bolivia
Sirma	Sistema para el rastreo de la madera de Honduras
SNIFFS	Sistema nacional de información forestal y de fauna silvestre de Perú
TARAM	Herramienta de metodologías aprobadas para la forestación y reforestación (del inglés Tool for Afforestation and Reforestation Approved Methodologies)
UE	Unión Europea
Unitus	Universidad de Tuscia

Agradecimientos

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo técnico del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), agencia implementadora del proyecto *Mecanismos y redes de transferencia de tecnología relacionada con el cambio climático en América Latina y el Caribe* y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), quien provee los fondos a través de la Cooperación Técnica Regional No Reembolsable No. ATN/FM-14836-RG. Forma parte de una serie de estudios de caso en sistemas de monitoreo forestal que incluyen a Brasil, Guatemala, México y un estudio sobre sistemas de monitoreo forestal y uso de tecnologías en Latinoamérica y el Caribe.

Agradecemos a las personas que brindaron información valiosa para la elaboración de este documento: César Sabogal (consultor forestal), Jean Pierre Morales (CATIE, Costa Rica), Eddy Peña (SPDA, Perú), William Arreaga (consultor forestal, Guatemala), Cristina Vidal (CATIE, Costa Rica), Manuel Guariguata (CIFOR, Perú), Edgar Bámaca (NEPcon, Guatemala), José H. Chaves (Servicio Forestal Brasileño), Sara Crabbe (SBB, Surinam), Verginia Wortel (CELOS, Surinam), Ramón Díaz (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de República Dominicana), Nery Solís (WCS, Guatemala), Guillermo Navarro Monge (FAO-FLEGT, Panamá), Bruno Arias (INAB, Guatemala), Yadira Molina (Madera Verde, Honduras), Miguel Pacheco (WWF, Colombia), Marcos Bauch (IBAMA, Brasil), Miguel Cifuentes Jara (CATIE, Costa Rica), Bastiaan Louman (Tropenbos International, Holanda), Frederic Gay (CIRAD, Costa Rica), Javier Arce Baca (especialista forestal, Perú) y Karla Ramírez (consultora forestal, Guatemala).



Resumen ejecutivo

Pese a la importancia del tema, existen pocas experiencias en países de Latinoamérica y el Caribe respecto al uso de procedimientos tecnológicos para el monitoreo del manejo forestal. Además, las necesidades de fiscalización y control de los productos que se extraen de los bosques naturales muchas veces exceden la capacidad de las autoridades forestales para realizar inspecciones. El uso de tecnologías modernas puede aportar al abordaje de esos desafíos, por lo que es importante conocer su potencial, las experiencias de uso en la región y analizar las barreras y oportunidades para su implementación.

En este contexto, el objetivo del presente documento es analizar el estado del uso de tecnologías para la medición y monitoreo del aprovechamiento forestal en bosques naturales de Latinoamérica y el Caribe y de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, así como para la trazabilidad de productos forestales maderables. La metodología seguida parte de una revisión de literatura científica y técnica sobre monitoreo forestal enfocado en el aprovechamiento de madera, complementado con entrevistas a expertos de diferentes países de la región, con lo cual se sistematizaron experiencias en los que se realiza aprovechamiento de bosques húmedos tropicales latifoliados.

Impactos del aprovechamiento forestal en bosques naturales tropicales en Latinoamérica y el Caribe y tecnologías para su medición y monitoreo

Existen dos métodos principales de aprovechamiento en bosques naturales: el aprovechamiento convencional (AC) y el aprovechamiento de impacto reducido (AIR). Los impactos producidos por ambos métodos necesitan ser monitoreados para la toma de decisiones silviculturales. Los impactos consisten principalmente en alteración de la biomasa forestal por cosecha de madera, daños en árboles remanentes y mortalidad, perturbación de la cobertura boscosa en términos de área, alteración de la entrada de luz al bosque y cambios en la biodiversidad, suelo y recursos hídricos, entre otros.

Las iniciativas de monitoreo a largo plazo del manejo forestal son, sin embargo, escasas en Latinoamérica y el Caribe (LAC), además de que muchos de los ensayos instalados no tienen continuidad y la información está desactualizada. Los casos documentados se han dado sobre todo para la investigación científica, a cargo de diferentes entes nacionales e internacionales, en los países de Belice, Bolivia, Brasil, Costa Rica, Guatemala, Guyana, Guyana Francesa, México, Surinam y Venezuela.

Las principales barreras identificadas para la implementación de este tipo de estudios son la falta de voluntad política de autoridades forestales, el alto costo del monitoreo silvicultural en logística y mano de obra, la ausencia de incentivos directos, la competencia desleal de la madera ilegal y los diferentes y/o deficientes niveles de capacidades entre actores forestales, así como la falta de acuerdo entre estos respecto de los indicadores que se requieren monitorear. Factores que pueden promover, habilitar o incentivar el monitoreo forestal en la región son la popularidad de la certificación forestal como mecanismo de mercado que regula la sostenibilidad de la actividad forestal, la necesidad de los usuarios forestales de realizar control operacional de su productividad, el diálogo interno a nivel nacional y la difusión de tecnologías modernas, de bajo costo y uso sencillo que faciliten el monitoreo. Respecto a esto último, destaca el rol de la colaboración internacional para el intercambio de experiencias y lecciones aprendidas, en especial la colaboración Sur-Sur.

Las tecnologías más utilizadas para establecer cambios en biomasa y daños en árboles en países de LAC, son las mismas que se han empleado por décadas en inventarios forestales. Cumplen la función de i) la medición de variables dasométricas para el cálculo de biomasa extraída por la cosecha de madera, ii) el monitoreo de degradación por daños en vegetación remanente, y iii) la estimación de reservas de carbono en bosque. Para estas mediciones, los instrumentos manuales son de uso más frecuente, incluyen cintas diamétricas, cintas métricas y clinómetros. El uso de instrumentos de medición electrónicos se ha incrementado debido a aspectos de integración de las distintas funciones dentro de un mismo equipo, la reducción del tiempo de medición y, principalmente, un menor nivel de incertidumbre en la toma de datos; estos instrumentos incluyen forcípulas e hipsómetros, sensores láser, registros electrónicos de datos de inventario mediante el uso de teléfonos móviles y tabletas.

Los sensores remotos permiten estimar biomasa y sus cambios en áreas de bosque, siempre y cuando las áreas impactadas sean de dimensiones suficientes para ser detectadas y medidas con estas tecnologías. Los sensores LiDAR terrestres, aunque aún de costos altos, son capaces de capturar perfiles verticales de vegetación que permiten estimar la biomasa en función de características del rodal, como la altura del dosel o densidad de copas, también ayudan a caracterizar la perturbación, la recuperación y los cambios naturales de sucesión.

Las aplicaciones móviles a través de teléfonos inteligentes (*smarthphones*) y tabletas tienen potencial para el registro de datos para el monitoreo forestal como alternativas eficientes y de bajo costo (Pratihast *et al.* 2012) y presentan ventajas en el uso de formularios de inventarios electrónicos, usando en la interfase opciones predeterminadas de menú que permite a los usuarios registrar la información y reducir errores (Hewson *et al.* 2014). Actualmente, su utilización ha sido mayormente en ecosistemas templados o plantaciones forestales y están orientadas al procesamiento *in situ* de datos de inventario con fines comerciales y no para la estimación de parámetros de monitoreo forestal, aunque se prevé su implementación piloto en algunos países tropicales.

Los impactos provocados por alteraciones de la cobertura boscosa (corta de árboles y su arrastre, construcción de caminos, campamentos y patios de acopio), generalmente se evalúan a través de la medición del área de claros de bosque y la longitud de vías y caminos. Las mediciones manuales de estas áreas y distancias tienen la ventaja de ser precisas, además de permitir de manera simultánea evaluar visualmente otros elementos silviculturales que son importantes para la toma de decisiones para el manejo forestal, aunque su principal desventaja es el costo asociado a la mano de obra, sobre todo en áreas extensas de manejo. La intensidad de la entrada de luz en áreas bajo monitoreo generalmente es estimada con evaluaciones visuales cualitativas, o por instrumentos de distinta complejidad como densiómetros, cámaras de fotografías hemisféricas, ceptómetros y radiómetros.

El uso de tecnologías de sensores remotos permite estimar áreas perturbadas a un menor costo y esfuerzo. Su uso en la planificación de inventarios, el ordenamiento forestal, el monitoreo y la vigilancia es amplio, sobre todo a escala de paisaje (Hewson *et al.* 2014), pero para la evaluación de impactos del aprovechamiento a escala de unidad de manejo es limitado (GOFC-GOLD 2015).

Las imágenes Landsat son muy utilizadas para monitorear usos de la tierra en LAC (Argotty *et al.* 2019), tienen la gran ventaja de formar parte de una amplia colección para hacer análisis históricos y que son de uso gratuito (Hewson *et al.* 2014). Los satélites Sentinel son también de uso gratuito y constituyen una alternativa al uso de Landsat ya que poseen resoluciones espaciales más finas y resoluciones temporales más frecuentes (Mas *et al.* 2016). Sin embargo, ambos sensores no permiten identificar con precisión pequeños cambios en las superficies boscosas. En la región, el sistema DETEX, gestionado por el Servicio Forestal Brasileño, es un caso destacado y pionero en el uso de estas tecnologías en el marco del Sistema de Cadena de Custodia.

Imágenes satelitales de alta resolución tienen potencial para el monitoreo de áreas bajo manejo forestal, entre estas están las imágenes de satélites RapidEye y los de la constelación DigitalGlobe de la compañía Maxar. Su principal limitante es que no son gratuitas, pero ofrecen resoluciones espaciales y temporales lo suficientemente finas como para el monitoreo de claros, cambios fenológicos de especies arbóreas y la detección de vehículos de extracción de trozas en operaciones de tala ilegal en bosques.

Los sensores LiDAR permiten estimar cambios en la estructura vertical del bosque, estos pueden ser portados por aeronaves como drones o helicópteros y, en combinación con imágenes aéreas, permiten obtener información relacionada con recursos forestales.

Los drones han sido ensayados en el monitoreo y vigilancia de áreas de uso forestal para una mejor comprensión de la estructura de bosques en el contexto de inventarios. Brasil es el único país en la región con experiencias de uso continuo. A pesar del poco alcance de su uso, los drones han

proporcionado ventajas con respecto a otras tecnologías al permitir el acople de cámaras fotográficas o sensores como LiDAR y la generación de información en tiempo real, al facilitar el post proceso, reducción de dependencia a ciertas condiciones ambientales (principalmente nubosidad) y mejora del monitoreo en áreas inaccesibles, donde las condiciones de ingreso pueden ser inseguras, o por la existencia de restricciones de costos o limitaciones legales para su uso.

Para el uso de imágenes de sensores remotos, por lo general, se requiere de programas informáticos para su interpretación y análisis. En Latinoamérica y el Caribe, ARCGIS, ERDAS y ENVI han sido los más comúnmente usados (Argotty *et al.* 2019). El uso de estos *softwares* requiere de capacitación especializada, lo que puede restringir su uso para una importante cantidad de actores clave. Sin embargo, en los últimos años, la disponibilidad de *softwares* libres de sistemas de información geográfica y la existencia de plataformas tecnológicas globales como Google Earth Engine y Global Forest Watch, han facilitado el uso de estas imágenes para la toma de decisiones ya que presentan alternativas accesibles para la interpretación de imágenes satelitales. En términos generales, se considera que el monitoreo de la degradación de bosques, afectación de la biodiversidad, reservas de carbono y alteración de servicios ecosistémicos usando solamente sensores remotos como única fuente de información es aún un desafío. Para aprovechar sus ventajas, se recomienda usarlos en conjunto con otro tipo de métodos para la colecta de información en el área de interés.

Se recomienda desarrollar aplicaciones con funciones múltiples para el registro geográfico, dasométrico, económicos y de indicadores de impacto al bosque. Asimismo, es necesario realizar investigaciones comparativas respecto al costo y precisión entre información proporcionada por sensores remotos de alta resolución y el monitoreo directo en campo en áreas bajo manejo forestal, a fin de tener certeza sobre su potencial para la toma de decisiones silviculturales.

Tecnologías para la medición y monitoreo de flujos de carbono causados por impactos del aprovechamiento forestal

Actualmente, la metodología más difundida para el cálculo de emisiones de carbono en bosques bajo aprovechamiento forestal es la desarrollada por Pearson *et al.* (2014), que calcula factores de emisión para la tala selectiva considerando la suma de tres factores: 1) biomasa del volumen extraído con empleo de ecuaciones alométricas, 2) biomasa dañada en el proceso y 3) biomasa dañada resultante de la construcción de infraestructura auxiliar.

El cálculo de biomasa, de reservas y flujos de carbono puede ser facilitado mediante el uso de recursos informáticos que hagan más fácil el cálculo de reservas de carbono para un grupo diverso de usuarios del bosque, sin la necesidad de recurrir a procedimientos de alta complejidad tales como la toma directa de datos en campo. Calculadoras de carbono EX-ACT, CAT AR, CAT SFM, TARAM, MAIA, CO2Fix, CO2Land, CAMFOR han sido desarrolladas para facilitar estas estimaciones de manera que respalden la toma de decisiones. De estas, solo EX-ACT (sector AFOLU) está disponible en línea, mientras que el resto, de uso forestal, no lo está. La plataforma en línea GlobAllomeTree (<http://www.globallometree.org/>) cuenta con recursos útiles para estos fines, además de una base de datos colaborativa para la construcción colectiva de ecuaciones con mayores niveles de precisión.

La medición de la respiración de los diferentes componentes del ecosistema boscoso (p.e. suelo, microorganismos, hojarasca, biomasa) puede realizarse con equipos para la medición de gases y las torres Eddy Covarianza, aunque estas tecnologías no se han ensayado aún en áreas de manejo forestal con fines comerciales.

El desarrollo de aplicativos para el monitoreo silvicultural puede incluir la estimación de emisiones de carbono. Se recomienda retomar el uso de calculadoras de carbono para usos forestales aplicables en teléfonos móviles, así como la adaptación del software Fantallometrik (disponible en la plataforma GlobAllomTree), de manera que se pueda difundir su uso entre más tipos de usuarios y actores de la cadena forestal.

Tecnologías para la trazabilidad del aprovechamiento de árboles maderables de bosques naturales

La trazabilidad en el sector forestal implica el desarrollo de prácticas, protocolos, procedimientos y sistemas de control definidos que permitan seguir el rastro de los productos forestales desde su origen legal y a lo largo de la cadena de aprovechamiento, transporte, transformación y distribución hasta el consumidor final (Pacheco 2017). En el bosque, la trazabilidad implica la georreferenciación de árboles y su marcación con dispositivos para el seguimiento de la madera rolliza sustraída durante las etapas de transporte y transformación.

Las autoridades forestales del ámbito de estudio admiten o promueven el uso de una diversidad de materiales, códigos y dispositivos para el marcado de productos forestales maderables y la elección de uso por lo general queda a elección de cada titular. En la región, lo más usado es el marcado con pintura y con placas metálicas o plásticas, pero existen casos de uso de marquilla forestal (Panamá) y otros dispositivos para la lectura electrónica como los códigos de barras, códigos QR, RFID, comunicación de campo cercano (NFC) o tecnología molecular como el Polvo Stardust y los marcadores moleculares.

Los sistemas de monitoreo de trazabilidad que existen en la región, por lo general, consideran la fiscalización de cargamentos o lotes completos y se basan en la revisión de los documentos que amparan la movilización legal de los productos forestales (guías de remisión, permisos, guías de transporte). En varios países se está normalizando el uso de *softwares* para la transferencia y procesamiento de la información que tienen como base la implementación de sistemas informáticos integrados a tecnologías de teléfonos móviles y el uso de elementos como los códigos QR. La implementación de la mayoría de estas tecnologías se encuentra en fase experimental o en proceso de adaptación para su implementación en LAC.

Además de la necesidad del cumplimiento de la normativa por parte de los actores de la cadena productiva forestal, las exigencias por parte de los países compradores de madera es una condición habilitadora importante que impulsa a acoplarse a sistemas de trazabilidad que involucran innovaciones tecnológicas. Estas exigencias muchas veces llegan a exceder los marcos normativos o las posibilidades de fiscalización de las autoridades forestales de los países productores. Es por eso que la certificación del manejo forestal y de la cadena de custodia es escogida como el principal mecanismo

de mercado para demostrar la legalidad de sus productos. Para el caso de algunas empresas madereras, la necesidad de control interno de productividad y rendimientos ha sido una motivación para la adopción de prácticas y tecnologías de trazabilidad. Una de las principales limitantes, sin embargo, es la falta de capacidades humanas para el correcto uso de tecnologías, así como la disponibilidad limitada de servicios como electricidad e internet, sobre todo en áreas rurales y las características y costos de equipos y accesorios.

Se recomienda el desarrollo de sistemas integrados que incluyan aplicaciones para dispositivos móviles, instrumentos para lectura de dispositivos y plataformas en la web para la cubicación de madera, identificación de especies comerciales, registro y control de la extracción y movilización de productos. Asimismo, se recomienda estandarizar la utilización de códigos y el registro de información para facilitar el seguimiento de manera integrada a nivel nacional y en los mercados internacionales de productos forestales.





Introducción

En Latinoamérica, alrededor del 45% del patrimonio forestal natural está reservado para la producción de madera o no tiene un uso específico (FAO 2018a). Se estima que, en esta región, alrededor de 85 millones de personas viven en zonas boscosas y que dependen de los bosques como su principal medio de vida (IFAD 2016). Por lo tanto, un componente importante del desafío es mejorar la conservación de los bosques y la expansión de la gestión forestal sostenible como herramienta de conservación, tal como lo establece el Objetivo 15 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (PNUD 2016). Finegan (2014) hace referencia a diversas experiencias en Latinoamérica que demuestran que el manejo forestal, bajo estándares de sostenibilidad, contribuye a conservar la integridad de los bosques y de los paisajes en que se encuentran inmersos, siendo una de las alternativas para evitar la deforestación (en Anexo 1 aparecen definiciones para muchos de los términos forestales utilizados en el documento).

El manejo de bosques naturales en LAC ha sufrido cambios positivos en las últimas tres décadas (FAO 2010). Parte de esta evolución ha sido la incorporación de técnicas de aprovechamiento de impacto reducido en bosques sujetos a planes de manejo forestal (Carrera *et al.* 2006). No obstante, el aprovechamiento ilegal de madera predomina en gran parte de la región donde hay débiles o inexistentes sistemas de monitoreo del manejo y de la trazabilidad de los productos

forestales, lo que asociado a otros factores socio económicos y políticos, dan como resultado la degradación y consecuente cambio de uso del suelo (Rautner *et al.* 2013).

Hoy día resulta importante conocer y valorar el potencial de innovaciones tecnológicas en el monitoreo de la actividad forestal y la trazabilidad de productos forestales. El presente documento procura revisar el estado actual de empleo de tecnologías en bosques naturales para la medición y monitoreo de impactos del aprovechamiento forestal, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero y la trazabilidad de productos forestales. En principio se pretende dar respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Qué generalidades metodológicas implica el monitoreo del impacto del aprovechamiento forestal para la silvicultura, para la medición de flujos de carbono en bosques bajo manejo y para la trazabilidad de los productos forestales maderables?
- ¿Qué tecnologías se emplean regularmente para estos fines?
- ¿Qué innovaciones tecnológicas disponibles en la región tienen potencial para estos fines?
- ¿Existen casos de uso de estas innovaciones tecnológicas y que ventajas presentan?
- ¿Qué limitaciones u oportunidades existen para su implementación?

La elaboración de este documento ha sido realizada con base en una revisión actualizada de estudios científicos y técnicos, complementada con entrevistas a expertos en la temática. La investigación revela que el monitoreo de los impactos de las actividades forestales sobre los recursos boscosos no se realiza de manera regular, pese a su importancia para el manejo y la contabilización de los flujos de carbono, emisiones y remociones atmosféricas de gases de efecto invernadero, producto de estas actividades. Las principales tecnologías disponibles para la evaluación de recursos naturales son empleadas para el monitoreo de la deforestación y cambio de uso de la tierra, mientras que se conoce poco sobre su potencial de uso para el monitoreo del aprovechamiento, manejo forestal y de los flujos de carbono como consecuencia de estas prácticas.

Otro hallazgo importante en la investigación ha sido que las necesidades de fiscalización y control de productos forestales muchas veces exceden la capacidad de las autoridades forestales para realizar inspecciones. Ante esto, una alternativa ha sido la promoción e incentivo a las buenas prácticas de aprovechamiento y trazabilidad forestal, mediante opciones tecnológicas que se adapten al contexto de cada país y faciliten el control de los productos forestales en la cadena de transporte, transformación y comercialización, de manera ágil y costo eficiente.

El documento contribuye a la actualización del estado del arte con relación a la aplicación de tecnologías para el monitoreo del impacto del manejo forestal en las dinámicas silviculturales y los flujos de gases efecto invernadero y sobre tecnologías de trazabilidad de productos maderables. Se concluye con una serie de reflexiones y recomendaciones sobre innovaciones tecnológicas aplicables al sector forestal latinoamericano.

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo del Proyecto *Redes y Mecanismos de Transferencia de Tecnologías para Cambio Climático: Lecciones Aprendidas en Latinoamérica y el Caribe: Sector forestal*, coordinado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), y con la participación del CATIE, que a través del Programa Bosques, Biodiversidad y Cambio Climático, lidera las acciones dirigidas a la transferencia de tecnologías que mejoren los sistemas de monitoreo de recursos forestales.



Metodología

Para alcanzar el objetivo de este trabajo, la metodología consistió en una revisión de estudios científicos y técnicos relacionados al monitoreo forestal y al aprovechamiento de madera. Esta revisión fue complementada con entrevistas a funcionarios gubernamentales, representantes de instituciones académicas, de investigación y de organizaciones especializadas de la sociedad civil, provenientes de diferentes países de la región expertos en el tema de manejo forestal y monitoreo. Durante este proceso se siguieron las siguientes etapas:

a. Determinación del alcance del estudio

- Se estableció que el ámbito del estudio para la identificación de tecnologías disponibles sería la zona tropical de la región de Latinoamérica y el Caribe, con énfasis en los países que cuentan con bosques húmedos tropicales latifoliados.
- Para guiar el estudio y la sistematización de la información recogida, se plantearon las siguientes preguntas orientadoras:
- ¿Qué generalidades metodológicas implica el monitoreo del impacto del aprovechamiento forestal para: i) la silvicultura, ii) la medición de flujos de carbono en bosques bajo manejo y iii) la trazabilidad de los productos forestales maderables?
- ¿Qué tecnologías se emplean regularmente para estos fines? ¿En qué consisten?

- ¿Qué innovaciones tecnológicas disponibles en la región tienen potencial para estos fines?
¿En qué consisten?
- ¿Existen casos de uso de estas innovaciones tecnológicas?
- ¿Qué ventajas y/o desventajas presentan estas innovaciones tecnológicas?
- ¿Qué limitaciones u oportunidades existen en el ámbito de estudio para su implementación?
¿De qué naturaleza son las limitaciones (humanas, políticas, económicas, etc.)?

b. Recopilación y sistematización preliminar de información de estudios científicos y técnicos

La recopilación de información se realizó a través de los motores de búsqueda en internet Google y Google académico, utilizando las palabras clave (en español e inglés): medición impactos aprovechamiento forestal/ manejo forestal/ bosque; medición flujo carbono aprovechamiento forestal/ manejo forestal/ bosque; trazabilidad forestal; tecnología impactos aprovechamiento bosque; tecnología trazabilidad forestal.

Los resultados de la recopilación preliminar de información fueron clasificados en tres grandes temas: a) tecnologías para la medición de impactos de aprovechamiento forestal, b) tecnologías para la medición de flujos de carbono en el aprovechamiento forestal y c) tecnologías para dar seguimiento a la trazabilidad forestal maderable.

Luego de la clasificación de la información según los temas mencionados, se realizó una búsqueda específica y de manera complementaria, se visitaron páginas web institucionales nacionales e internacionales, tanto de gobiernos como de organizaciones de la sociedad civil vinculadas al ámbito forestal presentes en países tropicales de LAC, a fin de recopilar información respecto de los sistemas nacionales de trazabilidad forestal maderable¹.

c. Sistematización de información

La información recopilada fue organizada en hojas Excel (una por capítulo). Para cada capítulo se generó un cuadro que facilitó el ordenamiento y análisis de la información, en que las etiquetas de las columnas correspondieron a cada tipo de tecnología y las etiquetas de las filas correspondieron a las preguntas orientadoras, tal como se explica en el siguiente esquema (Cuadro 1):

Cuadro 1. Sistematización de información del estudio

	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3	Tecnología n
Descripción ¿en qué consiste?				
Casos de uso en el ámbito de estudio				
Ventajas				
Desventajas				
Limitaciones para su implementación				
Oportunidades para su implementación				
Costos				

¹ En el ámbito de estudio, las principales y más innovadoras tecnologías desarrolladas para el monitoreo del aprovechamiento y trazabilidad se han enfocado en los productos maderables, mientras que para el monitoreo de los productos no maderables sigue otro tipo de procedimientos.

d. Entrevistas a especialistas

De manera simultánea a la búsqueda de información secundaria, se contactó y entrevistó a especialistas de la región de LAC con la finalidad de conocer sus experiencias y apreciaciones respecto a los avances de la región en esta temática, principalmente sobre las barreras y oportunidades para la implementación de invocaciones tecnológicas. En el Anexo 2 se listan los expertos consultados.



1

Impactos del
aprovechamiento
forestal en
bosques naturales
tropicales de
Latinoamérica
y el Caribe y
tecnologías para
su medición y
monitoreo



1.1. El monitoreo del manejo forestal maderable

El manejo forestal en bosques naturales constituye una oportunidad para promover la conservación de los recursos forestales a la vez que incentiva el desarrollo de las poblaciones rurales ligadas a su aprovechamiento. La apreciación del bosque con base en su valor de uso constituye un factor clave para su conservación (Orozco *et al.* 2006). Diversas experiencias en LAC demuestran que el manejo forestal, bajo estándares que buscan sostenibilidad de la producción y la salud del bosque², contribuye a conservar la integridad de los bosques y de los paisajes en que se encuentran inmersos evitando la deforestación (Finegan 2014).

“El **manejo forestal** es un instrumento de gestión forestal resultante de un proceso de planificación racional basado en la evaluación de las características y el potencial forestal del área a utilizarse, elaborado de acuerdo a las normas y prescripciones de protección y sostenibilidad. Se trata del uso responsable del bosque, las actividades y prácticas aplicables para el rendimiento sostenible, la reposición o mejoramiento cualitativo y cuantitativo de los recursos y el mantenimiento del equilibrio del ecosistema” (FAO s.f.).

La silvicultura es un componente fundamental del manejo forestal, que incluye tanto la cosecha o aprovechamiento de productos maderables y no maderables, como la aplicación de tratamientos silviculturales orientados a favorecer especies de interés comercial, ya sea mediante la reducción de la competencia con otras especies no deseadas, o a través de su cultivo o renovación (Louman *et al.* 2001). Los tratamientos silviculturales pretenden evitar la degradación o pérdida de productividad del bosque (Finegan 2014).

1.1.1. El aprovechamiento de madera en bosques naturales tropicales y sus principales impactos

El aprovechamiento selectivo de bosques es considerado la primera y más importante actividad de un sistema silvicultural (Louman *et al.* 2001). Consiste en la corta de un limitado número de árboles de especies comerciales, la preparación y arrastre de trozas y su transporte a aserraderos.

Las operaciones de aprovechamiento forestal ocasionan cambios e impactos sobre la estructura del bosque y el suelo, que suelen expresarse en las áreas de claros, áreas de caminos, senderos de arrastre y patios de acopio (como se le conoce en algunas regiones a aquellas zonas destinadas al almacenamiento de trozas). El aprovechamiento de los bosques produce además impactos en la biodiversidad y emisiones de GEI (Pearson *et al.* 2014). Los efectos adicionales asociados con las emisiones se discuten en el Capítulo 2 de este documento. La variación en la magnitud de estos impactos obedece a factores como el método de aprovechamiento, la intensidad de aprovechamiento, la forma de extracción de trozas (p.e. uso de maquinaria vs. tracción animal), topografía, características del suelo, condiciones climáticas durante el aprovechamiento, entre otros.

² Existen diversos sistemas de estándares de sostenibilidad. Los principios y criterios del Forest Stewardship Council (FSC) constituyen los estándares de más directa aplicación, pero existen otros marcos internacionales que pueden servir de referencia, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Finegan, 2014).

Existen dos métodos principales de aprovechamiento en bosques naturales: el aprovechamiento convencional (AC) y el aprovechamiento de impacto reducido (AIR), que tal como su nombre lo indica, involucra un conjunto de prácticas para reducir los impactos negativos de la cosecha de árboles. Las prácticas de ambos métodos han sido descritas, por ejemplo, para bosques en la Amazonía brasileña (Verissimo *et al.* 1992, Pereira *et al.* 2002, Johns *et al.* 1996, Vidal *et al.* 1998, Boltz *et al.* 2003), siendo muy similares a otras regiones tropicales como América Central, Asia y África. Las principales diferencias entre ambos métodos se presentan en el Cuadro 2.

Muchos estudios demuestran las ventajas ambientales de las prácticas de AIR sobre el AC, en aspectos como integridad ecológica y biodiversidad (Werger 2011, Putz *et al.* 2008a, 2012; Boltz *et al.* 2003, Boxman *et al.* 1985, Johns *et al.* 1996, Pinard y Putz 1996, Uhl *et al.* 1997, Elias, 1999, Barreto *et al.* 1998, van der Hout, 1999, Boltz *et al.* 2001). No obstante, se reconoce que las prácticas de AIR han sido diseñadas principalmente para mitigar impactos negativos de la cosecha de la madera y no tanto para conducir procesos relacionados a la producción sostenible (Putz *et al.* 2008a) y, aunque algunos consideran al AIR como un componente clave de la cosecha sostenible de madera (Putz *et al.* 2001, Fimbel *et al.* 2001, Sist *et al.* 2003, Sist y Ferreira 2007) y de reducción de emisiones de carbono en bosques productivos (Ellis *et al.* 2019), aún existe poca claridad y más debate sobre las bondades de estas técnicas sobre la sostenibilidad en la producción de madera o del mantenimiento de los

Cuadro 2. Diferencias entre los métodos de aprovechamiento convencional y de impacto reducido

Aspecto	AC	AIR
Nivel de planificación	Bajo: solo se planifican los árboles a aprovechar.	Alto: Planificación de árboles a aprovechar, direcciones de caída, senderos de arrastre, etc., considerando la topografía y distribución de la vegetación.
Operaciones de corta de árboles	No toma en cuenta los efectos potenciales por la caída sobre el suelo, la regeneración natural y los árboles circundantes.	Los árboles para cosechar son marcados y se determina su dirección de caída, considerando dos aspectos principales: 1) la posición de las trozas para una extracción más fácil y 2) potenciales impactos al suelo, agua y a la estructura y composición del bosque remanente, principalmente a los árboles comerciales de futura cosecha. Las lianas son normalmente cortadas un año antes del aprovechamiento de madera, para reducir el daño colateral causado en la caída.
Operaciones de arrastre de trozas hacia los patios de acopio	Con maquinaria, por caminos improvisados. El tractor de oruga es comúnmente usado para la construcción de caminos, patios de acopio y para el arrastre de trozas, provocando un daño considerable al suelo.	Se transita por caminos planificados. Se evita el tránsito de maquinaria pesada en áreas con pendientes pronunciadas. Las trozas son transportadas por el bosque ya sea con un tractor skidder o un tractor de oruga provisto de un marco maderero y cable para la suspensión y arrastre de las trozas.
Impacto sobre el suelo y vegetación remanente	Alto, la maquinaria transita por caminos improvisados afectando significativamente el suelo y destruyendo principalmente la vegetación baja.	Bajo, por las razones expuestas en "operaciones de arrastre hacia los patios de acopio".
Impacto sobre el agua	Alto, no se definen ni respetan las zonas de protección, tanto en áreas de aprovechamiento de árboles como para el tránsito de maquinaria.	Bajo, se define una zona de protección o amortiguamiento a cierta distancia de los cuerpos de agua que varía en longitud dependiendo del tamaño del cuerpo de agua. En el caso de la tala dirigida debe respetarse dicha zona y, para el trazo de senderos de arrastre, se trata en lo posible de no pasar por las zonas definidas como de protección. Igualmente, no se aprovechan árboles dentro de éstas áreas.

Fuente: Elaborado con base en Pereira *et al.* (2012), Putz *et al.* (2008a), Sist (2000)

flujos de ciertos servicios ecosistémicos que proveen los bosques tropicales no perturbados, como la regulación hídrica y el secuestro de carbono. Varios estudios sobre monitoreo y modelamiento de rendimientos de madera en el trópico demuestran incluso que solo el AIR no garantiza que las cosechas posteriores produzcan volúmenes similares en cantidad y calidad de madera comparable a la primera corta (Fredericksen *et al.* 2003, De Graaf 2000, Sist *et al.* 2003, Kammesheidt *et al.* 2001, Dauber *et al.* 2005, Sist y Ferreira 2007, Van Gardingen *et al.* 2003, 2006) y, de acuerdo con referencias de especialistas de la región, al parecer no existen análisis económicos o resultados publicados respecto a la realización de un segundo turno de cosecha maderable.

Tratamientos silviculturales después de implementar AIR son necesarios para mantener los bosques productivos. Algunos pueden ser fáciles de aplicar y costo-efectivos, mientras que otros son costosos o no se aplican regularmente por el principio de precaución, en resguardo de la gran biodiversidad que albergan los bosques tropicales (esto sucede por ejemplo con tratamientos como el refinamiento). Tratamientos como la liberación de lianas y de competencia con árboles vecinos no comerciales, han mostrado ser efectivos para incrementar significativamente las tasas de crecimiento de árboles elegidos para la futura cosecha (Finegan *et al.* 1999, Guariguata 1999, Wadsworth y Zweede, 2006). La plantación de enriquecimiento en claros de bosque como tratamiento para asegurar la recuperación de las reservas maderables en áreas bajo AIR se ha implementado en la Amazonia brasilera, a fin de que se cumplan con los objetivos de los sistemas silviculturales policíclicos (Schwartz y Lopes, 2014). Recientemente, Roopsind *et al.* (2017) presentaron resultados de una evaluación 32 años después de la primera cosecha bajo AIR y en parcelas sujetas a tratamientos silviculturales (sistema CELOS en Surinam) y concluyen que para intensidades de aprovechamiento de entre 15 a 23 m³ha⁻¹, la posibilidad de recuperación de las reservas maderables a los niveles originales es de hasta un 80%. Testimonios de especialistas en manejo forestal refieren que otros tratamientos ensayados, como las plantaciones de enriquecimiento en fajas, han sido descartados por usuarios del bosque debido a experiencias fallidas en concesiones forestales de la Amazonía.

El aprovechamiento forestal en áreas bajo AIR o AC generará impactos de diferentes intensidades, en función a las prácticas implementadas. Estos impactos, necesitan ser monitoreados para la toma de decisiones silviculturales que conduzcan al cumplimiento de los objetivos de manejo. El Cuadro 3 describe los principales impactos del aprovechamiento forestal y los procedimientos, herramientas y equipos comunes para su evaluación.

1.2. Experiencias, barreras e incentivos para el monitoreo del manejo forestal en Latinoamérica y el Caribe

El monitoreo del impacto del manejo forestal sobre los atributos ecológicos y productivos de un bosque es un componente integral e imprescindible del manejo adaptativo y es utilizado en la mayoría de los enfoques modernos del manejo forestal. El manejo adaptativo se centra en el uso de información recopilada durante las acciones de manejo para 'adaptar' las futuras acciones, esto dentro del marco de hacer, aprender y mejorar (Stankey *et al.* 2005). El monitoreo ayuda a detectar cambios en las condiciones del bosque -deseables e indeseables- y a relacionar tales cambios con las operaciones de manejo y otros factores, permitiendo mejorar el plan de manejo y conducir las unidades de manejo hacia un estado deseado de producción y, que contribuya a la conservación de los bosques.

Cuadro 3. Principales impactos del manejo forestal y los procedimientos, herramientas y equipos para su evaluación

Impacto ambiental	¿Cómo se genera?	¿Qué magnitudes puede alcanzar y cómo influye el tipo de aprovechamiento?	¿Cómo se evalúa?
Alteración en la biomasa forestal por cosecha de madera	Las diferentes intensidades de corta de árboles generan alteraciones en las reservas de biomasa de los bosques aprovechados, debido al retiro de árboles maduros.	<ul style="list-style-type: none"> - En bosques húmedos tropicales, las magnitudes de estas alteraciones pueden variar de acuerdo con la región. Sist (2000) señala que para África Central y del Oeste se cosecha en promedio 1-3 árboles ha⁻¹, o 15-20 m³ ha⁻¹; para el sureste de Asia (Malasia/Indonesia) se extrae un promedio de 7-10 árboles ha⁻¹, ó 80 a 120 m³ ha⁻¹ y para América del Sur se cosechan en promedio 5-7 árboles ha⁻¹, que representan un volumen entre 30-50 m³ ha⁻¹. En Centroamérica, específicamente en el caso de las concesiones forestales, el límite de aprovechamiento es de 1-2 árboles ha⁻¹. - Se reportan pocas diferencias en intensidad de aprovechamiento entre métodos de cosecha. Asner <i>et al.</i> (2004) no encontraron diferencias en cuanto a número de árboles cosechados por hectárea ($p=0,13$), entre bosques bajo AC ($4,0 \pm 1,7$) y AIR ($3,3 \pm 0,5$). 	<p>Se cuantifica el número y proporción de árboles que han sido retirados por el aprovechamiento forestal y se mide su volumen.</p> <p>Por lo general, estos cálculos forman parte de la contabilidad económica del aprovechamiento, con mediciones directas en campo con el uso de cintas diamétricas y métricas.</p>
Daños en árboles remanentes y mortalidad	Las operaciones de aprovechamiento generan daño en las copas y tallos de otros árboles, producto de la caída de árboles cosechados. Además, el arrastre de trozas genera daños en la corteza y madera de árboles remanentes y causa daños y mortalidad de la regeneración natural, al provocar rotura y desraizamiento de tallos pequeños, de entre 10-30 cm de diámetro a la altura del pecho (dap) (Hendrison 1990, Pinard y Putz 1996, Bertault y Sist 1997, Sist y Berault 1998).	<ul style="list-style-type: none"> - La magnitud del daño depende del método de aprovechamiento implementado. Con AIR se puede reducir el daño a la vegetación del bosque hasta en un 30-50% con respecto al AC (Hendrison 1990, Pinard y Putz 1996, Bertault y Sist 1997, Sist y Berault 1998). - Para el caso específico de la Amazonía en Brasil, Guyana y Ecuador, Boltz <i>et al.</i> (2003) encontraron que el AC genera entre un 10-45% más de daños con respecto al AIR. - La proporción de árboles con daño severo también se puede reducir con AIR. Bertault y Sist (1997) y Sist y Bertault (1998) presentan resultados de Indonesia y señalan que la proporción de árboles con daños severos se reduce de 23,2% para el AC a 13,6% para el AIR. - En bosques húmedos sin aprovechamiento, la tasa de mortalidad anual puede oscilar entre 1-2%, mientras en bosques con menos de 10 años de haber sido cosechados, esta puede llegar a 3-5% (Nicholson 1979, Primack <i>et al.</i> 1985, Manocharán y Kochumen 1987, Lieberman y Lieberman 1987). Finegan y Camacho (1999) reportan tasas de mortalidad de 2,1 a 2,2% para bosques bajo AIR, en los primeros siete años después de la cosecha. 	<p>Se cuantifica el número, volumen, biomasa o proporción de árboles que han sido dañados, afectados o murieron por consecuencia del aprovechamiento forestal.</p> <p>Los daños por lo general se clasifican como leves, medios o severos, mediante evaluaciones visuales.</p>
Perturbación de la cobertura boscosa en términos de área	El aprovechamiento forestal implica la apertura de claros de bosque, debido a la caída de árboles, apertura de caminos, senderos de arrastre y patios de acopio. De estos, los senderos de arrastre son la principal perturbación, indistintamente del método de cosecha.	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de Asner <i>et al.</i> (2004) y Hendrison (1990) señalan que, para bosques tropicales en Suramérica, áreas bajo AC tienen en promedio $12,7 \pm 2,9\%$ de área perturbada, mientras que para el AIR oscila entre $6,3 \pm 2,3\%$. - Boltz <i>et al.</i> (2003) encontraron que el área de claros producida por la tumba de árboles puede llegar a ser entre un 32-139% mayor por árbol en el AC que con respecto al AIR. Las áreas impactadas dependen del tamaño de los árboles cosechados. Estudios como los de Gullison y Hardner (1993), Ter Steege <i>et al.</i> 1994 y Pinard <i>et al.</i> (1996), señalan valores de entre 328 ± 143 m² por hectárea para áreas bajo AC y de entre 175 ± 42 m² para áreas bajo AIR. 	<p>Se mide el área impactada y su proporción respecto del área total manejada o intervenida.</p> <p>Existen distintas maneras de evaluarlo, desde estimaciones visuales, mediciones <i>in situ</i> con un sistema de posicionamiento global (GPS) y cintas métricas y teledetección mediante sensores remotos.</p>

Impacto ambiental	¿Cómo se genera?	¿Qué magnitudes puede alcanzar y cómo influye el tipo de aprovechamiento?	¿Cómo se evalúa?
		<ul style="list-style-type: none"> - Los patios de acopio y los caminos son componentes que producen un menor grado de daño en el área de bosque, usualmente promediando menos del 1% y 2% del total de área cosechada, respectivamente (Asner <i>et al.</i> 2004, Hendrison 1990). Aunque el número de patios de acopio suele ser menor en el AC ($6,0 \pm 2,7$) que en el AIR ($9,0 \pm 2,2$), el área impactada es mayor en el AC ($1000 \pm 432 \text{ m}^2$) que en el AIR ($560 \pm 38 \text{ m}^2$). (Gullison y Hardner 1993, Ter Steege <i>et al.</i> 1994 y Pinard <i>et al.</i> 1996). - En bosques bajo AC, los valores de área de senderos de arrastre reportados duplican al de AIR (AC: $8,8 \pm 2,4\%$; AIR: $4,2 \pm 1,6\%$) (Asner <i>et al.</i> 2004, Hendrison 1990). 	
Alteración de la entrada de luz al bosque	Distintos niveles de apertura de claros de bosque por el aprovechamiento forestal generan alteraciones en el microclima, por el ingreso de luz al bosque, lo que incide sobre procesos ecológicos fundamentales como regeneración, sucesión, productividad primaria, balance hídrico y dinámicas poblacionales, entre otros (Putz <i>et al.</i> 2001, Gerwing 2002, Brokaw 1985, Murray 1988).	<ul style="list-style-type: none"> - En bosques tropicales de dosel cerrado, una de las restricciones más importantes para el crecimiento de plantas es la baja intensidad de luz que llega al sotobosque (Johns <i>et al.</i> 1996) y que se estima entre un 2%-3% de la radiación fotosintéticamente activa (RAFA, cantidad de radiación capaz de producir fotosíntesis, usualmente comprendida entre las longitudes de onda de 400-700 nm) que alcanza el dosel (Lee 1987, Gastellu-tchegorry <i>et al.</i> 1999). Esta baja radiación en el sotobosque de bosques tropicales poco alterados se debe a la baja proporción de claros que allí se encuentra, que se estima en un rango entre 2%-8% del área total del bosque (e.g., Chazdon y Fetcher, 1984, Asner <i>et al.</i> 2002). Un efecto inmediato del aprovechamiento de madera es el incremento en la intercepción de la RAFA y con ello en la productividad de los bosques tropicales. Aperturas del dosel crean condiciones de luz favorables para muchas especies del bosque, incluyendo las comerciales, que se mantienen durante los primeros 5 años de la intervención, estimulando el crecimiento de los árboles (Primack <i>et al.</i> 1985, Jonkers 1987, Nguyen-Thé <i>et al.</i> 1998). 	La RAFA se evalúa de manera directa mediante radiómetros especializados (equipos medidores de radiación) o mediante equipos que miden indirectamente la entrada de luz o cobertura del dosel tales como cámaras para fotografías hemisféricas, densiómetros esféricos, o la evaluación visual de la cobertura de copas.
Otros: cambios en la biodiversidad, suelo y recursos hídricos	El aprovechamiento forestal puede afectar el ciclo hídrico y la calidad de agua (reducción de evapotranspiración y aumento en la cantidad de precipitación que llega directamente al suelo, aumento de escorrentía en temporada lluviosa, mayor sedimentación), afectar las poblaciones de las especies sujetas a cosecha y la dinámica de la vegetación y de las poblaciones de fauna (reducción de fuentes de alimento, destrucción de nichos o caza). La compactación y reducción de infiltración puede afectar al ciclo de nutrientes (Orozco <i>et al.</i> 2006).	<ul style="list-style-type: none"> - En claros grandes (más de 400 m^2), la humedad de suelo es mayor en la temporada lluviosa y menor en la temporada seca, pero su efecto sobre los caudales de la red hídrica es mínimo si la intervención es moderada. La presencia de vegetación y su regeneración contribuye a amortiguar los impactos del aprovechamiento sobre la capacidad de infiltración de suelo y la disponibilidad de agua, así como reducir la sedimentación. El AIR contribuye a reducir estos impactos pues genera claros de menor tamaño y una menor red vial, con menor compactación de suelos. Respecto a la afectación al ciclo de nutrientes (calcio, potasio, magnesio y nitrógeno), solo se da de manera significativa a nivel de claros y no de ecosistema (Orozco <i>et al.</i> 2006). 	La principal medición de impacto en agua y suelo es el tamaño de claros (se mide el área impactada y su proporción respecto del área total manejada o intervenida con estimaciones visuales, mediciones in situ con GPS y cintas métricas y teledetección mediante sensores remotos). Monitoreo de fauna puede realizarse también, adecuando los dispositivos de muestreo según el organismo de interés (p.e. mamíferos terrestres, aves, mariposas).

1.2.1. Experiencias de monitoreo de impactos del manejo forestal en LAC

Los resultados de este estudio muestran que las iniciativas de monitoreo a largo plazo que consideran la respuesta de los impactos o perturbaciones del manejo forestal son escasas en la región tropical y más aún en LAC. Además de que muchos de los ensayos instalados no tienen continuidad en la publicación de los resultados y la información proveniente de ellos está desactualizada. Dentro de las pocas iniciativas se destacan investigaciones sobre dinámica forestal enfocadas en estimaciones de crecimiento, mortalidad y reclutamiento a nivel del rodal o de especies de interés, así como de captura de carbono y recuperación de biodiversidad. Este tipo de monitoreo es relevante para la construcción de herramientas que guíen la toma de decisiones de manejo, como es el caso del desarrollo de modelos de crecimiento que estiman la productividad del bosque según niveles de corta de árboles y cantidad de daño provocado por el aprovechamiento (Vanclay 1994, Ong y Kleine 1995, Siteo *et al.* 2001, Campo-Kurmen 2015).

Los casos documentados de monitoreo sistemático y de largo plazo en la región de LAC se han dado sobre todo para la investigación científica por diferentes entes nacionales e internacionales (Cuadro 4, Anexo 3). Aunque varios de estos estudios empezaron hace cerca de 40 años, especialistas en la materia señalan que la década de los años 90's del siglo pasado fue muy importante, pues fue cuando diversos centros de investigación empezaron a implementar ensayos con miras a la sostenibilidad del uso de los recursos naturales, motivados principalmente por los acuerdos de la Cumbre de Río³. También señalan que la finalidad principal de estos ensayos al momento de su instalación fue asegurar la continuidad de la producción de madera de bosques naturales, con un enfoque industrial que progresivamente se fue diversificando y abarcando los aspectos sociales y ambientales del manejo de bosques (manejo forestal comunitario). Las publicaciones recientes ponen en manifiesto que, en los últimos años, los objetivos de este tipo de investigaciones incluyen también propósitos y enfoques relacionados a la conservación de la biodiversidad, el secuestro de carbono y la provisión de servicios ecosistémicos.

En menos de la mitad de los casos documentados, el monitoreo ha sido implementado por productores privados o autoridades forestales y, más raro aún, es la aplicación de los resultados obtenidos en la propia actividad maderera. Los casos más destacables corresponden a las concesiones forestales certificadas con estándares FSC a cargo de empresas privadas en Guatemala, Brasil y Perú, en los que se implementan técnicas silviculturales como corta de lianas, refinamiento y enriquecimiento de claros en antiguos patios de acopio. Lamentablemente, y de acuerdo a consultores internacionales especializados en certificación, en estos casos no se ha prestado atención a la instalación de parcelas permanentes de muestreo (PPM) para el monitoreo de dinámicas silviculturales bajo una rigurosidad científica suficiente para el análisis estadístico. Romero *et al.* (2017), por ejemplo, indican que los estándares de la certificación FSC evalúan una compleja diversidad de aspectos ambientales, sociales y de rentabilidad, que incluyen elementos como el cumplimiento de las normativas, evitar las actividades ilegales, la producción sostenible de madera, la reducción de la degradación de los bosques y deforestación, el mantenimiento de la biodiversidad y servicios ecosistémicos, el fortalecimiento de capacidades, la inserción en una cadena de valor, mejores condiciones de vida y de trabajo, la prevención

³ Cumbre de la Tierra organizada por la Organización de las Naciones Unidas en Río de Janeiro, Brasil, del 3 al 14 de junio de 1992. Es relevante por haber enmarcado el concepto oficial de desarrollo sostenible, la aprobación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la ratificación de la Declaración de Principios relativos a los Bosques y el Convenio sobre la Diversidad Biológica.

efectiva de conflictos y buenas relaciones con las comunidades cercanas. Aunque la instalación de PPM para evaluar la dinámica del bosque posterior al aprovechamiento podría vincularse a algunos de estos elementos, a la fecha no ha sido el foco principal de evaluación de la certificación.

El caso de la Reserva de la Biósfera Maya en Guatemala es considerado un referente en Latinoamérica por demostrar las bondades del manejo sostenible de bosques naturales y su directa aplicación. Testimonios de especialistas con experiencia en la zona señalan que las comunidades a cargo de las concesiones forestales entendieron la necesidad de contar con datos sitio-específicos para la toma de decisiones silviculturales, por lo que se ha instalado una red de PPM. Sin embargo, señalan también que una debilidad de estos ensayos es que los datos colectados no cuentan con validez estadística (no es un diseño experimental adecuado, las mediciones no están estandarizadas dentro de la red), pero son suficientes para el reporte ante la autoridad (CONAP, Consejo Nacional de Áreas Protegidas) respecto al manejo silvicultural y para la toma de decisiones por parte de los usuarios del bosque (por ejemplo, se propone a la autoridad forestal reducir los ciclos de corta). Los beneficios de estos esfuerzos para la conservación se evidencian en los resultados de 20 años de seguimiento, que muestran el buen estado de conservación de la cobertura boscosa en las zonas de uso múltiple, otorgadas en concesión a comunidades e industrias forestales por un periodo de 25 años renovables, bajo obligación de contar con la certificación del manejo por parte del FSC. Además de contribuir al bienestar

Cuadro 4. Principales iniciativas de monitoreo forestal en bosques tropicales de Latinoamérica y el Caribe

País	Temática principal de la experiencia de monitoreo silvicultural	Responsable
Belice	Regeneración natural y asistida de <i>Swietenia macrophylla</i> en áreas de producción maderable	Ejidos mayas
Bolivia	AIR y tratamientos silviculturales para la producción maderable, con énfasis en <i>Swietenia macrophylla</i>	Instituto Boliviano de Investigación Forestal (IBIF)
Brasil	Sistema CELOS: AIR y tratamientos silviculturales para la producción maderable	EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) y SUDAM (Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia). Empresa Precious Wood
Costa Rica	AIR y tratamientos silviculturales para la producción maderable; efectos en biodiversidad vegetal	CATIE
Guatemala	Tratamientos silviculturales para la producción maderable	Comunidades de la Reserva de Biósfera Maya
Guyana	Sistema CELOS: AIR y tratamientos silviculturales para la producción maderable	Tropenbos International
Guyana Francesa	Dinámica del bosque después de la intervención silvicultural	CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement)
México	Regeneración natural y asistida de <i>Swietenia macrophylla</i> en áreas de producción maderable	Ejidos mayas
Surinam	Sistema CELOS: AIR y tratamientos silviculturales para la producción maderable	SBB y CELOS
Venezuela	Efectos de intensidades de aprovechamiento en la recuperación del bosque	Universidad de los Andes

socioeconómico de la población local, estas concesiones están incluso mejor conservadas que los parques nacionales aledaños (Carrera 2018) y constituyen un caso de manejo forestal comunitario emblemático, por la integración de los valores culturales en el enfoque de manejo sostenible del bosque.

En México (Quintana Roo y Yucatán) y Belice, ejidos con actividades de manejo forestal comunitario tienen experiencias de largo plazo en el seguimiento silvicultural de la regeneración natural de caoba (*Swietenia macrophylla*) y vienen realizando ensayos silviculturales de enriquecimiento en áreas de intervención antrópica y extracción maderera (Snook 2005).

Los dos experimentos silviculturales implementados por CATIE a finales de los años 80s en bosques húmedos tropicales en Costa Rica, cuentan con más de 14 mediciones, la última realizada en 2015. Su base de datos es rigurosa en términos del registro de variables estructurales y en la identificación botánica de las especies. Estos experimentos han generado una gran cantidad de información sobre dinámica de bosques productivos intervenidos y de impactos del manejo forestal en biodiversidad (Finegan *et al.* 1999, Finegan y Camacho 1999, Delgado *et al.* 1997, Finegan *et al.* 2001). Los resultados del monitoreo de estos experimentos se han utilizado para la prescripción de umbrales de aprovechamiento en un tipo específico de bosque encontrado en la zona noreste de Costa Rica, que es el que se halla en los sitios bajo estudio por parte del CATIE, conocido como bosques de *Pentaclethra macroloba* con palmas (Sesnie *et al.* 2009). También han permitido el desarrollo de un modelo de dinámica forestal que simula cambios estructurales y de biodiversidad en este tipo de bosque de acuerdo a variaciones en intensidades de intervención maderera y silvícola (Siteo *et al.* 2001, Campo-Kurmen 2015).

El sistema CELOS, implementado en Surinam, se destaca por la continuidad en su monitoreo, cuya publicación más reciente muestra datos tomados hasta el año 2012 (Roopsind *et al.* 2017). Esto ha permitido generar modelos de recuperación de carbono, biomasa y reservas de madera. Actualmente el monitoreo está a cargo de la Fundación para el Manejo Forestal y Control de la Producción (SBB) y el Centro de Investigación Agronómica de Surinam (CELOS) quienes, en conjunto con concesionarios forestales, tienen a su cargo el seguimiento de las PPM. El objetivo de este sistema es la producción de maderas duras de forma sostenible en los bosques tropicales del país (Werger 2011) y consiste básicamente de cosechar árboles maderables y favorecer el crecimiento de remanentes de especies comerciales deseables, a través de tratamientos silviculturales, por lo que se suele diferenciar entre el sistema de aprovechamiento CELOS (bajo principios del AIR) y el sistema silvicultural CELOS (manejo de luz y refinamiento para eliminar especies no deseables).

La información proveniente del monitoreo del sistema CELOS abarca los efectos de los tratamientos y de distintas intensidades de aprovechamiento sobre el crecimiento, la recuperación de biomasa y de los almacenes de carbono, la regeneración y mortalidad de las especies comerciales, así como en la diversidad de especies forestales, la biomasa, la fertilidad de los suelos, la disponibilidad de agua y la distribución de la fauna (Werger 2011). Información recogida entre los años 1978 y 2012 ha sido empleada para actualizar el seguimiento de los resultados del sistema y ha permitido, por ejemplo, generar recomendaciones para la normativa forestal respecto al ciclo de corta (Roopsin *et al.* 2017), estimar factores de emisión de carbono por AIR, analizar la relación entre biodiversidad y productividad, entre otros estudios en curso. Este sistema ha sido adaptado para su implementación en otros países como Guyana y Brasil.

El sistema CELOS en Brasil

Vino a fortalecer el sistema silvicultural policíclico (SSP), desarrollado por EMBRAPA y la SUDAM (Superintendencia para el Desarrollo de la Amazonía) (Schwartz y Lopes 2014). Además, la empresa Precious Wood ha trabajado desde el año 1994 en sistemas silviculturales a largo plazo, incorporando innovaciones tecnológicas, como el inventario forestal con el uso de GPS, la generación de modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés), el desarrollo de una base de datos bajo la forma de una aplicación digital y un sistema de información geográfica. A partir del año 2003, se implementó un sistema de monitoreo en parcelas permanentes de media hectárea por cada 200 hectáreas de bosque bajo producción (de Graaf y van Eldik 2011).

El sistema CELOS en Guyana

TROPENBOS estableció parcelas experimentales en el bosque Greenheat, que han permitido estudiar la dinámica de bosques con y sin aprovechamiento, así como de los ciclos hídricos y de nutrientes, el crecimiento y productividad, la biodiversidad, parámetros de sostenibilidad, los productos no maderables y el desarrollo de capacidades. Van der Hout (2011) en Werger (2011) compila los principales resultados de la primera y segunda fase de este programa, en el que se obtuvieron conclusiones sobre las distintas intensidades de aprovechamiento, la necesidad de mantener la población de individuos jóvenes para permitir nuevos ciclos de corta en un periodo de 20 a 25 años, el alto impacto de operaciones de arrastre inadecuadas, la conveniencia de mantener los claros de bosque en el menor tamaño posible (alrededor de 300 m²) y lo más distanciados posible, el tiempo de recuperación de las reservas de madera a su estado inicial (100 – 120 años), entre otros (Ter Steege *et al.* 1994, 1996; Ek 1997 y Rose 2000 en Werger 2011).

En Brasil, además de los ensayos con el sistema CELOS, el Servicio Forestal Brasileño ha instalado PPM en concesiones bajo aprovechamiento forestal (en la más antigua, la extracción data del año 2010), en las cuales se hacen evaluaciones de recuperación cada cinco años. De manera complementaria, funcionarios de esta institución señalan que se está aprovechando la disponibilidad de vuelos LiDAR para direccionarlos hacia estas PPM, a fin de generar imágenes que permitan en el futuro analizar la posibilidad de utilizar imágenes para evaluar las PPM de manera sistemática.

El Instituto Boliviano de Investigación Forestal (IBIF) tiene a su cargo PPM instaladas bajo cuatro tratamientos silviculturales (diferentes intensidades de prácticas silviculturales), que están destinadas a evaluar el costo y la efectividad de estos tratamientos, su efecto sobre la biodiversidad, el contenido de biomasa y las funciones del ecosistema. Los tratamientos incluyen prácticas de AIR, liberación de competencia de especies no deseables, corta de lianas, entre otros. Se recogió testimonios que señalan que estas parcelas permanecen en monitoreo hasta la actualidad y han permitido, por ejemplo, llegar a conclusiones acerca de la influencia de la intensidad del aprovechamiento en la recuperación de poblaciones de caoba (*Swietenia macrophylla*) y generar recomendaciones para la silvicultura de esta especie (Verwer *et al.* 2008). Vilanova y Sabogal (2012) hacen un análisis del estado de la silvicultura en bosques naturales en este país y citan también prácticas de manejo pasivo (solo seguimiento) y activo (regeneración asistida), en otras regiones como la Guyana venezolana.

En Venezuela, la Universidad de los Andes ha realizado estudios a largo plazo en PPM en la Reserva Nacional Caparo, que han permitido determinar, por ejemplo, el efecto de distintas intensidades de aprovechamiento sobre la diversidad específica de la regeneración natural, después de 19 años de recuperación (Sánchez *et al.* 2008). De acuerdo a profesionales que conocen la localidad, esta reserva, actualmente, se encuentra bajo amenaza por deforestación, lo que afecta la fiabilidad de los resultados de las PPM, por el efecto de borde que se genera.

Finalmente, otra iniciativa recogida en el presente estudio se da en Guyana francesa, en donde CIRAD ha mantenido el seguimiento a PPM desde 1982, en las que se han realizado estudios relacionados a la dinámica del bosque (incluyendo crecimiento y carbono) antes y después de las operaciones silviculturales; la influencia de la luz y la regeneración natural (Gourlet-Fleury *et al.* 2004).

1.2.2. Condiciones habilitadoras, incentivos y barreras para el monitoreo de impactos del manejo forestal en Latinoamérica y el Caribe

Las bondades del manejo forestal y el AIR han sido estudiadas por investigadores en diversas localidades del trópico; sin embargo, las prácticas de su monitoreo no son comúnmente adoptadas por la mayoría de los usuarios del bosque (Putz y Ruslandi 2015). Los testimonios y opiniones recogidos durante este estudio ayudaron a determinar que esto se debe a que existen más barreras que incentivos para titulares de unidades de manejo forestal, cuya índole es tanto política como económica y de capacidades humanas.

Una barrera histórica, referida por especialistas, es la no priorización de la temática por parte de las organizaciones e instituciones vinculadas al quehacer forestal, quienes en las últimas décadas se han centrado en el inventario de los recursos forestales y carbono a gran y mediana escala, a la conservación de la biodiversidad, el desarrollo de sistemas de alerta temprana de deforestación e incendios forestales y en especial a la vigilancia de la deforestación y el cambio de uso de la tierra en las áreas boscosas. Aunque varios de estos sistemas se destacan por el uso de herramientas tecnológicas tales como imágenes de sensores remotos de alta resolución o plataformas digitales para el almacenaje y procesamiento de información⁴, estas son apropiadas para el análisis a escala de paisaje, suficiente para monitorear deforestación y factores de cambio de uso de la tierra (incendios, agricultura, minería, asentamientos humanos, etc.), pero no para el monitoreo silvicultural, el mismo que, tal como lo señalan especialistas en la materia, requiere un análisis a escala muy fina y con alta inversión de recursos humanos para el seguimiento a largo plazo de la vegetación en áreas principalmente perturbadas, como caminos, senderos de arrastre, patios de acopio y claros por caída de árboles, donde la dinámica de la regeneración natural es mayor.

El monitoreo silvicultural demanda una logística y seguimiento de largo plazo, con costos de recursos humanos y/o uso de tecnología que la mayoría de los titulares de derechos de aprovechamiento no están dispuestos a asumir por cuenta propia, si no aprecian un retorno directo a esta inversión. Esto se ha convertido en una barrera, a la que se suman las distorsiones de mercado por la competencia desleal de la madera de origen ilegal en los mercados nacionales o internacionales que afecta negativamente la rentabilidad de la producción forestal legal.

⁴ Por ejemplo, el Proyecto de Monitoreo de Deforestación de los Biomas Brasileños por Satélite (PMDBBS), el sistema de alerta temprana Terra-i de Perú y el mapeo nacional en El Salvador mediante tecnología LiDAR (light detection and ranging)

Especialistas forestales opinan que un agravante es la ausencia de incentivos directos (p.e. de mercado o apoyo gubernamental) suficientes para justificar la inversión de recursos, como son los casos en que las áreas bajo manejo tienen poca cantidad de madera de alto valor comercial y la prioridad de los tomadores de decisiones tiende únicamente a la extracción, con una visión de rentabilidad a corto plazo. Para superar estas limitaciones, se recomienda la generación o fortalecimiento de incentivos diferenciados para usuarios de bosques manejados de forma sostenible y bajo marcos de legalidad y un análisis de costo-beneficio de la implementación de ensayos silviculturales y PPM para el monitoreo silvicultural.

La certificación forestal es un mecanismo del mercado que en los últimos años ha impulsado a las empresas que operan bajo sus estándares a implementar actividades de monitoreo de trazabilidad y de manejo forestal, aunque, según especialistas en certificación, los detalles metodológicos de su implementación aún no impulsan la innovación tecnológica. Por ejemplo, el FSC en su principio 8 señala la obligación de monitorear y evaluar los objetivos de manejo y los impactos ambientales y sociales, entre otros. Los estándares de certificación del FSC cambian en función a los países y tipos de bosque⁵ y son flexibles para adaptarse a las condiciones y posibilidades de los distintos tipos de usuarios. Por lo general, se basan en la implementación de técnicas de AIR y de sistemas de manejo forestal sostenible y para demostrar su cumplimiento, empresas certificadoras (como Société Générale de Surveillance -SGS, Rainforest Alliance, Control Union Certification, entre otras), exigen o recomiendan el uso de protocolos o formatos de medición en campo para evaluar la composición florística y la regeneración natural antes y después de las operaciones de aprovechamiento forestal en las unidades de manejo. En cuanto a los aspectos metodológicos, la certificación suele emplear metodologías sencillas y no está sujeta a protocolos únicos. Por esta misma razón, los titulares de las unidades de manejo forestal no están obligados a utilizar tecnología avanzada o de alta resolución para el monitoreo.

Sin embargo, no todos los usuarios del bosque tienen la posibilidad de invertir para contar con validaciones y verificaciones de estándares como FSC, ya sea por limitada capacidad de inversión o por algún otro factor. Principalmente empresas grandes de Brasil y Perú que tienen la posibilidad de implementar sistemas internos de monitoreo (SIG, registros electrónicos de inventario y producción) llevan a cabo estas experiencias. Este monitoreo, tal como lo refieren especialistas en certificación, está orientado principalmente al control operacional de la producción, la trazabilidad para demostrar el origen legal de los productos y la mitigación de impactos ambientales, mientras que abordan el monitoreo de las dinámicas silviculturales de manera secundaria.

Aún en el caso de usuarios del bosque legales y certificados, especialistas señalan que se percibe una idiosincrasia orientada al cumplimiento de la normativa forestal de cada país (por ejemplo, se registran datos relacionados a la regeneración natural, para ser presentados ante las autoridades forestales y las empresas certificadoras), pero esta información no se utiliza para la toma de decisiones silviculturales de largo plazo o no se lleva a cabo de manera apropiada (no permite su análisis estadístico por falta de rigurosidad). Estos paradigmas constituyen una barrera, para lo que se hace necesario llevar un proceso de sensibilización que permita entender la importancia del monitoreo silvicultural en la sostenibilidad de la actividad forestal y de la trascendencia de los resultados de los monitoreos, desde la colecta y análisis de datos, la presentación bajo condiciones transparentes, el intercambio de lecciones aprendidas y la toma de decisiones.

⁵ Son fijados de acuerdo con el procedimiento llamado "Proceso para el desarrollo y mantenimiento de los Estándares Nacionales de Gestión Forestal" y las políticas del FSC (FSC 2019)

Otra barrera para el monitoreo del manejo forestal en los países tropicales de LAC es la falta de claridad por parte de autoridades y actores forestales sobre qué indicadores silviculturales se necesitan medir. Esto impide el establecimiento de protocolos metodológicos claros para la toma de datos y la definición de tecnologías más apropiadas para ello. A su vez, el establecimiento de estos protocolos puede tornarse sumamente complejo si se considera la diversidad de los recursos boscosos, aún dentro de un mismo país. Un ejemplo de este desafío es la complejidad metodológica que tuvo que abordar el Servicio Forestal Brasileño, pues, de acuerdo a testimonios de profesionales vinculados a esta institución, fue necesario desarrollar complejos algoritmos para el monitoreo de áreas bajo aprovechamiento en la plataforma de Google Engine, con base en imágenes satelitales de resolución media.

Una barrera de índole político es que la legislación forestal en la mayoría de los países de la región no señala la necesidad de generar datos de monitoreo de las actividades de extracción forestal sobre el bosque, por lo que se mantienen debilidades de planeamiento y presupuesto entre las autoridades nacionales para dar seguimiento y generar incentivos en esta temática. Ante esto, testimonios de especialistas forestales señalan que la cooperación internacional, con fondos provenientes de países desarrollados, ha jugado un rol importante en darle impulso a las iniciativas de monitoreo silvicultural.

Los financiamientos externos han hecho posible la difusión de mecanismos como la certificación forestal y el enfoque de AIR y han generado incentivos financieros temporales para su implementación, pese a ello, en opinión de especialistas con experiencia internacional, la dependencia de fondos externos puede resultar perjudicial en términos de la sostenibilidad económica de estas iniciativas.

Respecto de las experiencias de cooperación, especialistas de Surinam refieren la dificultad de conciliar los enfoques de los actores locales con los enfoques de los organismos cooperantes, lo que puede resultar en que la ejecución de proyectos resulte poco efectiva. El intercambio de experiencias y colaboración Sur-Sur, en cambio, ha resultado provechosa para los especialistas de este país, en el camino a un mejor entendimiento acerca del monitoreo, usos de tecnologías, necesidades de información y enfoque propio (caso del proyecto *"Monitoring the forest cover within the Amazon Region" (2012-2018) and the "REDD+ for the Guiana Shield Project"*, manejado por CELOS y SBB en Surinam). De otro lado, el diálogo interno a nivel de región o país, entre actores locales, organizaciones, especialistas técnicos e instituciones, genera condiciones habilitadoras para el aprendizaje, el fortalecimiento de capacidades y, sobre todo, la construcción colectiva de la visión nacional respecto al manejo forestal y su monitoreo, con objetivos que permiten enmarcar las actividades hacia un avance progresivo en la silvicultura.

La literatura consultada (Pearson *et al.* 2014, Pearson *et al.* 2017), y el resultado de las entrevistas a especialistas, coinciden en indicar que en la actualidad la evaluación de impactos del aprovechamiento forestal sobre el bosque se realiza utilizando metodologías tradicionales, con el empleo de equipos de uso sencillo y de bajo costo, tales como cintas métricas, cintas diamétricas y brújulas, puesto que a los usuarios del bosque les basta con ello para el cumplimiento de los estándares impuestos por autoridades y certificadoras. Aunque esto sea una limitante para la innovación tecnológica, a su vez constituye una oportunidad importante para las poblaciones ligadas al bosque, como generadora de fuentes de trabajo y el desarrollo de capacidades.

La disponibilidad de innovaciones tecnológicas⁶, puede aportar a la toma de decisiones en silvicultura, pero su facilidad de implementación depende de factores como el tipo de tecnología, las condiciones del sitio, las normativas del país, la facilidad de uso y los costos. Dispositivos más complejos como las fotografías hemisféricas, densiómetros, equipos de medición electrónica y sensores remotos se utilizan principalmente para fines de investigación o de manera piloto, pero su uso demanda capacidades que requieren un proceso de formación y transferencia tecnológica para la toma y procesamiento de datos, que no es accesible para la mayoría de titulares y trabajadores forestales e inclusive para los especialistas de organizaciones de apoyo y centros de investigación, quienes hacen énfasis en este factor. El acceso a capacitación es más difícil aun para personas en zonas rurales. Por ejemplo, en Surinam, especialistas forestales del país señalan que la actualización de la currícula de educación formal forestal y el acceso inequitativo a la información y a los procesos de fortalecimiento de capacidades, por factores como bajo poder adquisitivo, género, localización o analfabetismo, persiste en el medio rural, al igual que en el resto de LAC. En el marco de procesos de transferencias tecnológicas, es preciso que se aborden estas brechas entre los distintos actores de la cadena forestal, a fin de evitar que se acentúen.

Es de conocimiento generalizado que tecnologías de difusión reciente tales como fotografías aéreas tomadas desde drones e imágenes satelitales de alta resolución, se han ensayado en países como Guatemala, Belice, Panamá, Costa Rica y Perú para el control y vigilancia de zonas de conservación y producción forestal y para los inventarios nacionales y regionales, con lo que se han generado experiencias cuya difusión es motivadora para la comunidad de actores forestales, pero no se tiene claro aún si pueden ser usados para fines de silvicultura o monitoreo de biodiversidad. Por otro lado, existen experiencias de uso de instrumentos electrónicos para la medición y registro de datos de campo, tales como los hipsómetros digitales (ver sección 1.3.1) y el sistema de posicionamiento global de última generación, que responden principalmente a acuerdos internacionales firmados por los países para el inventario de reservas de carbono en bosques.

1.3. Tecnologías para el monitoreo de impactos del manejo forestal

1.3.1. Tecnologías para monitorear cambios en biomasa y daños en árboles remanentes

Las tecnologías más comúnmente utilizadas en la actualidad para medir y dar seguimiento a cambios en biomasa y daños en árboles, son las mismas que se han empleado en inventarios forestales por décadas en países en LAC, en las que se destaca i) la medición de variables dasométricas necesarias para el cálculo de biomasa que será extraída durante el aprovechamiento, ii) el monitoreo de degradación causada por impactos en troncos y ramas y iii) el cálculo de reservas de carbono en bosques (altos niveles de precisión, abordado en el capítulo 2 del presente documento). Para estas mediciones, los instrumentos manuales como cintas diamétricas, cintas métricas y clinómetros son los de uso más

⁶ Para efectos del presente documento, se considera la definición del IPCC (2001) de tecnología, como “una pieza de equipo, una técnica para la realización de una actividad en concreto”. Como innovación tecnológica se entenderá a la introducción de cambios tecnológicos recientes, creados para mejorar o hacer más eficiente una función, en contraposición con las tecnologías tradicionales, que se entenderán como aquellas que se han empleado regularmente a lo largo del tiempo.

generalizado, pues su costo es bajo, son fáciles de utilizar por técnicos de campo y son más duraderos que los instrumentos de medición electrónicos. Entre estas últimas innovaciones tecnológicas, las más utilizadas son las forcípulas e hipsómetros electrónicos, los sensores láser y los registros electrónicos de datos de inventario mediante el uso de teléfonos móviles y tabletas.

Los instrumentos electrónicos presentan varias ventajas, tales como la integración de distintas funciones en un mismo equipo (p.e. los hipsómetros multifunción que integran GPS), la reducción del tiempo de medición (menos costo de mano de obra) y, sobre todo, un menor nivel de incertidumbre en la toma de datos. Estas tecnologías se presentan en el Cuadro 5, seguidas de una breve descripción respecto a su funcionamiento.

Cuadro 5. Tecnologías actuales y potenciales para monitorear cambios en las reservas de biomasa y daños en árboles remanentes

Impacto en el bosque	Equipos y herramientas comúnmente utilizados	Innovaciones Tecnológicas		
		Tecnología	Ventajas	Desventajas
Alteración en la biomasa forestal	Cintas métricas Cintas diamétricas Forcípula Clinómetro Hipsómetro Libretas de campo	Forcípulas electrónicas	<ul style="list-style-type: none"> - Memoria para el almacenamiento de datos - Compatible para la transmisión de datos por bluetooth a PC o teléfonos celulares 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de adquisición
		Hipsómetros electrónicos	<ul style="list-style-type: none"> - Integran funciones: medición de alturas, distancias, inclinación - Memoria para el almacenamiento de datos - No requiere que la medición sea realizada desde una distancia fija - Permite medir alturas con precisión - En función ultrasonido permite mediciones a través de follaje 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de adquisición de los equipos - No elimina el error de visualización de los ápices de árboles - En función láser, no permite mediciones a través de follaje - En función ultrasonido, no permite mediciones en lugares con interferencias sonoras
		Sensores láser para el cálculo de biomasa	<ul style="list-style-type: none"> - Método no destructivo - Su uso representa menores riesgos para el personal 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de adquisición de los equipos - Requiere personal calificado para su operación
		Registros electrónicos de información de inventario	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce errores en el registro de datos por anotación o transcripción - Reduce tiempo de registro de datos en medios electrónicos - Memoria para el almacenamiento de datos - Flexibilidad y compatibilidad con varias funciones, que permiten su uso para objetivos múltiples 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de adquisición de los equipos - Fragilidad de los equipos
Daños en árboles remanentes	Libretas de campo			

Forcípulas electrónicas

Las forcípulas son instrumentos que consisten de una vara graduada, con un brazo fijo y un brazo móvil, para la medición del diámetro, que puede ser empleada tanto para árboles en pie como para árboles tumbados (Figura 1). El diámetro del fuste es una de las principales variables dasométricas consideradas en inventarios forestales pues, con base en esta medida, es posible calcular el área basal, el volumen del tronco y, a través de fórmulas alométricas, la biomasa y carbono.

Actualmente existen versiones electrónicas de estos instrumentos que, dependiendo de la marca y modelo, vienen equipados con una memoria interna para el almacenamiento de datos (medición de diámetro, especie, altura, calidad de fuste), sistemas de transmisión de datos por *bluetooth* compatibles con sistemas Android para teléfonos móviles y con computadoras (GIS Iberica 2019) y sensores infrarrojos para conectar el instrumento con otros tales como los hipsómetros, a fin de almacenar también datos como la altura (Agroterra 2019). Dependiendo de la marca y modelo, el costo de estos equipos puede oscilar entre USD1400,00 a USD2400,00.

Hipsómetros electrónicos

Los hipsómetros forestales son instrumentos que permiten medir la altura de un árbol a partir de un punto de referencia (por lo general, la base del árbol), basándose en métodos de medición directa por principios trigonométricos. Esta medición requiere de un especial cuidado para evitar errores de medición por el inadecuado cálculo de la distancia de la base del árbol al punto desde donde se realiza la medición y la percepción visual del evaluador del ápice del árbol. La altura del árbol es la variable dasométrica que tiene mayor nivel de incertidumbre con el uso de metodologías tradicionales de medición en inventarios forestales (Chave *et al.* 2005).

Los modelos recientes de equipos electrónicos para la medición forestal integran las funciones de equipos convencionales y permiten medir alturas (hipsómetros), distancias (telémetros) e inclinación (clinómetros) con un menor nivel de incertidumbre, dependiendo del modelo y funciones para los que han sido diseñados, así como de las condiciones del entorno al momento del uso.

Por ejemplo, el equipo Vertex Laser Geo (hipsómetro de la marca sueca Haglöf, Figura 2), cuenta con un sensor de láser, sensor de ultrasonido y un sensor de brújula, lo que le permite realizar mediciones de distancia, altura y ángulo con un mayor nivel de precisión que los instrumentos convencionales. De acuerdo con el fabricante (Haglof 2019), el uso de la función láser (sin ultrasonido o *transponder*) de este equipo, facilita la medición de distancias y de alturas a distancias largas, mientras que el uso de ultrasonido es empleado para medir la



■ **Figura 1.** Uso de forcípula electrónica compatible con sistema Android para teléfonos móviles

Fuente: Gis Ibérica (2019)



■ **Figura 2.** Hipsómetro Vertex Laser Geo

Fuente: Haglof (2019)

altura de árboles cuando la medición se realiza desde distancias cortas o a través de una vegetación espesa y no hay disponible una línea de visión clara hacia el objetivo. Además, este equipo tiene incorporado un receptor GPS para la toma de coordenadas en los puntos de medición, un sensor de brújula, memoria de datos interna y SD, *bluetooth*, entre otros. Todas estas características hacen que este equipo sea ideal para la medición de árboles en parcelas circulares, pues permite determinar rápidamente la distancia del árbol a los límites de la parcela y además facilita su ubicación con respecto a claros de bosque, riachuelos, carreteras o algún otro punto de referencia que pueda ser relevante (Haglof 2019). Otra de sus ventajas, de acuerdo a expertos en inventarios forestales, es que las facilidades para el almacenamiento automático de datos para su posterior transferencia y procesamiento en computadora reducen la posibilidad de errores por anotación o transcripción de datos. El precio de este equipo es alrededor de USD2500, que es considerado alto, lo que limita la masificación de su uso, pese a las ventajas de precisión.

Otro modelo de hipsómetros con ultrasonido incorporado para la medición de altura a distancias cortas es el Vertex IV, que está disponible a un menor precio (unos USD1600), pero no cuenta con el almacenamiento de datos y la función de GPS. Equipos con medición láser de marcas comerciales como Nikon y Laser Technology, están disponibles a menor precio (entre USD400 y USD1400). Dependiendo del modelo, ofrecen distintas ventajas o limitaciones. El láser, por ejemplo, no permite la medición a través de follaje, aunque sí ofrece la posibilidad de medir desde distintas ubicaciones con respecto a los árboles (incorporación de sensor tipo brújula). Aunque el *transponder* (elemento principal de sistemas de identificación por radiofrecuencia unidos o incrustados en un objeto a rastrear) supere esta limitación al funcionar con ultrasonidos, especialistas que han ensayado estos equipos en bosques tropicales señalan que su uso también muestra limitaciones cuando se realizan mediciones cerca de elementos que causen perturbaciones sonoras como ríos, equipos motorizados (motosierras, generadores eléctricos, vehículos), sitios de fauna u otros. Aunque estos equipos reducen el error en el cálculo de distancias entre árboles y los puntos de medición, usuarios de estos equipos señalan que, por las características ya explicadas, requieren de una adecuada visibilidad del ápice para mediciones altamente precisas.

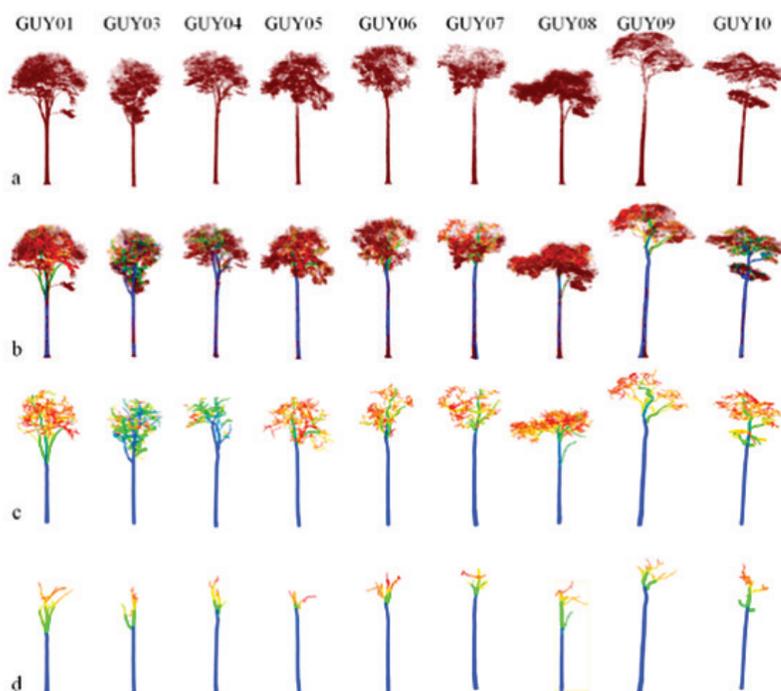
Sensores remotos para el cálculo de biomasa

Los sensores remotos de resolución espacial media (satélites Landsat, Sentinel) y alta (satélites Ikonos, constelación DigitalGlobe, fotografías aéreas, imágenes LiDAR), permiten la cuantificación de biomasa en la medida en la que el área de bosque impactada tenga dimensiones suficientes para ser detectada y medida con estas tecnologías. Para que esto se logre, se requiere información adicional de campo que permita, por ejemplo, el uso de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa extraída o afectada en las áreas de bosque.

De estos sensores remotos, algunos podrían apoyar en la estimación de biomasa con mayor precisión. Achard *et al.* (2014) señalan la posibilidad de emplear sensores LiDAR terrestres (acoplados a trípodes para su anclaje en tierra y posterior cambio de ubicación), para capturar perfiles verticales de vegetación que permitan estimar la biomasa en función de la altura del dosel o densidad de copas. Esto a su vez permitiría facilitar el monitoreo de la estructura del bosque en el tiempo para, de este modo, caracterizar la perturbación, la recuperación y los cambios naturales de sucesión. Así, estos perfiles verticales de vegetación podrían usarse también para generar ecuaciones alométricas y derivar el volumen de madera y la biomasa sobre el suelo.

Pese al costo que representa la implementación de sensores LiDAR terrestres, muestran ciertas ventajas con respecto a la toma tradicional de datos en campo, como la precisión para el cálculo de alturas. Aunque el uso actual de esta tecnología ha demostrado precisión para el modelado geométrico de la biomasa (GOFC-GOLD 2015), la implementación de un sistema de monitoreo requiere más desarrollo de investigación para automatizar algoritmos con base en datos de parcelas experimentales, que permitan la extrapolación confiable en distintas áreas de aprovechamiento forestal. Un estudio pionero en este sentido, es el de Lau *et al.* (2019), quienes ensayaron el uso de LiDAR terrestre para la medición de la longitud, el diámetro y la tasa metabólica de una muestra de árboles en un bosque tropical en Guyana comparando con mediciones directas en campo (Figura 3). Aunque se encontraron sesgos debidos al procesamiento de los datos, los autores consideran que la tecnología es prometedora, por ser un método no destructivo y de bajo requerimiento de mano de obra y recomiendan replicar los ensayos a fin de comprender en su totalidad el potencial de esta tecnología para estudios forestales volumétricos y fisiológicos.

Especialistas señalan que el uso de sensores LiDAR puede ser muy útil en bosques de coníferas, pero no en bosques húmedos tropicales, dado que la densidad de vegetación, diversidad de especies y diferentes formas de los árboles puede inducir a errores importantes de estimación de biomasa. Por otro lado, la masificación de esta tecnología para grandes extensiones de territorios sería sumamente complicada puesto que, sin bien es cierto son equipos portátiles, se requeriría de la instalación de una gran cantidad de sensores al mismo tiempo en las diferentes PPM y del despliegue de personal capacitado en el uso del sensor para la calibración de campo.



■ **Figura 3.** Reconstrucción de la estructura vertical de árboles con base en mediciones de LiDAR terrestre

Fuente: Lau *et al.* (2019)

Registros electrónicos de información de inventario mediante dispositivos móviles

Pratihast *et al.* (2012) hacen referencia al potencial que tienen las aplicaciones móviles o *softwares* y el uso de dispositivos como *smarthphones* y tabletas en el registro de datos para el monitoreo forestal como alternativas eficientes y de bajo costo. Hewson *et al.* (2014), señalan varias ventajas en el uso de formularios electrónicos para el registro de información en inventarios; aducen que el empleo de opciones predeterminadas de menú de la interfase de estos aplicativos móviles permite a los usuarios reducir errores al llenar valores ausentes y cuestionar o rechazar valores inverosímiles. Además, la identificación de especies de árboles se puede facilitar también mediante estas aplicaciones, lo que reduce el tiempo y errores de escritura

La mayoría de las aplicaciones actuales han sido diseñadas para ecosistemas templados o plantaciones forestales y están orientadas al procesamiento *in situ* de datos de inventario con fines comerciales y no tanto para la estimación de parámetros de monitoreo forestal, como el caso de la cuantificación de las reservas de carbono y la evaluación de la regeneración natural, entre otros. Estas tecnologías permiten tomar decisiones tales como la marcación de árboles aprovechables, la intensidad de corta y los volúmenes de productos transformados a generarse, entre otros.

Un ejemplo de este tipo de aplicaciones es Silvo Inta, desarrollada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina⁷, que es de disponibilidad gratuita y permite a los usuarios decidir los árboles aptos para cosecha, sin necesidad de conectarse a un servidor de internet (Navall *et al.* 2013). Otro ejemplo, ha sido desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América, que consta de un conjunto de herramientas informáticas llamado “National Cruise System”⁸, que incluye programas que facilitan funciones tales como la planificación de inventarios, toma de datos en campo, procesamiento de la información (volumen, biomasa), análisis estadístico, generación de mapas y modelos 3D. Las herramientas están disponibles en versiones para computadora y para teléfonos móviles de manera gratuita (USDA 2019). Otra aplicación, pero de uso empresarial no gratuito es ForestMetrix que permite hacer cálculos *in situ* sobre producción y ganancias, con base en los datos de inventario⁹. Su costo de licencia está entre USD800 a USD1200 por año.

El costo de los equipos puede constituir una limitante para su uso, dependiendo de los modelos de *smartphone* y tabletas que se escojan y del poder adquisitivo de los usuarios. Además, de acuerdo a testimonios de especialistas, es necesario que el personal este advertido de los cuidados que se deben tener para evitar su deterioro por humedad o golpes, como el uso de protectores de goma y plástico. Una alternativa de bajo costo son los equipos PDA (Asistente Digital Personal) (alrededor de USD100) que funcionan como computadora de bolsillo y son configurados con programas informáticos para la colección de datos de inventario en campo, compatibles con el uso de computadoras para la transferencia de datos.

Aunque el uso de tabletas con aplicaciones y formularios electrónicos para el registro de datos de inventarios forestales se está ensayando en diferentes países tropicales de Latinoamérica y el Caribe (por ejemplo, Surinam), no son de uso extendido, pues aún se encuentran en implementaciones piloto. En República Dominicana, por ejemplo, se prevé el uso de tabletas para la colecta de información de campo de manera electrónica, en el marco de la preparación de la estrategia REDD+ de este país.

⁷ Disponible para su descarga en el enlace: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.devsar.intabosques>

⁸ Disponibles en el enlace <https://www.fs.fed.us/forestmanagement/products/measurement/cruising/index.shtml>

⁹ Disponible en el enlace <https://forestmetrix.com/>

Además del uso en registro de datos, se están generando *softwares* para facilitar la identificación de especies, lo que constituye un reto en ecosistemas tropicales diversos. En Costa Rica, investigadores del Instituto Tecnológico de Costa Rica desarrollaron la aplicación e-Flora, para identificar especies mediante teléfonos móviles, que está basada en un repositorio fotográfico de 300 especies arbóreas e información morfológica de 800 especies (Montoya *et al.* 2016). Con base en algoritmos, esta aplicación busca facilitar la identificación de especies y constituye una experiencia pionera en el desarrollo de aplicaciones móviles adaptadas a las características de los bosques tropicales. La aplicación no se encuentra disponible para su descarga libre.

Las aplicaciones comerciales para la comunicación por vía internet también tienen potencial de ser un soporte para la gestión forestal, como es el caso de los grupos de regentes de las concesiones forestales de la Reserva de Biósfera Maya en Petén. Especialistas con experiencia en la región señalan que los regentes hacen uso de la aplicación *Whatsapp*¹⁰ para comunicar en tiempo real alertas tempranas de incendios y otras amenazas.

1.3.2. Tecnologías para monitorear áreas perturbadas y su ambiente lumínico

Las tecnologías más empleadas para monitorear áreas perturbadas y su ambiente lumínico son un conjunto de equipos tradicionales como cintas métricas y GPS, empleados para determinar el tamaño de estas áreas. Recientemente se ha empezado a explorar algunas innovaciones como el uso de sensores remotos de mediana a alta resolución, drones acoplados a cámaras fotográficas y sensores LiDAR. La intensidad de la entrada de luz en áreas bajo monitoreo puede ser medida mediante instrumentos de distinta complejidad como densiómetros, cámaras de fotografías hemisféricas, cepatómetros y radiómetros.

La alteración de la cobertura boscosa por la corta y tumba de árboles, la construcción de infraestructura como caminos, campamentos y patios de acopio y el arrastre y transporte de trozas genera impactos sobre la vegetación, el suelo y agua. Además, el cambio en el microclima y la mayor entrada de luz al bosque influye en la dinámica del bosque en las tasas de recuperación forestal (Cuadro 3). Por tanto, la medición de las áreas de perturbación y sus cambios constituyen uno de los principales factores a considerar en el monitoreo del manejo forestal.

Estas mediciones siguen procedimientos tales como el proporcionado por la Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT) para estimar el área de claros producto de la tumba de árboles, que recomienda medir la longitud total del árbol caído, incluyendo el fuste y la copa, y secciones perpendiculares al eje del árbol (por ejemplo, cada dos metros a partir de la base del fuste hasta el final de la copa) (Contreras *et al.* 2001). Las secciones perpendiculares deben comprender el área afectada a ambos lados del árbol caído, para luego calcular el área total por principios geométricos. Para claros de formas irregulares (como las áreas de afectación de las operaciones de aserrío en campo, la construcción de campamentos, patios de acopio, etc.), OIMT recomienda medir las distancias desde el centro del claro hacia los lados, para luego estimar el área simulando su división en triángulos. El largo de caminos y senderos de arrastre suele ser estimado utilizando mapas de referencia construidos durante la

¹⁰ Software para teléfonos móviles para mensajería instantánea, desarrollada por la empresa WhatsApp Inc.

planificación del aprovechamiento, o el uso de GPS¹¹, mediante el marcaje de puntos de referencia o el empleo de la función “track”. Estos métodos tienen la ventaja de ser muy precisos, además de permitir de manera simultánea evaluar visualmente otros factores que son importantes para la toma de decisiones silviculturales, tales como el estado físico de la vegetación afectada, de la regeneración natural, el estado del suelo, y la magnitud o tipo de afectación en el área de los bordes, que no son posible de realizar de alguna otra manera que no sea la evaluación directa en campo. Su principal desventaja es el costo de mano de obra asociado, sobre todo en áreas de manejo extensas.

Tecnologías de sensores remotos pueden ayudar a estimar el área de perturbación a un menor costo y esfuerzo, dependiendo de la resolución y disponibilidad de las imágenes, así como de las herramientas informáticas para su procesamiento y análisis. Por otro lado, el ingreso de luz en el bosque puede ser evaluado visualmente, por ejemplo, utilizando una escala de alto, medio o bajo, pero el error de estimación de las personas evaluadoras puede ser alto con este método. Equipos tales como densiómetros forestales, radiómetros y fotografías hemisféricas pueden ser empleados para disminuir esta incertidumbre. En el Cuadro 6 se presentan estas tecnologías seguidas de una descripción de cada una de ellas. Asimismo, al final de este capítulo, se describen algunas plataformas informáticas que constituyen herramientas de visualización de perturbaciones en la cobertura boscosa a escala de paisaje.

1.3.2.1. Sensores remotos para la medición de áreas perturbadas: escala de unidad de manejo y de paisaje

Los sensores remotos son instrumentos diseñados para el registro a larga distancia de la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie terrestre, que permiten la colección de información cualitativa y cuantitativa de ella (Vergés y Bocco 2003). Dos de sus atributos más importantes son la resolución espacial (tamaño más pequeño de objeto que puede percibirse de manera independiente, expresado como tamaño de pixel) y la resolución temporal (periodo o lapso de tiempo comprendido entre la toma de dos imágenes en la misma zona). El uso de sensores remotos como apoyo para la planificación de inventarios, el ordenamiento forestal, el monitoreo y la vigilancia es extendido, sobre todo a escala de paisaje y para grandes extensiones (Hewson *et al.* 2014), pero su uso para la evaluación de impactos del aprovechamiento a escala de unidad de manejo es limitado (GOFC-GOLD 2015).

Para este último fin, el empleo de este tipo de tecnología no es generalizado. Especialistas señalan que esto se debe a factores diversos tales como altos costos de las imágenes de alta resolución, las preferencias de los usuarios (resistencia al cambio, patrones culturales), o por inexistencia de protocolos y normativas que orienten el uso o difundan su potencial. Se considera que el monitoreo de degradación de bosques por distintas causas, mediante sensores remotos como única fuente de información, es aún un desafío y, para aprovechar sus ventajas, se recomienda usarlos en conjunto con otro tipo de métodos para la colecta de información en el área de interés. Alteraciones como la afectación a la biodiversidad, reservas de carbono y alteración de servicios ecosistémicos, no pueden ser detectados únicamente por estos métodos. Delgado–Aguilar *et al.* (2019) señalan que los cambios en la cobertura forestal son de tan pequeña escala que son difíciles de detectar, sobre todo cuando la frecuencia de las imágenes es menor al tiempo en el que la cobertura vuelve a cerrarse. En este estudio, por ejemplo, se emplearon métodos participativos de manera complementaria al uso de sensores remotos de alta resolución (SPOT), para identificar zonas prioritarias de provisión de servicios ecosistémicos (plantas y frutas, caza, agua, madera y turismo) y correlacionar su nivel de integridad (en términos de cobertura) con la demanda comunitaria de estos servicios, en la Amazonía ecuatoriana.

¹¹ Existen diversas marcas de equipos GPS disponibles en el mercado y son de fácil compra en casas comerciales o para adquisición en línea (p.e. Garmin, Mio, Nextar, Tomtom, Swiss Gadget)

Cuadro 6. Actuales y potenciales tecnologías para monitorear cambios en las reservas de biomasa y daños en árboles remanentes

Impacto en el bosque	Equipos y herramientas comúnmente utilizados	Innovaciones tecnológicas		
		Tecnología	Ventajas	Desventajas
Perturbación de la cobertura boscosa	Cintas métricas, GPS	Imágenes satelitales de resolución media	<ul style="list-style-type: none"> - Gratuitas - Existe software de procesamiento digital que es de uso libre 	<ul style="list-style-type: none"> - La resolución espacial no permite distinguir perturbaciones como claros de bosque producto de la corta y tumba de árboles - No permite distinguir caminos, áreas como patios de acopio y áreas de cambio de uso con nitidez
		Imágenes satelitales de resolución alta	<ul style="list-style-type: none"> - Permite detectar cambios finos como senderos de arrastre, claros de bosque por tumba de árboles, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de adquisición de las imágenes - Restricciones legales para su uso - No permite medir estructura vertical del bosque
		Imágenes LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> - Permite cuantificar biomasa - No le afecta la nubosidad (vuelos bajo nubes) - Permite medir la estructura vertical del bosque 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de adquisición y operación de los equipos
		Fotografías aéreas tomadas desde drones	<ul style="list-style-type: none"> - Captura imágenes con alto nivel de detalle - Permite monitoreos frecuentes 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja capacidad de desplazamiento - Restricciones legales de uso
Alteración de la entrada de luz al bosque	Evaluaciones visuales	Densiómetro forestal	<ul style="list-style-type: none"> - Medición rápida 	<ul style="list-style-type: none"> - Errores de medición por la visión del evaluador
		Fotografías hemisféricas	<ul style="list-style-type: none"> - Permite analizar al mismo tiempo la estructura vertical del bosque 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de adquisición - Requiere de personal capacitado para la operación
		Radiómetros y ceptómetro	<ul style="list-style-type: none"> - Permite medir con precisión el ingreso de luz y relacionarlo con la capacidad de fotosíntesis de la vegetación 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de adquisición

Ya sea como complemento o reemplazo de las mediciones directas, o como alternativa para la vigilancia de áreas inaccesibles, existen en la actualidad diferentes tipos de imágenes provenientes de sensores remotos con potencial para el uso forestal, tales como imágenes satelitales, imágenes de sensores activos láser (LiDAR) y fotografías aéreas tomadas desde drones. Su utilidad depende de la escala a trabajar, los objetivos de la evaluación, la disponibilidad de estos recursos y el costo, entre otros. En términos generales, Hewson *et al.* (2014), recomiendan escoger aquellas imágenes que tengan una resolución espacial lo suficientemente fina como para captar los cambios que se requieren medir o monitorear (por ejemplo, que el tamaño de pixel de las imágenes sea como mínimo la mitad del tamaño promedio de claros o del ancho de senderos y caminos). Es importante entonces conocer las especificaciones técnicas de cada sensor disponible.

El uso de imágenes de sensores remotos provenientes de imágenes satelitales, por lo general, requiere de programas informáticos para su interpretación y análisis. En LAC los más comúnmente usados han sido ARGIS, ERDAS y ENVI (Argotty *et al.* 2019). El uso de estos *softwares* requiere de capacitación especializada, que puede restringir su uso para una importante cantidad de actores clave. Sin embargo, especialistas de instituciones forestales señalan que, en los últimos años, la disponibilidad de *softwares* libres para sistemas de información geográfica y la existencia de plataformas tecnológicas globales como Google Earth Engine y Global Forest Watch, han facilitado el uso de estas imágenes para la toma de decisiones, ya que presentan alternativas accesibles para la interpretación de imágenes satelitales. En el Anexo 4 se muestran ejemplos de uso de sensores en estudios en LAC.

Imágenes satelitales de sensores de resolución media

Las imágenes de los satélites Landsat, han sido la fuente de imágenes más empleada para monitorear usos de la tierra en la región de LAC (Argotty *et al.* 2019). Las imágenes Landsat, de disponibilidad gratuita¹², son empleadas sobre todo si es necesario un análisis histórico, puesto que estos satélites han estado en órbita desde 1972, lo cual representa una gran ventaja para el uso por parte de instituciones públicas y de la sociedad civil (Hewson *et al.* 2014).

Existen siete series de sensores Landsat actualmente en funcionamiento¹³. Las imágenes de los sensores Landsat 7 y 8 poseen resoluciones espaciales entre 15 a 30 metros por pixel, con una resolución temporal de 16 días y un ancho de franja de entre 165 a 185 km. Estas características son útiles para el monitoreo forestal en unidades medianas a grandes de manejo forestal, para fines de inventario forestal a escala de paisaje, detectar grandes aperturas de dosel producto de la deforestación, invasiones con cambio de uso de la tierra, aperturas de carretera, patios de acopio, entre otros. El Centro de Monitoreo y Evaluación de CONAP, por ejemplo, emplea imágenes de estos sensores para el monitoreo de la Reserva de Biósfera Maya y pone a disposición cartografía para los usuarios de esta localidad.

Uno de los problemas en el uso de los sensores Landsat es el exceso de nubosidad (factor frecuente en zonas tropicales), ya que reducen las oportunidades de tener imágenes útiles, aunque actualmente existen *softwares* de corrección. Las imágenes Landsat no son muy recomendables para mapas detallados a nivel de unidad de aprovechamiento.

¹² Disponibles en el enlace <https://landsat.usgs.gov/landsat-8>

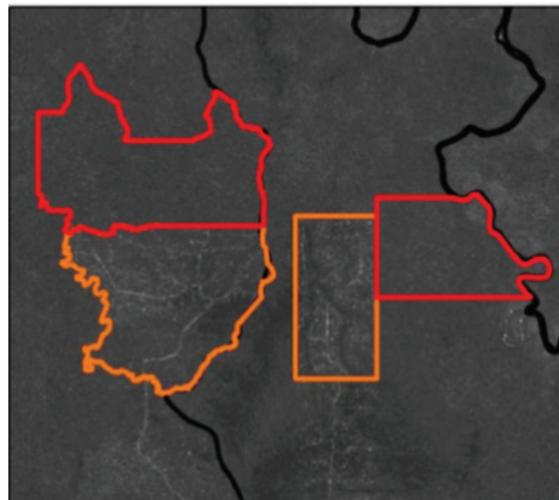
¹³ Cada número de serie de LANDSAT (actualmente del 1 al 8), corresponde a las diferentes misiones que se han lanzado a órbita, la primera en 1972 y la última en 2013.

Los satélites Sentinel fueron lanzados al espacio a partir del año 2015. Las imágenes de los satélites Sentinel 2 y 3, puestos en órbita en el año 2017, son también de uso gratuito¹⁴. De acuerdo con Mas *et al.* (2016), las imágenes de estos satélites constituyen una alternativa al uso de Landsat, ya que poseen resoluciones espaciales más finas (de 10, 20 y 60 m) y resoluciones temporales más frecuentes (de cinco días). Ofrecen información útil para determinar cambios de uso de tierra a partir de la escala mediana, siendo posible su uso para diferentes tipos de estudios como estimaciones de biomasa, degradación forestal, desastres naturales, plagas, valoración de daños post-incendio y para la gestión forestal a nivel de territorio o paisaje con un mayor nivel de precisión, que no es posible con la resolución espacial de Landsat. Especialistas del Stichting voor Bosbeheer en Bostoezicht (SBB) de Surinam, por ejemplo, manifiestan que esta institución opera un sistema de detección temprana de extracción maderera no autorizada, con base en actualizaciones diarias de imágenes Sentinel.

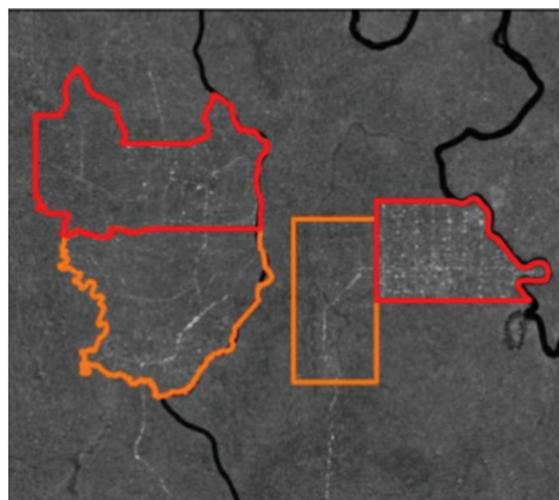
En términos generales, se considera que las imágenes de los satélites Landsat y Sentinel no permiten identificar con precisión cambios pequeños en las superficies boscosas, tales como claros producto del aprovechamiento, caminos de ancho inferior a 30 metros o áreas de aserraderos portátiles. (Hewson *et al.* 2014). Putz y Ruslandi (2015), señalan que el uso de estas imágenes genera errores considerables para la construcción de mapas de elevación necesarios para planificar adecuadamente el aprovechamiento y manejo forestal.

Un caso destacado y pionero en LAC, es el uso que se da a las imágenes Landsat y Sentinel en el marco del sistema de cadena de custodia (sistema DETEX¹⁵), gestionado por el Servicio Forestal Brasileño. Para este fin, los especialistas de esta institución señalan que han desarrollado algoritmos con el uso de la plataforma Google Earth Engine, para su procesamiento digital, lo que permite la detección de explotación selectiva maderable en concesiones forestales de la Amazonía de este país (Figura 4). Para fines de control (se evalúa si el área autorizada está bajo aprovechamiento o no) y para fines de evaluación de la recuperación, la herramienta desarrollada es útil. Si bien el uso de estas imágenes no permite mediciones de escala muy fina, identificando por ejemplo cada claro de bosque, sí permite estimaciones consistentes respecto a la perturbación por aprovechamiento maderero y recuperación de la cobertura a escala de unidad de manejo o paisaje.

Noviembre, 2015



Agosto, 2016



■ **Figura 4.** Imágenes para la identificación y monitoreo de extracción selectiva de madera en concesiones forestales de Brasil mediante el sistema DETEX

Fuente: Chaves (2018).

¹⁴ Disponibles en los sitios web <https://scihub.copernicus.eu/> y <http://earthexplorer.usgs.gov/>

¹⁵ Sistema de detección temprana de deforestación, con base en imágenes satelitales

Imágenes satelitales de alta resolución

Entre las imágenes satelitales de alta resolución con usos forestales y que, según lo encontrado en este estudio, tienen potencial para el monitoreo de áreas bajo manejo forestal están aquellas obtenidas mediante los satélites de la constelación DigitalGlobe de la compañía Maxar, y de la división de Geointeligencia de Airbus Defense and Space, como Pleiades y SPOT.

Las imágenes satelitales de alta resolución (píxeles menores a 10 m), empezaron a circular comercialmente alrededor del año 2000. La principal limitante para el uso generalizado de estas imágenes es que no son gratuitas; pero, dependiendo de la escala de trabajo, del tamaño de las perturbaciones a evaluar, el tipo de cobertura y la frecuencia del monitoreo, ofrecen resoluciones espaciales y temporales lo suficientemente finas como para permitir el monitoreo de claros producto del aprovechamiento forestal, cambios fenológicos de especies arbóreas y la detección de operaciones de tala ilegal en bosques mediante la identificación de vehículos de extracción de trozas. Estas imágenes no permiten estimar cambios en la estructura vertical del bosque (Hewson *et al.* 2014), como sí lo hacen las imágenes tomadas desde sensores LiDAR.

Las imágenes de los satélites RapidEye¹⁶ son la segunda fuente más utilizada actualmente para el monitoreo de áreas forestales en LAC, después de las imágenes Landsat (Argotty *et al.* 2019). Las imágenes RapidEye tienen una resolución espacial de 5 m, una cobertura de 25 km por imagen y una resolución temporal de hasta un día (Duarte *et al.* 2017b). Sus características espectrales permiten medir las variaciones en la vegetación, diferenciar especies en algunos casos o evaluar factores como la salud de la vegetación en bosques templados (Inegi 2018). Según la compañía proveedora (RapidEye & Geosystems s.f.), la información provista por estos satélites puede utilizarse para cartografía rápida y evaluación de daños a pequeña escala, análisis de cubierta forestal e inventarios forestales, así como para el monitoreo periódico y servicios de alerta. De acuerdo con la compañía, las características de imágenes RapidEye permiten identificar claros pequeños provocados por el derribo de árboles individuales, así como la apertura de caminos y áreas de campamentos. Incluso, ofrecen la posibilidad de diferenciar árboles de coníferas y de especies latifoliadas en bosques mixtos, así como detectar cambios fenológicos en árboles, como el surgimiento de brotes vegetativos en especies.

Con imágenes RapidEye, la Cooperación Técnica Alemana construyó mapas de cobertura forestal y uso de la tierra de alto nivel de detalle en Puriscal, Costa Rica (Duarte *et al.* 2017b) y en el área de conservación Imposible, Barra de Santiago, El Salvador (Duarte *et al.* 2017a). En Guyana, entre los años 2011 y 2013, se usaron imágenes de este satélite para la actualización del inventario forestal, lo que permitió afinar la delimitación de tipos de bosque con respecto a los mapas anteriores, que habían sido elaborados con imágenes Landsat (Bholanath *et al.* 2013). De acuerdo a especialistas entrevistados de República Dominicana, se emplearon imágenes de este satélite también para el inventario forestal nacional de este país entre los años 2014 y 2015.

Respecto de la disponibilidad y facilidad de acceso, de acuerdo con el portal Geosoluciones¹⁷, estas imágenes están disponibles en varios países, con un tiempo de obtención corto, para diferentes tamaños de área. Son altamente rentables pues, pese a que no son gratuitas, el precio es relativamente menor comparado con otras imágenes de alta resolución como las de satélites QuickBird, Geo-Eye y World-View. De acuerdo con el portal en línea Landinfo¹⁸, el precio actual de imágenes RapidEye oscila entre USD1,28 y USD1,90 por kilómetro cuadrado.

¹⁶ La compañía alemana RapidEye AG es la propietaria de la flota de estos satélites. Información disponible en el enlace <https://www.gim-international.com/content/company/rapideye-ag>

¹⁷ Disponible en el enlace <http://www.geosoluciones.cl/rapideye/>

¹⁸ Disponible en el enlace <http://www.landinfo.com/espanol/satellite-imagery-pricing.html>

La flota de satélites de Digital Globe¹⁹ (IKONOS, QuickBird, Geo-Eye y World-View 2,3 y 4) brinda imágenes de alta precisión, cuyo uso tiene alto potencial para la evaluación de impactos de aprovechamiento a escala de unidades de manejo. Esta empresa pone a disposición las imágenes a través de una red de compañías revendedoras²⁰ (existen representantes en la mayoría de países), que ofrecen además servicios de corrección, análisis, generación de mapas, etc.

Las imágenes del satélite IKONOS tienen una resolución espacial de 1-4 m (en función al modo espectral) y una resolución espacial de tres días. Son muy útiles para el monitoreo y vigilancia de operaciones de tala ilegal ya que permiten detectar vehículos de explotación forestal como camiones y tractores (Hewson *et al.* 2014). Por tener un ancho de franja de 11,3 km, es necesario el uso de varias imágenes para grandes unidades de aprovechamiento.

Las imágenes de los satélites QuickBird, WorldView y GeoEye permiten distinguir incluso árboles individuales, pequeñas perturbaciones del dosel y logran diferenciar distintos tipos de cobertura en áreas pequeñas (el SBB de Surinam ha empleado, por ejemplo, imágenes de WorldView para análisis a nivel de paisaje). Las imágenes de QuickBird tienen una resolución espacial de entre 0,65 m y 2,62 m, una resolución temporal de 2,5 días y una cobertura de 18 km (DigitalGlobe 2011). Aún más fina es la resolución de los satélites WorldView 2, (ofrecen una resolución espacial de 0,5 m y 1,8 m, con una resolución temporal de 1,1 días y un ancho de franja de 16,4 km) y WorldView 3 (resolución espacial de 0,31 m y 3,7 m, resolución temporal menor a un día y un ancho de franja de 13 km). Finalmente, las imágenes de los satélites GeoEye, ofrecen imágenes con una resolución de entre 0,34 m y 1,65, una cobertura de 15 km y una resolución temporal de 3 días (GeoEye 2012).

Los satélites Pleiades 1a y 1b, desarrollados por el programa franco-italiano ORFEO (Optical & Radar Federated Earth Observation), ofrecen también resoluciones muy finas (0,5 m a 2,0 m de resolución espacial, un día de resolución temporal y 20 km de ancho de franja), lo que hace que estas imágenes sean útiles para detectar cambios pequeños en la cobertura forestal (Hewson *et al.* 2014), como claros de bosque, caminos y senderos. La división de *Geo-inteligencia de Airbus Defence and Space*²¹ es el distribuidor oficial y exclusivo a nivel mundial de los productos y servicios, que pueden ser adquiridos también a través de compañías revendedoras.

Los satélites de la serie SPOT se caracterizan por alcanzar resoluciones espaciales de hasta 1,5 m y temporales de 1 día, con un ancho de franja de 20 km. Son muy empleados para fines civiles, militares y de utilidad también para fines agrícolas y de monitoreo de recursos naturales (Geocento 2019), como es el caso del estudio realizado por Delgado-Aguilar (2019), en el que se llegó a detectar el porcentaje de bosque degradado en la Amazonía Central ecuatoriana, mediante el empleo de algoritmos basados en datos de campo. La división de Geo-inteligencia de Airbus Defense and Space es el distribuidor oficial de estas imágenes, incluyendo las imágenes de los satélites Pleiades.

Además de su potencial para el monitoreo de actividades de aprovechamiento, las imágenes de alta resolución pueden ser empleadas para detectar extracción ilegal de productos forestales. Vila y Finer (2018), por ejemplo, emplearon imágenes GeoEye y WorldView para la detección de operaciones de tala, arrastre y transporte de madera en la Amazonía peruana (Figura 5). Otros posibles usos forestales

¹⁹ Disponible en el enlace <https://www.digitalglobe.com/>. La plataforma de la compañía ofrece información referente a los productos, sus posibilidades de uso, entre otros.

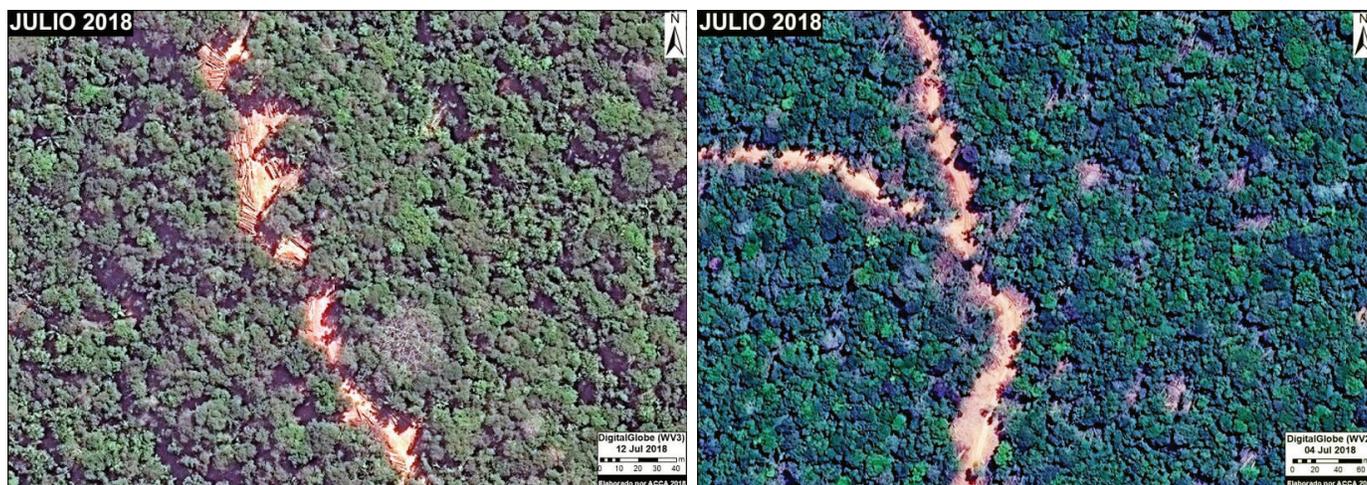
²⁰ Disponible en el enlace <https://www.digitalglobe.com/partners/certified-resellers/>

²¹ Disponible en el enlace <https://www.intelligence-airbusds.com/satellite-data/>

están relacionados a la medición forestal, como es el caso presentado por Ancira-Sánchez y Treviño Garza (2015) en México, en el que concluyen que las imágenes QuickBird tienen ventajas sobre las ortofotos para fines como la delimitación de rodales y la medición de copas de árboles, gracias a su alta resolución.

Pese a la existencia de algunas facilidades para la adquisición y análisis de las imágenes de alta resolución, especialistas señalan que, en muchos centros de monitoreo forestal de la región, aún hay resistencia a la asimilación de cambios de metodologías, protocolos y *softwares* para su procesamiento, debido a falta de motivación del personal encargado. Además, es necesario tener en cuenta ciertas restricciones legales en determinados territorios, por ejemplo, el uso del satélite GeoEye se ve limitado por la prohibición del gobierno estadounidense que no permite la comercialización de imágenes con una resolución menor a 0,50 m/píxel en pancromático y 2 m para multiespectral (Saldaña Díaz 2013).

Los costos de las imágenes satelitales de alta resolución y las condiciones de compra de las mismas dependen del proveedor. De acuerdo con el portal Landinfo²², el precio de estas imágenes varía dependiendo de ciertas características como la ubicación geográfica, la cantidad de bandas requeridas, el tamaño del área de estudio, etc. Los precios pueden oscilar entre USD10 a USD55 por km², aunque usualmente se fija un área mínima de solicitud (alrededor de los 25 km²) o un monto mínimo de compra. Especialistas internacionales recomiendan la compra periódica y conjunta de imágenes entre organizaciones e instituciones que trabajen sobre un mismo territorio, como estrategia ante la falta de presupuesto, para lo cual se requiere de arreglos interinstitucionales en el contexto de una gobernanza forestal.



■ **Figura 5.** Uso de imágenes de alta resolución (Digital Globe) para detectar la extracción ilegal de madera

Fuente: Vila y Finer (2018)

²² Una tabla comparativa de precios está disponible en el enlace <http://www.landinfo.com/espanol/satellite-imagery-pricing.html>

Imágenes LiDAR

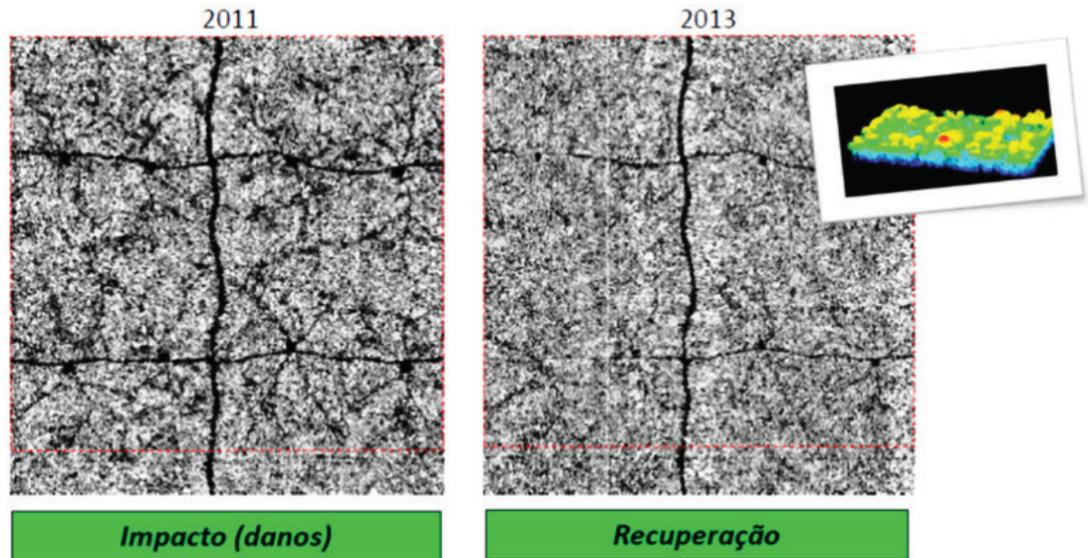
Los sensores de Detección de Luz y Rangos (LiDAR) son sensores de radiación activa que pueden ser portados por aeronaves como drones o helicópteros y cuyo sistema está compuesto de un emisor-receptor láser, un escáner, un GPS, una unidad de medición inercial, un contador de alta precisión y un ordenador (Gonzales Ferreira 2012). En combinación con imágenes aéreas, se puede obtener información relacionada con recursos forestales, al tener bandas multispectrales que añaden información cualitativa.

Este sensor, a diferencia de otros, brinda posibilidades de elaborar modelos digitales de elevación (tridimensionales), de superficie y de dosel de bosque (copas), llegando hasta resoluciones espaciales de entre 0,2 y 2,0 metros (GOFC-GOLD 2015). Los errores de medición en variables como la altura de árbol son relativamente bajos (alrededor de 1 m), por lo que se considera un soporte de alta precisión para inventarios forestales, aunque se requiera siempre del levantamiento de datos de campo estándar para ajustar las estimaciones dasométricas con diferentes fines. Baccini *et al.* (2012), por ejemplo, emplearon información de campo para la estimación de contenidos de carbono en bosques tropicales en Asia, África y América, que fue empleada para calibrar los resultados obtenidos mediante imágenes de sensores LiDAR. Los resultados, a su vez, fueron extrapolados para elaborar mapas de reservas de carbono basados en imágenes MODIS (resolución de 500 m) en bosques tropicales y generar referencias para el cálculo de emisiones por deforestación. Este estudio, a su vez, fue empleado por Jantz *et al.* (2014) para determinar la factibilidad de aprovechar distintos enfoques de mitigación al cambio climático (mercados de carbono, conservación de sumideros de carbono), como alternativa para impulsar la conservación de corredores biológicos en áreas tropicales.

Hewson *et al.* (2014), señalan que los sensores LiDAR son capaces de facilitar la medición de la altura del dosel forestal, la topografía del subdosel y en la distribución horizontal y vertical de la vegetación, con lo cual es posible elaborar modelos de estimación de biomasa arriba del suelo. Por lo tanto, se considera factible su uso para el monitoreo de las perturbaciones causadas por el aprovechamiento en la estructura vertical y horizontal del bosque.

Andersen *et al.* (2014), por ejemplo, ensayaron el uso de este sensor para la medición de cambios en el dosel forestal y áreas de caminos en bosques bajo AIR en la Amazonía occidental de Brasil, llegando a estimar el porcentaje de áreas de dosel retirado y biomasa. En Brasil, esta tecnología se ha integrado al Sistema de Cadena de Custodia a cargo del Servicio Forestal Brasileño para la evaluación de afectación en caminos, patios de acopio y claros por la caída de árboles, así como su recuperación, en complemento con mediciones aleatorias en campo (Figura 6). Pinage y Locks (2014) señalan, como resultado de un estudio experimental en una concesión en el estado de Rondonia que, aunque estos sensores no hayan llegado a distinguir entre los tipos de afectación, si permite hacer estimaciones precisas sobre el porcentaje de área impactada, aunque recomiendan mayor investigación para el desarrollo de una metodología estándar.

Axel *et al.* (2016) señalan, entre las principales ventajas del uso de sensores LiDAR, las siguientes: a) permite el muestreo en zonas inaccesibles a un tiempo y costo bajo y b) genera información fácil de exportar a sistemas de información geográfica. Zamora-Martínez (2017) menciona entre sus desventajas, la dificultad de hacer cartografía en coberturas densas y la imposibilidad de trabajar en zonas con exceso de nubosidad o humedad, puesto que el agua absorbe las longitudes de onda emitidas y no permite el retorno de dichas señales (aunque la interferencia de nubes puede ser evitada con el uso de drones para el sobrevuelo de este sensor). Especialistas indican, entre sus desventajas, el uso limitado de LiDAR para la diferenciación de especies en ecosistemas diversos, siendo más útil en ecosistemas templados que en ecosistemas tropicales, y que en todos los casos la interpretación de las imágenes requiere de personal capacitado, pues la información que el sensor recoge es compleja.



■ **Figura 6.** Evaluación de daño y recuperación por aprovechamiento selectivo en una concesión forestal en Brasil mediante el uso de sensores LiDAR

Fuente: Chaves (2018)

La adquisición de sensores LiDAR puede realizarse en línea, aunque para usos forestales es preferible contactar proveedores especializados en tecnología con representación en los países de América, con los cuales es posible coordinar el acoplamiento a drones, helicópteros o aviones tripulados. El costo del equipo para usos forestales oscila en unos USD9000,00²³, a lo cual debe sumarse el costo de los equipos para el vuelo, combustible y procesamiento de la información. El costo final por km² de la imagen generada depende de muchos factores como la accesibilidad, tamaño del área a monitorear, frecuencia de uso, entre otros.

Zamora-Martínez (2017), señala que existen organizaciones que ponen a libre disposición imágenes LiDAR. Por ejemplo, la Alianza México REDD+ dio a conocer la liberación de datos obtenidos mediante la tecnología LiDAR (2013–2015), que representan un área aproximada de 4000 km² y que proporcionan una muestra representativa de la diversidad de los ecosistemas forestales de los estados de Campeche, Yucatán, Chiapas, Chihuahua, Jalisco y Oaxaca. Es posible también encontrar en línea portales colaborativos con información LiDAR disponible de manera gratuita, con herramientas de búsqueda de acuerdo con la región, tipo de sensor, etc. Entre estos portales se cuenta: Open Topography²⁴, USGS Earth Explorer²⁵, el proyecto LiDAR OnLine²⁶ (actualmente suspendido por actualización), National Ecological Observatory Network – NEON²⁷

²³ Precio de referencia de proveedor Real Group Interactive (Colombia). Información de contacto disponible en <http://www.realgroupinteractive.com/Forestal.html>

²⁴ Disponible en línea en el enlace <https://opentopography.org/>

²⁵ Disponible en línea en el enlace <https://earthexplorer.usgs.gov/>

²⁶ Disponible en línea en el enlace <http://www.lidar-online.com/>

²⁷ Disponible en línea en el enlace <https://www.neonscience.org/>

Uso de drones para la teledetección forestal

Los drones tienen su origen en los vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés), creados con fines militares y que consisten en una aeronave que no cuenta con tripulación humana y que puede ser totalmente autónoma u operada por control remoto. Los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS por sus siglas en inglés), fueron desarrollados posteriormente para diferentes usos y están conformados por una aeronave, estación de control, subsistemas de lanzamiento, recuperación, soporte, comunicación y sistema de transporte. A estos últimos sistemas se les conoce comúnmente como drones (Mojica *et al.* 2015). Las principales características de un dron son la autonomía, carga útil transportable, dimensiones, capacidad de despliegue y tipo de misión.

Los drones se clasifican de acuerdo con el tipo de ala y su autonomía (Ingeoexpert s.f.). Pueden ser autónomos (no necesita de un control desde tierra, pues son programados y funcionan con un sistema y sensores integrados), o tener distintos niveles de control desde estaciones en tierra.

Por el tipo de ala pueden ser de ala fija (similar a un avión) o ala rotatoria (de cuatro, seis u ocho hélices). Los drones de ala fija recorren más distancias, pero no pueden desplazarse adecuadamente en el plano vertical, mientras que los de ala rotatoria tienen la ventaja de mantenerse en el mismo sitio sin variar la posición, gracias a sus giroscopios y estabilizadores, lo cual representa una ventaja para fotos y videos (Paneque-Galve *et al.* 2014). Usuarios de esta tecnología señalan que estos últimos tienen menos capacidad de vuelo, lo que significa que los modelos comerciales (más utilizados) pueden volar alrededor de 30 minutos y alejarse hasta dos km de la estación, empezando a perder señal a los 500 metros. En términos generales, los drones tienen un bajo desempeño geométrico y radiométrico, si se les compara con los satélites.

Especialistas forestales señalan que los drones han sido ensayados en el monitoreo y vigilancia de áreas de uso forestal para una mejor comprensión de la estructura de bosques en el contexto de inventarios, la cuantificación de árboles en sistemas mixtos y la conservación en países como Belice, Guatemala, Panamá, República Dominicana, Surinam y Perú, aunque no existen a la fecha experiencias de uso continuo, con la excepción de Brasil. Estos equipos pueden resultar muy útiles en zonas de difícil acceso o donde existan condiciones que signifiquen un riesgo para la seguridad del personal (geografía accidentada, presencia de actividades ilegales, inexistencia de infraestructura de acceso, etc.). En Perú, por ejemplo, organizaciones no gubernamentales (ONG) ambientalistas hacen uso de drones comerciales para el monitoreo y vigilancia de áreas de conservación en la Reserva Nacional Tambopata, sobre todo para la detección temprana de actividades de minería ilegal.

Uso de drones en el Sistema de Cadena de Custodia del Servicio Forestal Brasileño

Uno de los usos más destacados de drones es su integración al SCC de Brasil, en el que se realizan sobrevuelos para la toma de fotografías aéreas que son empleadas para la estimación de volúmenes de trozas de madera en patios de acopio (Figura 7), mediante el modelado tridimensional, con base en estas fotografías. Además, esta institución está evaluando el potencial de las fotografías aéreas tomadas con drones para reemplazar las imágenes LiDAR en el monitoreo de impacto y recuperación de áreas bajo tala selectiva, pues de ser el caso representarían una alternativa mucho más costo-eficiente.

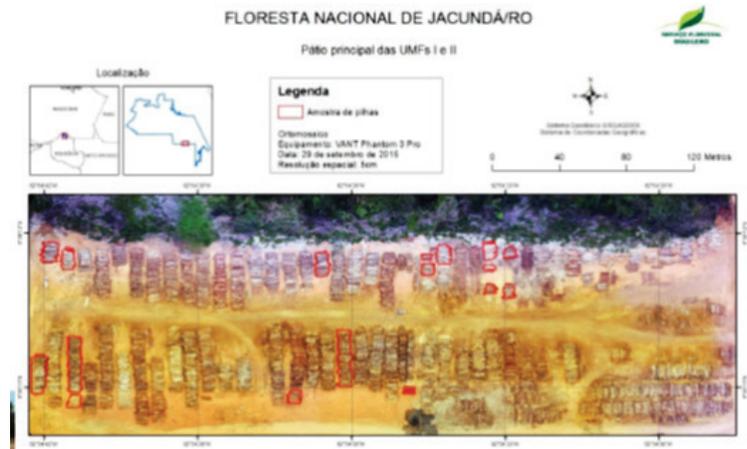


Figura 7. Fotografía para la estimación de volúmenes de madera en patio de acopio, tomada mediante drones

Fuente: Chaves (2018)

A pesar de que el alcance de los drones ensayados para el monitoreo forestal aún es corto, su uso ha proporcionado ventajas con respecto a otras tecnologías, al permitir el acople de cámaras fotográficas o sensores como LiDAR. Entre las ventajas se mencionan que la información generada es en tiempo real, fácil de procesar, independiente de ciertas condiciones ambientales (principalmente nubosidad) y eficiente en el monitoreo de áreas inaccesibles. Drones con sensores LiDAR posibilitan la obtención de imágenes de alta resolución, con una mayor seguridad para el personal en comparación con el trabajo de campo.

Paneque-Gálvez *et al.* (2014), mencionan que una ventaja de realizar mediciones con drones y cámaras fotográficas es la posibilidad de realizar una mayor frecuencia de visitas que con el trabajo de campo o con el uso de imágenes satelitales o de radar, además de reducir el impacto en el bosque al tener menos entradas. Laumonier (2018), a partir de ensayos realizados por CIFOR en países asiáticos, señala como ventaja el permitir monitorear matrices con paisajes complejos (por ejemplo, de alta biodiversidad) y que requieren imágenes de alta resolución que son muy costosas. Además, la interpretación de análisis de drones con cámaras fotográficas acopladas requiere menor grado de especialización que otros sensores remotos, lo que, de acuerdo a usuarios de la tecnología, facilita la toma de decisiones en tiempo real.

El costo de operación y mantenimiento de drones puede ser una limitante para su uso, ya que puede ser más caro que utilizar imágenes satelitales (dependiendo de su precio, tipo y el tamaño de área a evaluar). Mandujano *et al.* (2017) analizaron el uso de drones para evaluaciones de fauna en México (mamíferos y reptiles terrestres y acuáticos y animales en arrecifes coralinos) y señalan que los drones tienen la desventaja de tener corto alcance (en este caso, de 600 metros), lo cual resulta útil para tareas como monitorear nidos de aves, pero da limitaciones para el monitoreo de grandes extensiones en las que se desplazan algunos grupos de fauna migratoria o de gran tamaño, además de requerir mayores cuidados para su programación en el caso de emplear los drones más sencillos y de menor costo.

Otro cuidado que debe considerarse con el uso de drones es que el equipo puede dañarse fácilmente en caso de utilizarlo de forma incorrecta o en malas condiciones ambientales (Ruiz *et al.* 2017). Para Paneque-Gálvez *et al.* (2014) los drones pequeños tienen la limitante de soportar una baja capacidad de carga de equipos y cuentan con tamaños pequeños de baterías, lo que reduce el tiempo de vuelo o la posibilidad de acoplar cámaras fotográficas de mejor resolución. Además, el uso de drones en sitios de alta criminalidad puede poner en riesgo la integridad del equipo, así como la vida de los operadores.

Ruiz *et al.* (2017), advierten algunas limitaciones legales para el uso de drones. En algunos países existen normativas que regulan su uso en su espacio aéreo. Por ejemplo, la legislación en Estados Unidos²⁸ establece algunas restricciones que pueden afectar el monitoreo forestal utilizando drones, como que los pilotos y drones deben permanecer siempre en lugares visibles, los equipos no deben sobrevolar sobre personas diferentes a la actividad, se debe ceder el paso a otras aeronaves, la velocidad máxima permitida es de 160 km/h, las alturas máximas son de 12 metros, entre otras. En México, según la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) (2017), las regulaciones para los vuelos están definidas de acuerdo con el peso de estos y existe una serie de regulaciones para su uso, como la necesidad de obtener licencias de pilotaje o el requerimiento de seguros de daños a terceros. Además, es necesario obtener permisos previos por la DGAC para sobrevolar el cielo mexicano. Para Costa Rica, la autoridad de aviación civil generó un reglamento a partir de agosto de 2017 en el que se regulan los vuelos de drones con un peso inferior a 150 kg. Para drones menores a 25 kg, utilizados con fines recreativos, no se necesitan permisos, pero se debe seguir la guía de seguridad dispuesta en la publicación. En Guatemala, la Dirección General de Aeronáutica Civil de Guatemala (DGAC), exige la inscripción de los drones de peso superior a 250 gramos o que puedan considerarse peligrosos debido a su peso, para lo cual se ha establecido un procedimiento administrativo. Para drones de mayor peso se requiere obtener un certificado de aeronavegabilidad y, cuando los fines son comerciales, contar con una licencia de piloto. En Perú, Mena-Ramírez (2018) señala que la autoridad de aviación civil de Perú ha creado una legislación similar a Costa Rica, en la que las personas que participen en actividades aero-deportivas o recreativas deben contar con una licencia de piloto emitida por esta misma institución, a excepción de aeronaves estatales y todas las aeronaves menores a 2 kg.

El precio de los drones y sus cámaras y resoluciones pueden variar de acuerdo con el fabricante. En los portales de ventas de Amazon²⁹ y Forestry Suppliers³⁰ es posible cotizar los equipos completos con los diferentes sensores que se pueden acoplar, a precios que oscilan entre los EUR 2000 y EUR 20 000, para aplicaciones forestales.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), con apoyo del Programa de colaboración de las Naciones Unidas para la Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los bosques (ONU REDD), implementó un proyecto comunitario de monitoreo forestal en bosques tropicales entre los años 2015 y 2017, para desarrollar capacidades en los miembros de las comunidades indígenas de Panamá (Figura 8). Para estos monitoreos se utilizaron drones de ala fija, de 180 cm de ancho por 129 cm de largo, peso de 2,3 kg, una capacidad máxima de carga de 1 kg, batería de 4 celdas, con piloto automático Pixhawk, GPS, capacidad de vuelo entre 100 y 120 min y una capacidad de mapeo de 3,8 km². Se acoplaron cámaras de 12 megapíxeles que otorgaron imágenes con resoluciones de hasta 5 cm por píxel. Esta resolución permite identificar claros provocados por caídas de árboles, por lo que se puede deducir que son capaces de medir impactos como: derribo de árboles, áreas impactadas, aperturas de dosel y análisis a nivel de paisaje.

²⁸ Información disponible en el enlace <https://www.oneair.es/nueva-ley-uso-drones-usa-faa/>

²⁹ Disponible en el enlace <https://www.amazon.es/>

³⁰ Disponible en el enlace <https://www.forestry-suppliers.com/>



■ **Figura 8.** Uso de drones para el monitoreo forestal en Panamá

Fuente: FAO (2017, <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/417512/>)



■ **Figura 9.** Densiómetro forestal

Fuente: Muñoz (2013)

1.3.2.2. Equipos para la medición de entrada de luz en el bosque

Densiómetro forestal

El densiómetro forestal es un dispositivo de medición utilizado para evaluar *in situ* el grado de cobertura del dosel (Figura 9). Consta de una caja de madera con un espejo cóncavo o convexo subdividido por una malla de 24 cuadros y un nivelador esférico de burbuja. Su lectura se considera un indicador indirecto del nivel de radiación solar al piso del bosque (Promis 2013). Este equipo fue muy utilizado en el pasado, en los primeros estudios sobre caracterización de los impactos del manejo forestal en la cobertura vegetal. Pese a que es un instrumento de medición rápida, actualmente no es de uso generalizado debido a que se le considera poco preciso por los errores de medición asociados que hace que las lecturas puedan variar significativamente entre evaluadores (Muñoz 2013). Factores como la altura donde es colocado el instrumento para la medición, el ángulo con que se mire el espejo, el nivel de radiación al momento de la lectura y el grado de visión del evaluador, pueden inducir fácilmente a error. Estos instrumentos han cedido espacio a técnicas fotográficas y análisis digitales.

Fotografías hemisféricas

Las cámaras hemisféricas son equipos que constan de una cámara fotográfica digital tipo reflex de lentes intercambiables, un objetivo tipo ojo de pez (objetivo gran angular), un trípode, un ordenador y un software para hacer los análisis. El principio de esta tecnología es la toma de una fotografía hemisférica, dirigida al dosel, en un punto en el bosque, con la cual es posible estimar las condiciones de luz del sotobosque, analizar la estructura vertical y estimar parámetros como el índice de área foliar (Comeau 2000) (Figura 10).

De acuerdo a Mauro-Díaz *et al* (2014), los softwares más comunes para el análisis de estas imágenes son CIMES³¹, GLA³² y Hemisfer³³. La fotografía hemisférica genera resultados confiables bajo un cierto nivel de sombra y no puede emplearse con niveles altos de radiación. Por esta razón su uso se limita a estimar los efectos del derribo de árboles y de áreas impactadas de tamaño pequeño. Entre las desventajas que se citan del uso de estos equipos en condiciones tropicales están: a) el alto costo de las cámaras hemisféricas y su mantenimiento, b) la necesidad de capacitación especializada para interpretar las fotografías y calibrar los equipos, y c) la baja precisión obtenida bajo condiciones climáticas que son frecuentes en los trópicos como alta radiación y/o lluvias de leves a intensas (Comeau 2000, Mauro-Díaz *et al.* 2014). En ecosistemas templados y subtropicales, sin embargo, su uso ha sido más extendido, utilizándose para análisis estructurales y de ambientes lumínicos en plantaciones forestales y en bosques naturales manejados (por ejemplo Cabrelli *et al.* 2006).

Radiómetros y ceptómetros

Existen modelos de radiómetros diseñados para medir de manera exclusiva la RAFA³⁴, que calculan la intensidad de la luz en el rango visible (en flujo de fotones como unidad de medida), para diferenciarlo de la totalidad de radiación recibida en un determinado punto. La marca Walz, ha lanzado al mercado el equipo ULM-500 (Figura 11), que brinda facilidades de uso como la integración de una memoria para el registro de datos, la posibilidad de tomar datos de manera continua (*data logger*) y la de mantener los registros por un periodo de entre 3 a 5 meses, gracias a la capacidad de su batería. Puede ser usado en combinación con sensores de temperatura (WALZ 2019). Su precio puede alcanzar los USD2000.



■ **Figura 10.** Fotografía hemisférica de un dosel de bosque latifoliado

Fuente: Mauro-Díaz *et al.* (2014)

³¹ Disponible en <http://jmnw.free.fr>

³² Disponible en <http://www.ecostudies.org/gla>

³³ Disponible en <http://www.wsl.ch/dienstleistungen/hemisfer>

³⁴ La RAFA está definida como el rango de radiación solar cuya longitud de onda es apta para la fotosíntesis de las plantas (entre 400 a 700 nanómetros) (Raffo 2014)

Los ceptómetros son equipos diseñados para estimar el índice de área foliar³⁵ con base en mediciones de RAFA por encima y debajo del dosel de la vegetación, puesto que sus sensores están incorporados en una barra. El modelo ACCU LP-80, por ejemplo, tiene 80 sensores que pueden medir la intensidad de luz de manera simultánea en una barra de 102 cm de largo, en la que se pueden definir hasta ocho segmentos (Figura 12). También cuenta con una memoria interna para el almacenamiento de datos (LABFERRER 2019). Un ejemplo de aplicación de este equipo con fines de manejo forestal es el estudio de Mora *et al* (2014), en el que se utilizó este modelo de ceptómetro e imágenes satelitales de alta resolución (Quickbird y WorldView), para analizar la correlación entre las variables índice de área foliar e índice normalizado de vegetación, en bosques húmedos tropicales en parcelas experimentales de Panamá.



Figura 11. Radiómetro

Fuente: WALZ (2019)



Figura 12. Ceptómetro ACCU LP-80

Fuente: LABFERRER (2019)

³⁵ El índice de área foliar se define como área de hojas por unidad de área de superficie del suelo

1.3.3. Plataformas para el monitoreo de la cobertura forestal

Existen plataformas como Google Earth y Google Earth Engine que son de uso libre, brindan imágenes gratuitas y ofrecen interfaces amigables a usuarios con poca experiencia en *software* de análisis de teledetección. Las imágenes de estas plataformas son de resolución media y no permiten análisis con niveles de detalle finos que faciliten el monitoreo de los impactos del manejo forestal, sin embargo, constituyen la alternativa más viable para muchos usuarios en el monitoreo de áreas de grandes extensiones y un soporte valioso para autoridades forestales, que requieren vigilar deforestación u otro tipo de eventos dentro del área bajo su responsabilidad.

Google Earth³⁶ es ampliamente utilizada por su facilidad de manejo. Emplea prioritariamente imágenes Landsat 8 y es reconocida por su alta precisión para la visualización y medición de áreas en todo el mundo, siendo especialmente útil en áreas habitadas, mientras que, para zonas rurales y forestales, las resoluciones espaciales y temporales son menores, por lo que su utilidad dependerá de la disponibilidad de imágenes, la escala de trabajo y la finalidad del análisis (entrevistas a especialistas). Por lo anterior es que Google Earth es muy empleada para usos urbanos y como referencia para el diseño de muestreos, el monitoreo y vigilancia de recursos naturales (por ejemplo deforestación) a partir de la escala mediana.

La plataforma de Google Earth Engine³⁷ es también de acceso gratuito. Emplea imágenes satelitales Landsat, Sentinel y Modis y, a diferencia de Google Earth, tiene fines científicos (Figura 13), por lo que incluye herramientas para el análisis geoespacial, apropiadas para analizar, entre otros, recursos forestales entre la pequeña y mediana escala y su cambio en el tiempo (cuenta con imágenes de una antigüedad de 40 años). El Servicio Forestal Brasileño emplea esta plataforma para el análisis de imágenes Landsat y Sentinel en el monitoreo de áreas bajo aprovechamiento forestal, para lo que se realizó un arduo trabajo en el desarrollo de algoritmos para el análisis de estas imágenes. En marzo de 2018, FAO y Google Earth Engine anunciaron el lanzamiento de una plataforma en colaboración, que se espera aportará a la evaluación de recursos forestales mundiales (FAO 2018a).

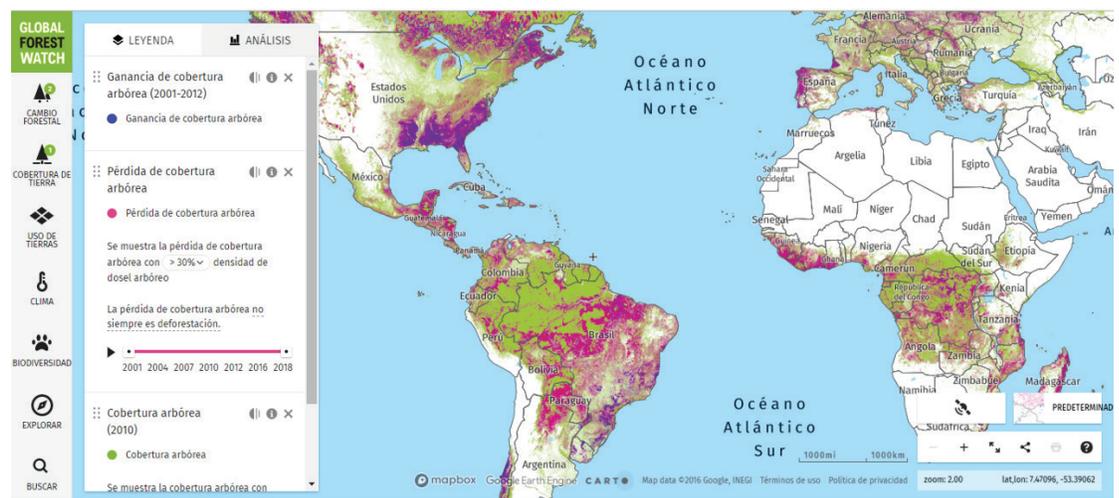


Figura 13. Interfase de la Plataforma Google Earth Engine

³⁶ Disponible en el enlace <https://www.google.com/intl/es/earth/>

³⁷ Disponible en el enlace <https://earthengine.google.com/>

La herramienta gratuita Global Forest Watch³⁸, desarrollada por el World Resource Institute, está sustentada en su mayor parte en imágenes provenientes de Google Earth Engine, en diferentes grados de resolución, sobre todo a partir de los 30 metros de tamaño de pixel (Figura 14). El principal aporte de esta plataforma es que brinda evaluaciones diarias, semanales, mensuales o anuales de las tendencias de cobertura boscosa, así como evaluaciones históricas y estadísticas por país y globales, como datos periódicos sobre cambio en cobertura forestal, la pérdida y ganancia de cobertura arbórea global, alertas de deforestación para bosques húmedos y de Amazonía, paisajes forestales intactos, densidad de carbono pantropical, incendios forestales, uso forestal, datos de interés social, entre otros (WRI 2014). Aunque esta plataforma no consigue recoger información de pequeña escala (a excepción de algunas regiones para el monitoreo de incendios), tales como impactos de aprovechamiento en unidades de manejo o el aumento de la cobertura forestal por acciones de restauración en áreas pequeñas (Curtis *et al.* 2018), se la considera una valiosa herramienta de visualización.



■ **Figura 14.** Interfase de Plataforma Global Forest Watch

Fuente: WRI (2014)

³⁸ Disponible en el enlace <https://www.globalforestwatch.org/>



Tecnologías para la medición y el monitoreo de flujos de carbono debido a impactos del aprovechamiento forestal

2.1 Generalidades para la medición de carbono en bosques tropicales

La medición de carbono en bosques es importante pues permite generar información para preparar inventarios de gases de efecto invernadero. De acuerdo con las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), a partir del año 2006 el inventario de GEI de los países considera al sector forestal como un componente del sector “Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra” (AFOLU) (Tubiello *et al.* 2015). Las metodologías y directrices del IPCC para esta contabilización, señalan que la medición de carbono en bosques

tiene cinco reservorios: biomasa aérea (incluyendo la madera extraída y movilizada), biomasa subterránea, hojarasca, madera muerta y carbono en suelo (Hewson *et al.* 2014)

Las directrices de IPCC, para tierras forestales, aceptan dos métodos de medición de contenidos de carbono: a) método de cambio en la reserva y b) método de pérdidas y ganancias. El primero consiste en identificar cambios en las reservas de carbono al inicio y al final de un periodo en una misma área de monitoreo. El método de ganancias y pérdidas consiste en medir el área de cambio de un tipo de cobertura de suelo o de manejo forestal a un tipo diferente y las diferencias en las reservas de carbono entre esos dos tipos (por unidad de área). A estas diferencias en las reservas a lo largo del tiempo, se les conoce como factores de emisión (FE), mientras que a las áreas de cambio se las conoce como datos de la actividad (DA). Estos se multiplican para estimar las emisiones relacionadas con cada tipo de cambio en el uso de la tierra (Hewson *et al.* 2014).

2.1.1. Consideraciones metodológicas para la determinación de factores de emisión de carbono en bosques bajo aprovechamiento forestal

Para el cálculo de emisiones por degradación de bosques bajo aprovechamiento forestal no existe una metodología acordada y la elección de un enfoque de medición depende de una serie de factores que incluyen el tipo de degradación, los datos disponibles, las capacidades, los recursos, las posibilidades y las limitaciones (GOF-C-GOLD 2015). Los lineamientos del IPCC, por ejemplo, consideran de manera abierta el concepto bosque degradado y reconoce que las distintas intensidades de aprovechamiento y dinámicas de recuperación influyen sobre las reservas y flujos de carbono. Especialistas en la materia señalan que entre los factores a tomar en cuenta en áreas bajo manejo forestal puede incluirse el cálculo de pérdidas de carbono debido al retiro de biomasa por la tala de árboles, los daños en árboles remanentes, la construcción de caminos, senderos de arrastre, depósitos, campamentos y demás infraestructura que acompaña la extracción forestal, aunque no es usual que se exija la cuantificación de estos últimos factores debido a la complejidad de las mediciones.

Pearson *et al.* (2014) desarrollaron una metodología para la cuantificación de emisiones de carbono por aprovechamiento forestal, que es empleada en la actualidad como referente en la mayoría de las investigaciones relacionadas. Los autores calcularon factores de emisión para la tala selectiva, considerando la suma de tres factores: 1) biomasa del volumen extraído con empleo de ecuaciones alométricas (cuadro explicativo), 2) biomasa dañada en el proceso (biomasa del tocón y parte superior del tronco del árbol talado y la parte dejado como madera muerta en el bosque, árboles muertos accidentalmente o gravemente dañados y grandes ramas rotas fuera de los árboles sobrevivientes durante la tala de árboles) y 3) biomasa dañada resultante de la construcción de infraestructura auxiliar (apertura de caminos, senderos de arrastre, patios de acopio, campamentos, etc.). Los autores enfatizan además la inutilidad de considerar las emisiones de carbono del suelo en un sistema de aprovechamiento forestal, puesto que se ha demostrado que la tala no tiene impacto significativo en este depósito de carbono, debido a que la superficie del impacto es relativamente pequeña, la afectación es de corta duración y existe una permanencia de la cubierta vegetal.

El estudio de Pearson *et al.* (2014) se realizó en 13 parcelas distribuidas en bosques de seis países tropicales (Belice, Bolivia, Brasil, Guyana, Indonesia y la República del Congo). Posteriormente la metodología ha sido empleada para fines tales como el cálculo de los niveles de referencia en países como Guyana (Government of the Cooperative Republic of Guyana 2015) y para la estimación de factores de emisión por tala selectiva en Colombia (Casarim *et al.* 2017).

Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa

Son regresiones derivadas de mediciones detalladas que relacionan el volumen de los árboles, su diámetro o su altura a una variable de interés, como el volumen arbóreo (incluyendo copa y raíz) o la biomasa. En bosques húmedos tropicales, uno de los estudios más destacados es el de Chave *et al.* (2005) en el que se analizaron datos provenientes de 27 sitios en diferentes países del trópico. Se analizaron factores como el diámetro de tronco, densidad específica de la madera, altura total y tipo de bosque (seco, húmedo, o muy húmedo) y su potencial de uso para estimar biomasa. Las ecuaciones generadas por este equipo de investigadores son ampliamente usadas en los trópicos para fines de investigación y de inventario. En el marco del proyecto Guatecarbon, en la Reserva de Biósfera de Guatemala, se calcularon ecuaciones alométricas para esta localidad, con base en los datos de la red de PPM de las concesiones locales¹.

Arreaga, W. 13 mar 2019. Tecnologías para el monitoreo del manejo forestal (entrevista). Guatemala.

Sensores remotos para estimación de emisiones en áreas de infraestructura auxiliar

La longitud de caminos y el área de campamentos, patios de acopio y otros asociados a la extracción de madera, son factibles de ser medidos por sensores remotos tales como fotografías aéreas o imágenes satelitales de resolución mediana a alta (Hewson *et al.* 2014).

Si se logran medir estas dimensiones y se obtiene un factor de emisión promedio con base en las reservas de carbono de áreas no taladas, es posible extrapolar estos datos para el cálculo de emisiones (Pearson *et al.* 2014). Esto fue aplicado en Guyana para el cálculo de datos de la actividad para emisiones provenientes de la tala selectiva, en el marco de la medición de los niveles de referencia de REDD+ (Government of the Cooperative Republic of Guyana 2015).

2.1.2. Desafíos metodológicos para el monitoreo de emisiones de carbono en bosques tropicales bajo manejo forestal

Uno de los desafíos más importantes para el cálculo del flujo de emisiones de carbono es realizar las estimaciones con validez estadística. En bosques tropicales bajo manejo, el cálculo de los FE estandarizados por área se vuelve complejo si se le compara con las mediciones del cambio de uso, puesto que se trata de territorios que mantienen el mismo tipo de uso de suelo, con diferentes intensidades de aprovechamiento y cuyas intervenciones son difíciles de detectar y medir con precisión (GOFC-GOLD 2015). Esto supone un desafío metodológico y tecnológico ya que, por ejemplo, el método de cambio de reserva requeriría de un número demasiado alto de parcelas permanentes. Hewson *et al.* (2014) sugieren emplear el método de pérdidas y ganancias y contar con un muestreo de campo en áreas sujetas a actividades de extracción, aunque esto tampoco logre ser exacto debido a que los ciclos forestales de extracción y recuperación de biomasa tienden a ser mucho más largos que los períodos de compromiso o contabilidad de los acuerdos sobre cambio climático, por lo que la obtención de resultados está desfasada con la demanda de los mismos para la toma de decisiones (Achard *et al.* 2014). Esto representa un reto, si se piensa en seleccionar un umbral de tiempo para medir los ciclos de pérdidas y ganancias en sistemas de aprovechamiento forestal y si se considera que el aumento neto de las reservas de carbono puede darse a través de una serie de actividades humanas, como la siembra de enriquecimiento, la regulación de la extracción a niveles que son más bajos que la tasa de incremento u otros, cuya medición es de largo plazo.

Otro desafío es la necesidad de una gran cantidad de información para generar ecuaciones alométricas útiles para el cálculo de reservas de carbono, lo que implica un trabajo de investigación exhaustivo para generar modelos con un nivel de incertidumbre bajo. Esto requiere de un esfuerzo colaborativo y coordinado entre instituciones de investigación, agencias de cooperación y los actores locales de cada zona o país que, sin embargo, se ha llevado a cabo progresivamente. Para abordar este desafío se han ensayado tecnologías como LiDAR (Ellis *et al.* 2019) para evaluar su potencial para agilizar la toma de datos que estas investigaciones demandan, aunque especialistas señalan que, a la fecha, aún se mantiene la necesidad de calibrar las mediciones de estos sensores mediante mediciones tomadas directamente en campo.

Otro desafío para lograr mediciones de carbono con validez estadística en bosques bajo manejo forestal, es que no existen protocolos acordados para medir la emisión de GEI por factores como la respiración de los componentes no arbóreos del sistema (suelo, hojarasca, biomasa no leñosa), mortalidad natural relacionada con la competencia, senescencia, afectaciones por viento, fuego y enfermedades y que pueden verse alteradas por la cosecha de madera y los tratamientos silviculturales (Hewson *et al.* 2014). Especialistas señalan que tampoco se contabilizan las emisiones producidas por la quema de combustibles u otras fuentes antrópicas que implica la extracción selectiva de árboles, debido a la complejidad que esto significaría a gran escala y a que la fiabilidad de datos provenientes de empresas aún no está demostrada. Si bien la metodología de Pearson *et al.* (2014), es el principal referente metodológico de las iniciativas que están publicadas, esta excluye factores que no se miden regularmente porque su cuantificación es complicada de realizar y estandarizar. Recursos informáticos como calculadores de carbono podrían ayudar a incluir algunas de estas variables.

Incluir las emisiones por la tala de subsistencia y la tala ilegal es otro desafío, puesto que no son posibles de cuantificar en los sistemas formales de reporte de extracción de productos forestales, lo que impide la estimación de las emisiones provenientes de estas actividades con un nivel de precisión adecuado. Aunque las imágenes de sensores remotos de libre acceso (Landsat, Sentinel o plataformas como Google Earth) ofrecen posibilidades para la vigilancia (sirven para detectar perturbaciones y cuantificar la extensión de infraestructura, senderos y caminos), aún no se ha desarrollado en todos los países herramientas que permitan estimar con precisión el retiro de biomasa en grandes territorios bajo manejo forestal, por lo que el desarrollo de protocolos costo-efectivos, consistentes, confiables y basados en información colectada en campo, sigue siendo un reto (Ellis *et al.* 2019).

2.2. La medición de carbono en bosques tropicales bajo manejo forestal: experiencias, barreras e incentivos

2.2.1. Experiencias de medición de emisiones de carbono en bosques bajo manejo en Latinoamérica y el Caribe

Existen investigaciones recientes que han tenido por objetivo determinar el efecto del manejo forestal sobre los flujos de carbono en bosques tropicales de la región. Un análisis completo ha sido efectuado por Pearson *et al.* (2017), quienes estimaron las emisiones provenientes del impacto de actividades humanas en bosques entre 2005 y 2010, incluido el aprovechamiento forestal, en 74 países en desarrollo. Determinaron que el 53% del total de este tipo de emisiones en los países analizados provino de la extracción de madera, mientras que el 30% provino de la extracción de leña y el 17% de incendios forestales. Estos porcentajes difirieron por región, siendo que, para Suramérica y América Central, las emisiones de la extracción maderera alcanzaron una proporción mayor al promedio global (69%). Un aporte importante de esta investigación es que compara los niveles de emisiones que se alcanzan por extracción forestal con los ocurridos por cambio de uso de la tierra. Determinaron que, en términos globales, las emisiones por aprovechamiento de bosques alcanzan la tercera parte de la proveniente por el cambio de uso de la tierra, por lo que las consideran cuantitativamente significativas.

West *et al.* (2014) comparan la recuperación de biomasa y de carbono durante 16 años en parcelas AC y AIR en el estado de Pará, en la Amazonía brasilera. Encontraron una mayor recuperación de carbono por rebrote y crecimiento de árboles residuales en las áreas bajo AIR (2,8 Mg/ha/año en AIR, versus 0,5 Mg/ha/año en AC). Además, determinan que, para el periodo de estudio, la recuperación de biomasa fue de 100% en las parcelas bajo AIR, del 77% en aquellas bajo AC y del 96% en las parcelas testigo. Por ello, los autores afirman que el paso de AC hacia AIR es una estrategia relevante para la mitigación del cambio climático y la gestión forestal.

Piponiot *et al.* (2016) presentan los resultados de estudios realizados por un conjunto de centros de investigación, en trece parcelas permanentes de muestreo instaladas en distintas localidades de la Cuenca Amazónica y Guyana, con la finalidad de evaluar la recuperación de las reservas de carbono a través de la regeneración natural, durante los diez años posteriores al aprovechamiento forestal. Si bien la finalidad del estudio no fue la evaluación de las reservas maderables, la experiencia es valiosa

por relacionar factores de estrés climático con la recuperación de biomasa en distintas localidades, además de hacer hincapié en la importancia del manejo forestal y el AIR para favorecer especies comerciales deseables.

Ellis *et al.* (2019) presentaron uno de los estudios más completos y recientes sobre impactos del aprovechamiento forestal en las emisiones de carbono. Su investigación considera 61 sitios de muestreo en siete países con bosques tropicales (Península de Yucatán en México, Madre de Dios en Perú, Surinam, Gabón, República de Congo, República Democrática de Congo y el Este y Norte de Kalimantan en Indonesia). Determinaron que la contribución de la tumba de árboles aporta el 59% de estas emisiones, mientras que el transporte y el arrastre generan el 31% y 10% respectivamente. Una importante conclusión de este estudio es la contribución de las técnicas de AIR a la reducción de estas emisiones (44%), resultados que respaldan la importancia de incentivar este tipo de manejo en bosques tropicales desde la perspectiva de la mitigación del cambio climático. La metodología se basó en la empleada por Pearson *et al.* (2014), con la diferencia de que la longitud de caminos y senderos de arrastre no fue medida con base en sensores remotos, sino con tomas de datos en campo con el uso de GPS y de imágenes LiDAR para el caso de uno de los sitios. Como parte de este estudio, Goodman *et al.* (2019) presentan los resultados de los sitios de muestreo de Madre de Dios, Perú, en donde se compararon los resultados obtenidos en concesiones forestales con y sin certificación FSC. Si bien no se encontró diferencias significativas entre las emisiones de ambos tipos de concesiones, sí se determinó que la intensidad de aprovechamiento influye en la cantidad de emisiones, y que una porción importante de estas (40%) corresponde a los residuos de aprovechamiento abandonados en el bosque, siendo aún mayor que la porción correspondiente a la madera retirada (25%). Esta proporción varía de acuerdo al tipo de aprovechamiento, siendo que la cantidad de residuos dejados en el bosque fue menor en las concesiones certificadas, en comparación a las no certificadas. Este hallazgo es importante puesto que, si bien es cierto en la actualidad tanto la madera movilizada como los residuos abandonados son cuantificados como emisiones, la primera retorna a la atmósfera en un ciclo más largo. Esto, sumado a los beneficios económicos que se tendrían al reducir el desperdicio en la transformación primaria, pueden constituir un importante fundamento para considerar el AIR como una forma de mitigación efectiva de emisiones de GEI en la actividad forestal.

En los resultados presentados en el marco de este mismo conjunto de investigaciones, para Surinam, sí se reporta una menor emisión en las áreas de aprovechamiento certificadas comparadas con las no certificadas y, al igual que el estudio en Perú, encuentran que la biomasa abandonada en el bosque es el principal factor que aporta a las emisiones provenientes de la actividad (Zalman *et al.* 2019). Para este país se identifica el control de la dirección de caída de los árboles aprovechados como una de las prácticas de AIR más efectivas para reducir emisiones.

2.2.2. Barreras e incentivos para el monitoreo del flujo de emisiones en áreas bajo manejo forestal en Latinoamérica y el Caribe

Las investigaciones respecto a la dinámica y monitoreo del carbono en bosques y la influencia del AIR y el AC sobre las emisiones en áreas bajo manejo representan un avance en el conocimiento con un alto potencial para aportar a la toma de decisiones de manejo silvicultural. Sin embargo, todavía existen barreras para escalar la información generada hacia las estimaciones de escalas regional y nacional en LAC y hacia la formulación de políticas.

Pese a los desafíos metodológicos que implican la toma de datos con un alto nivel de detalle, un factor que incentiva el monitoreo de flujos de carbono en bosques bajo manejo forestal es el compromiso de cumplimiento de acuerdos internacionales de cada país en el marco de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero o el cálculo de niveles de referencia forestal para REDD+. Además, la búsqueda de un mayor nivel de precisión requiere del respectivo acompañamiento tecnológico para que las mediciones sean hechas bajo mayores niveles de precisión³⁹. Aunque en los primeros años se aceptaron los niveles de precisión bajo y medio, para asegurar que en el futuro se alcancen las metas internacionales de reducción de emisiones, se requiere que los países presenten reportes de niveles más altos y de menor incertidumbre. De acuerdo a los testimonios de especialistas familiarizados a esta materia, esto implica en la mayoría de los casos la utilización de información sitio-específica e información de inventario (altura de árboles, diámetros, especies, entrevistas socioeconómicas), y la toma de datos de campo con el uso de las herramientas y tecnologías más adecuadas para valorar la actividad forestal y la dinámica silvicultural, en contraste con el enfoque actual que tiende a determinar el estado actual de los recursos boscosos pero no se exige información respecto a los efectos de la actividad maderable sobre ellos con un nivel de detalle suficiente para determinar, por ejemplo, la contribución del AIR a la mitigación de emisiones.

Una barrera para la implementación de sistemas de monitoreo de flujos de carbono en áreas bajo manejo forestal es que en LAC aún no se han desarrollado mecanismos de incentivos para el AIR basados en este aspecto, o monitoreos sistemáticos para la colección de datos que permitan sustentar un programa de incentivos, pese a que grupos de investigadores como Putz *et al.* (2008b) señalan desde hace más de diez años el potencial del AIR para la mitigación de las emisiones de carbono provenientes del aprovechamiento forestal. Recientemente, Ellis *et al.* (2019) presentan información que cuantifica la contribución del AIR a la mitigación de la emisión de carbono en bosques tropicales, lo que constituye una oportunidad para la puesta en relevancia de esta temática en el contexto político internacional.

2.3. Tecnologías para la medición de carbono en bosques tropicales bajo manejo forestal

Los recursos tecnológicos para la medición de variables dasométricas necesarias para el cálculo de biomasa retirada por manejo forestal y el monitoreo de la dinámica de recuperación posterior fueron abordados en el Capítulo 1. En este acápite, se presentan las principales tecnologías disponibles (Cuadro 7) para la estimación de las reservas de carbono en bosques y los cambios que este pueda sufrir asociado al manejo forestal, así como las principales ventajas y desventajas de su implementación.

³⁹ De acuerdo al IPCC los niveles son básico (nivel 1), medio (nivel 2) o alto (nivel 3).

Cuadro 7. Tecnologías para la estimación de reservas y flujos de carbono en áreas bajo manejo forestal

Tipo	Tecnología	Principales ventajas	Principales desventajas
Estimación de biomasa y emisiones de carbono	Calculadoras de carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Son compatibles con el uso de computadoras - Existen distintas calculadoras diseñadas para objetivos específicos. Existen varias calculadoras de uso forestal - Permiten una estimación integral, no sólo de la biomasa, sino también de las emisiones por el uso de combustible, insumos, transporte, etc. - Pueden usarse datos promedio de ser necesario, para una estimación con menor nivel de precisión 	<ul style="list-style-type: none"> - La mayoría de las calculadoras especializadas para el uso forestal no están disponibles en línea para su descarga libre - Requiere del ingreso de datos generados localmente para un mayor nivel de precisión
	Software y base de datos en línea de la plataforma Glob Allome Tree	<ul style="list-style-type: none"> - De uso gratuito. El <i>software</i> y las bases de datos de mediciones dasométricas, ecuaciones alométricas, densidad de madera y factores de expansión de biomasa son accesibles en línea - Los datos y la metodología de cálculo son estandarizados y permiten comparaciones entre estimaciones en diferentes localidades 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo permite el cálculo de los componentes de las emisiones de carbono relacionadas al retiro de biomasa
Medición de flujos de carbono	Equipos de medición de gases del suelo	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden ser operados por personal técnico, debidamente capacitado - Dependiendo del modelo del equipo, pueden ser acoplados a cámaras cerradas de captura de gases emitidos por el suelo - Son transportables fácilmente - Funcionan con baterías 	<ul style="list-style-type: none"> - Los equipos más sofisticados tienen un alto costo de adquisición - No mide la absorción de gases sino la emisión - Dependiendo del modelo del equipo, toma una sola medición por operación o puede configurarse para la toma de mediciones continuas por un periodo de hasta seis horas - Solo mide el flujo de gases proveniente del suelo - Dependiendo del modelo, los periodos de toma de datos pueden ser desde un solo muestreo hasta mediciones continuas por meses
	Torres de medición de flujo de carbono Eddy Covarianza	<ul style="list-style-type: none"> - Permite cuantificar tanto las emisiones (respiración) como la absorción de gases (fotosíntesis) de todo el sistema (suelo, vegetación, animales, microorganismos) - Permite relacionar el flujo de gases con la precipitación y temperatura - El equipo está diseñado para mediciones continuas y frecuentes en largos periodos de tiempo (años) - Está diseñado para que la fuente de energía sea solar 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de instalación y mantenimiento - Requiere de personal altamente capacitado para la toma y procesamiento de datos - No permite diferenciar qué parte de las emisiones viene de cada componente del ecosistema - Los resultados son solo representativos para un radio de 100 m alrededor del punto de medición - No son transportables
	Base de datos de flujos de carbono de la Plataforma Flux Data	<ul style="list-style-type: none"> - De acceso gratuito y disponible en línea - Los datos están disponibles en una base de datos Excel compatible con el uso de computadoras 	<ul style="list-style-type: none"> - En zonas tropicales, la mayoría de sitios de medición son agrícolas, mientras que la mayoría de puntos de medición en bosques están ubicadas en ecosistemas mediterráneos

2.3.1. Recursos informáticos para el cálculo de biomasa y carbono

El cálculo de biomasa, de reservas y flujos de carbono puede ser facilitado mediante el uso de recursos informáticos que hagan más fácil el cálculo de reservas de carbono para un grupo diverso de usuarios del bosque, organizaciones e instituciones, en sus respectivas unidades de trabajo y sin la necesidad de recurrir a procedimientos de alta complejidad tales como la toma directa de datos en campo. Herramientas como las calculadoras de carbono han sido desarrolladas para facilitar estas estimaciones de manera que respalden la toma de decisiones, aunque para usos forestales la mayoría no está disponible. Sin embargo, actualmente existe la plataforma en línea GlobAllomeTree⁴⁰, que cuenta con recursos útiles para estos fines, además de una base de datos colaborativa para la construcción colectiva de ecuaciones con mayores niveles de precisión.

Calculadoras de carbono

Las calculadoras de carbono son herramientas informáticas desarrolladas para facilitar el cálculo de emisiones de distintos tipos de actividades (p.e. agrícolas, industriales, transporte, doméstica). Su aplicabilidad depende, principalmente, del objetivo para el que fue diseñada cada calculadora, así como del tipo de usuario (p.e. institución, titular de actividad, academia, público en general), la escala de trabajo (p.e. hogar, predio, territorio, país) y nivel de precisión requerido. Para áreas de cobertura forestal, se han diseñado herramientas que pueden facilitar el cálculo de emisiones por cambio de uso de la tierra y por aprovechamiento forestal.

Colomb *et al.* (2012) analizan la potencialidad de uso de diferentes calculadoras de carbono y señalan que, para escoger una, es preciso considerar los fines del cálculo, la ubicación geográfica del área a analizar, el alcance del cálculo y, finalmente, el nivel de habilidad del usuario. Recomiendan en todos los casos analizar con cuidado la información de base para los cálculos, para evitar dobles conteos y que la contabilidad esté acorde a los estándares oficiales. Se reconoce asimismo que los resultados de la mayoría de las calculadoras de carbono tienen importantes incertidumbres, ya que se basan en cifras promedio y, por tanto, no manejan datos precisos de actividades ni de factores de emisión, lo que es una limitación para fines de investigación o inventarios con validez estadística, pero pueden ser útiles como referencia para usuarios.

Instituciones como FAO, el Banco Mundial y CATIE han desarrollado calculadoras de carbono con aplicación a actividades forestales (Cuadro 8); no obstante, la mayoría no está disponible en línea para potenciales usuarios y no se registra su empleo en la actualidad.

Estas herramientas consisten en su mayoría de hojas de cálculo Excel (ejemplo en la Figura 15), que son compatibles para el uso en computadoras. Son de gran utilidad para estimar el flujo de carbono de actividades de manejo forestal, tanto por el retiro de biomasa como por las actividades relacionadas, tales como prácticas de silvicultura, el retiro de vegetación, el consumo de combustible, la aplicación de fertilizantes, entre otros. Para su utilización, los usuarios requieren de ingresar información del área bajo manejo, las especies, las prácticas realizadas y los insumos empleados. Por lo general, vienen acompañadas de bases de datos con información de densidad de las maderas de las especies más comúnmente manejadas, la tasa de crecimiento y la biomasa promedio en cada tipo de ecosistema.

⁴⁰ Disponible en el enlace: <http://www.globallometree.org/>

Aunque la utilización de datos promedio podría reducir el nivel de precisión, la cantidad de factores que se considera en el análisis hace que estas herramientas sean completas y tengan potencial para hacer un estimado del flujo de carbono en las operaciones forestales.

Cuadro 8. Calculadoras de carbono para fines forestales

Calculadora	Actividad en la que se puede utilizar	Descripción de funciones	Institución	Accesibilidad y actualización
EX-ACT	AFOLU (distintas actividades agrícolas)	Consiste en una hoja de cálculo Excel que proporciona estimaciones ex-ante de actividades como agricultura de cultivos anuales y perennes, agroforestería, ganadería, y actividades forestales como la conservación, degradación, deforestación evitada y reforestación de las emisiones de GEI. Se basa principalmente en las directrices del IPCC (2006), sobre todo en cuanto a coeficientes de emisión. Una de las principales ventajas de esta calculadora, es que permite estimar de manera simultánea diferentes usos de tierra; muy útil para territorios con ordenamientos de tierra en mosaicos.	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)	Disponible en el enlace http://www.fao.org/tc/exact/en/ . Gratuita. La herramienta y la información complementaria fueron actualizadas en el 2012
CAT AR	Forestación y reforestación	Herramienta de evaluación de carbono, basada en Excel. Alineada con la orientación metodológica de estándares de carbono establecidos, se fundamenta en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto (Heumesser 2014). Contempla información referente al crecimiento en biomasa, densidad de madera, tipo de cobertura original, zona climática, uso de agroquímicos, prácticas silviculturales, uso de combustibles fósiles, etc.	Banco Mundial y CATIE	No disponible en línea Diseñada en 2010
CAT SFM	Manejo forestal	Herramienta de evaluación de carbono para el manejo forestal sostenible, similar a CAT AR (basada en Excel), que puede ser aplicado en áreas bajo manejo en bosques naturales (Heumesser 2014). Considera actividades como conversión del AC a AIR, conversión de bosque aprovechado a bosques protegidos, extensión del ciclo de corta y protección de bosques no aprovechados	Banco Mundial y CATIE	No disponible en línea Diseñada en 2010, actualizada en 2012
TARAM	Forestación y reforestación	Hoja de cálculo Excel que sirve para estimar las reducciones de emisiones de GEI en proyectos forestales del MDL. Permite introducir información básica de un proyecto en fase de diseño, por ejemplo datos de crecimiento de una plantación, y obtener estimaciones de las capturas de carbono que se obtendrán durante cada año de implementación del proyecto, aplicando metodologías aprobadas para el MDL (Universidad Austral de Chile s. f.).	Proyecto BioCarbon Fund del Banco Mundial y CATIE	No disponible en línea
MAIA	Forestal	Programa informático diseñado para el monitoreo de las existencias de carbono en proyectos forestales MDL en los cinco reservorios considerados por el IPCC para bosques (Universidad Austral de Chile s. f.).	Proyecto BioCarbon Fund del Banco Mundial y el CATIE	CATIE y el Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR). No disponible en línea

Calculadora	Actividad en la que se puede utilizar	Descripción de funciones	Institución	Accesibilidad y actualización
CO2Fix	Forestal	Software diseñado para la cuantificación de las existencias y flujos de carbono en bosques, tanto en biomasa como en suelo y en productos maderables, inicialmente con base en datos de rodales monoespecíficos y posteriormente para rodales mixtos y bosques naturales. Cuenta también con un módulo para calcular la rentabilidad financiera de cada escenario analizado (CIFOR 2011).	Proyecto CASFOR	No disponible en línea
CO2Land	Forestal	Programa informático similar a CO2Fix, combina SIG para el cálculo a nivel de paisajes (CIFOR 2011)	Proyecto CASFOR	No disponible en línea
CAMFOR	Forestal	Software que calcula los flujos del carbón asociados a un conjunto de árboles, incluyendo los productos de madera de la cosecha de éstos, considerando los productos sacados del bosque y el decaimiento en un cierto plazo estos materiales (CIFOR 2011)	Oficina del Efecto Invernadero de Australia (AGO)	No disponible en línea

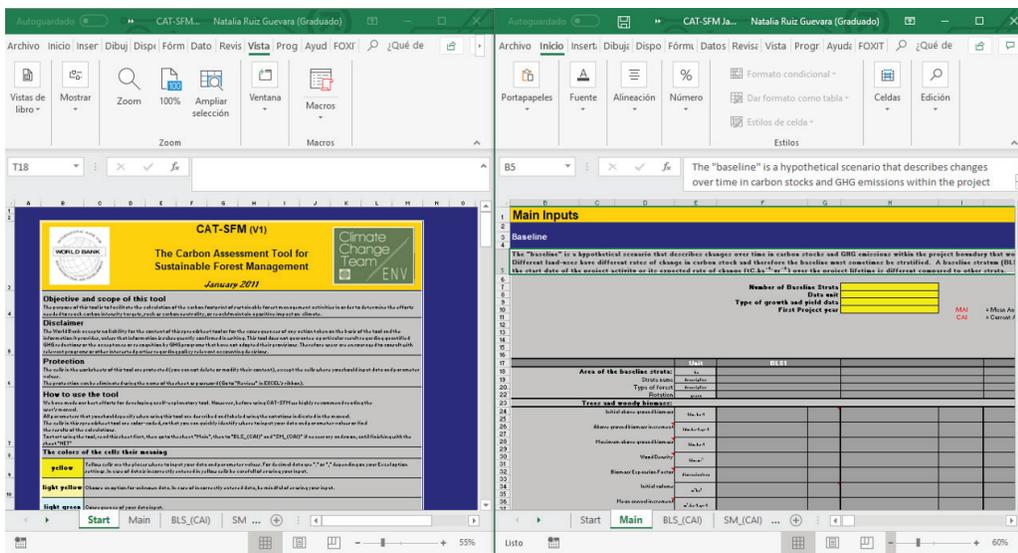


Figura 15. Interfase de la calculadora CAT SFM creada por el Banco Mundial y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza en el programa Excel

Plataforma GlobAllomeTree

GlobAllomeTree⁴¹ es una plataforma web internacional de libre acceso (requiere una inscripción gratuita), creada en el año 2013 por FAO, el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD) y el Departamento de Innovación en Sistemas Biológicos, Agroalimentarios y Forestales (DIBAF) de la Universidad de Tuscia (UNITUS). A través de la colaboración con distintos centros de investigación, se recopilaron ecuaciones alométricas en más de 78 países en todos los continentes y se pusieron a disposición a través de esta plataforma. Este portal permite el acceso a bases de datos de mediciones dasométricas, ecuaciones alométricas, densidad de madera y factores de expansión de biomasa (factor multiplicativo para convertir el volumen comercial o la biomasa a todo el árbol en superficie). En la Figura 16 se presenta una interfase de esta plataforma.

A través de este portal, se tiene libre acceso al software Fantallometrik, diseñado para calcular el volumen de árboles, la biomasa y el carbono, con base en las ecuaciones alométricas de árboles existentes a nivel continental y global. El software está dirigido a organizaciones de investigación, empresas forestales, ONG y otras partes interesadas para mejorar sus evaluaciones mediante la implementación de medidas de control de calidad y la comparación de los modelos existentes. Fantallometrik consta de los siguientes tres módulos complementarios entre sí: a) Comparación de ecuaciones alométricas (proporciona una metodología para comparar las ecuaciones de árboles existentes para una ubicación geográfica determinada), b) evaluación de volumen, biomasa y reservas de carbono (metodología para calcular el volumen, la biomasa, las reservas de carbono y las estadísticas descriptivas asociadas, así como para comparar los datos con los valores predeterminados de la literatura científica) y c) inserción de nuevas ecuaciones (permite a los usuarios enriquecer la base de datos agregando nuevas ecuaciones, las mismas que también se pueden enviar a GlobAllomeTree para su revisión y posible inserción en la base de datos en línea).



■ **Figura 16.** Interfase de la plataforma GlobAllomeTree de la FAO/CIRAD/UNITUS

⁴¹ Disponible en el enlace <http://www.globallometree.org/>

2.3.2. Equipos para la medición de flujos de carbono

El método de cambios en las reservas de carbono es el menos ensayado en sitios forestales, dada la complejidad de la medición, pues implicaría la medición de la respiración de los diferentes componentes de un ecosistema (p.e. suelo, microorganismos, hojarasca, biomasa). Aunque no se haya ensayado aún en áreas bajo manejo forestal con fines comerciales, tecnologías tales como los equipos para la medición de gases y las torres Eddy Covarianza podrían aportar a la medición de los factores que quedan excluidos de la metodología de Pearson.

Equipos para la medición de la emisión de gases del suelo

La medición de flujo de gases del suelo generalmente es realizada con el uso de cámaras cerradas estáticas. Estas son fabricadas de manera local según especificaciones y recomendaciones relacionadas a las condiciones de sitio y al tipo de cobertura, para la toma de muestras y posterior análisis de gases en laboratorio con técnicas de cromatografía (Klein y Harvey 2015). Esta tecnología se considera de bajo costo y tiene la ventaja de que las cámaras son fácilmente transportables, lo que permite muestrear en distintos puntos de una misma área, pero tiene la desventaja de requerir el traslado de las muestras al laboratorio, lo que aumenta la posibilidad de errores en la lectura de gases debido al manipuleo. Otra dificultad es que requiere mayor intervención de operadores si se desea reducir el intervalo entre muestreos (tomar muestras a distintas horas del día) o aumentar el periodo de mediciones (Grace *et al* 2015).

Como alternativa para superar estas limitaciones, en la actualidad se dispone de equipos que facilitan la medición in situ del flujo de gases del suelo. Las casas comerciales Li-Cor⁴² y Gasmét⁴³ (Figuras 17 y 18), por ejemplo, ofrecen equipos portátiles de análisis de gases que pueden ser conectados a las cámaras cerradas mediante conductos que trasladan los gases de la cámara al equipo, en el que se realiza un análisis de absorción del espectro de radiación infrarrojo de los gases presentes en las muestras para determinar su concentración en tiempo real. Otra ventaja de estos equipos es que los datos pueden ser tomados de manera continua durante todo el tiempo que dure la carga de la batería (entre 2 a 20 horas, dependiendo del modelo). La información registrada puede ser transferida a computadoras o teléfonos móviles y ser analizada mediante softwares compatibles (Gasmét *sf*; Li-Cor 2019). La marca Li-Cor, inclusive, ha puesto a disposición un modelo de cámara cerrada para la toma de la muestra, que está diseñada para controlar factores externos como la presión o el viento (Li-Cor 2019).

Equipos más potentes han sido diseñados y puestos a disposición por estas compañías para la toma simultánea de muestras en varios puntos de una misma área (entre 16 y 32 puntos, dependiendo del modelo) y de manera automática por periodos de tiempo que pueden alcanzar varios meses. Esto facilita el análisis de la distribución temporal y espacial de los flujos de gases provenientes del suelo en el área de estudio. Para conocer el precio de los equipos, hay que contactar directamente a los proveedores.

⁴² Disponible en el enlace: https://www.licor.com/env/products/soil_flux/

⁴³ Disponible en el enlace: <https://www.gasmet.com/applications/environment/greenhouse-gases-from-soil/>



■ **Figura 17.** Equipo de medición de flujo de gases del suelo de la marca Li-Cor

Fuente: Li-Cor 2019

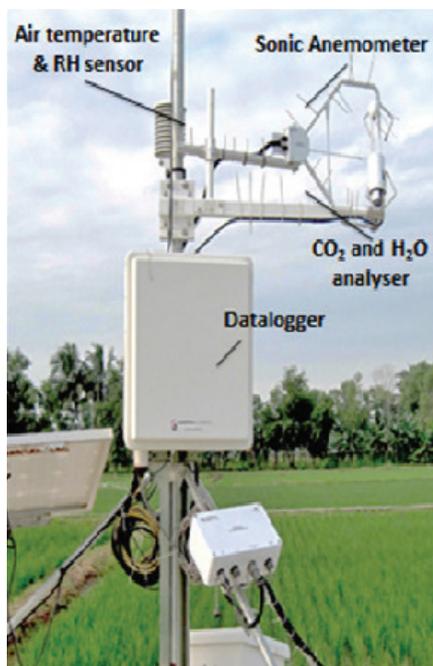


■ **Figura 18.** Equipo de medición de flujo de gases del suelo de la marca Gaset

Fuente: Gaset (s. f.).

Torres Eddy Covarianza para la medición del flujo de gases del ecosistema

Las torres de medición de flujos Eddy Covarianza (Figura 19) son equipos de medición micrometeorológica continua y no destructiva, que miden los gradientes de concentración vertical de gases de un sistema (vapor de agua, dióxido de carbono, metano y óxido nítrico) en la atmósfera, tomando la covarianza de la concentración de estos gases en los remolinos de aire (“eddies”, en inglés) en el punto de instalación de la torre (Kumar *et al.* 2017). A la fecha, su uso ha sido principalmente en ecosistemas naturales sin perturbaciones y en áreas agrícolas; en el caso de bosques, alcanzan alturas hasta por encima del dosel.



■ **Figura 19.** Componentes de una torre de Eddy Covarianza (sensor de temperatura y humedad, anemómetro, analizador de gases y registrador de datos)

Fuente: Kumar et al (2017).

Estos equipos cuentan con un anemómetro que mide la velocidad del viento en tres dimensiones, un termómetro para la medición de temperatura del aire y sensores que miden la concentración de los gases en el aire a diferentes alturas sobre el suelo. Dependiendo del modelo de la torre, estos equipos cuentan con sensores para la medición de radiación, fotoactividad, humedad relativa y el flujo de calor. Además, pueden tener incorporados sensores de humedad y temperatura del suelo instalados a diferentes profundidades entre 0-90 cm y para estimar la cantidad de precipitación diaria. Todos los datos de los sensores se almacenan en el registrador de datos y también en una tarjeta de memoria digital que puede ser reemplazada después de transferir los datos a la computadora (Kumar *et al.* 2017). Los equipos son instalados en estructuras estáticas de materiales duraderos que no están diseñadas para su transporte y reubicación, sino para la toma continua de datos en un periodo de varios años.

Una de las principales características de este equipo es su capacidad para registrar datos con alta resolución temporal (entre 5 y 20 datos por segundo) y de manera continua en el día y la noche, lo que permite relacionarlos con variables meteorológicas de precipitación y temperatura (Kumar *et al.* 2017). Es así que los procesos de fotosíntesis y respiración (y su diferencia, el flujo de carbono), pueden ser relacionados con estos parámetros meteorológicos. Profesionales familiarizados con esta tecnología señalan que estos equipos brindan la posibilidad de entender el comportamiento del ecosistema ante las fluctuaciones del clima. Se estima que los resultados de la toma de datos son representativos para un área circular aproximada de 100 m de radio con centro en el punto de ubicación de cada torre. Resultados pueden variar por factores tales como el tipo de ecosistema, condiciones ambientales o altura de la torre.

Una característica importante es que estas torres miden el flujo de todo el sistema en su conjunto, sin permitir diferenciar fácilmente qué proporción corresponde a sus elementos (árboles, suelo, herbáceas, animales, microorganismos, quema de combustibles de maquinaria, etc.), lo cual constituye una ventaja si el objeto de estudio es todo el sistema productivo, o una desventaja si la información necesita ser separada por componentes del sistema.

El principal inconveniente de la torre de flujo de Eddy Covarianza es su alto costo de adquisición (entre USD50 mil a USD100 mil) y operación, puesto que el manejo de estos equipos requiere una fuente de provisión de energía eléctrica continua, para lo cual se instalan por lo general paneles solares. La operación del equipo requiere de personal con alto nivel de capacitación para la toma diaria de datos y su análisis e interpretación (profesionales a nivel de posgrado), además de la necesidad de contar con un *software* especializado. Estas dificultades hacen que su uso sea muy restringido y en la actualidad se emplee únicamente para fines de investigación.

La aplicabilidad de este método para áreas bajo manejo dependerá de la extensión de estas (es decir, si el tamaño de los claros y sus zonas de influencia son lo suficientemente grandes como para no tener distorsiones por efecto borde). El nivel de error de las mediciones depende de varios factores, como la estabilidad de la atmósfera, la homogeneidad de la vegetación circundante y la pendiente del terreno (mayor precisión y exactitud en terrenos planos), condiciones que necesitan tenerse en cuenta si se desea instalar, por ejemplo, en parcelas permanentes de muestreo de ensayos silviculturales.

Las empresas Licor⁴⁴ y Campbell⁴⁵ son los principales proveedores de los equipos Eddy Covarianza a nivel internacional.

Plataforma FluxData

La plataforma en línea FluxData⁴⁶ es una red colaborativa de bases de datos provenientes de sensores meteorológicos de medición de flujos de gases por la metodología Eddy Covarianza, que están distribuidos en América del Norte, Central y del Sur; Europa, Asia, África y Australia, que permite a los investigadores detectar las tendencias del clima, los gases de efecto invernadero y la contaminación del aire. El sitio web de Fluxdata ofrece además otras herramientas como las plataformas de comunicación e intercambio de ideas, la documentación y el soporte a los usuarios de datos de la red. La suscripción a la plataforma para el acceso a la información es gratuita.

La red global, llamada FLUXNET, surgió de una iniciativa de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA), que data de 1997 y que se empezó a trabajar en 2000. La misma se ha ido expandiendo y armonizando hasta la constitución de la base de datos FLUXNET2015 Database⁴⁷, que reúne información tomada desde 1996. La red global se basa en redes regionales⁴⁸ que abarcan ámbitos transnacionales como por ejemplo AmeriFlux y AsiaFlux, nacionales como MexFlux y ChinaFlux o por bioma como LBA (Experimento a Gran Escala de Biosfera-Atmósfera en la Amazonia). En conjunto, FLUXNET abarca más de 800 sitios con puntos de medición activos e inactivos (bases de datos históricas) y que están dispersos en la mayor parte del espacio climático mundial y biomas representativos. Los datos compartidos por las redes regionales son procesados y armonizados por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. La última actualización del análisis de metadatos y estadísticas fue en febrero del 2017.

⁴⁴ Disponible en el enlace https://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/

⁴⁵ Disponible en el enlace <https://www.campbellsci.com/opec-systems>

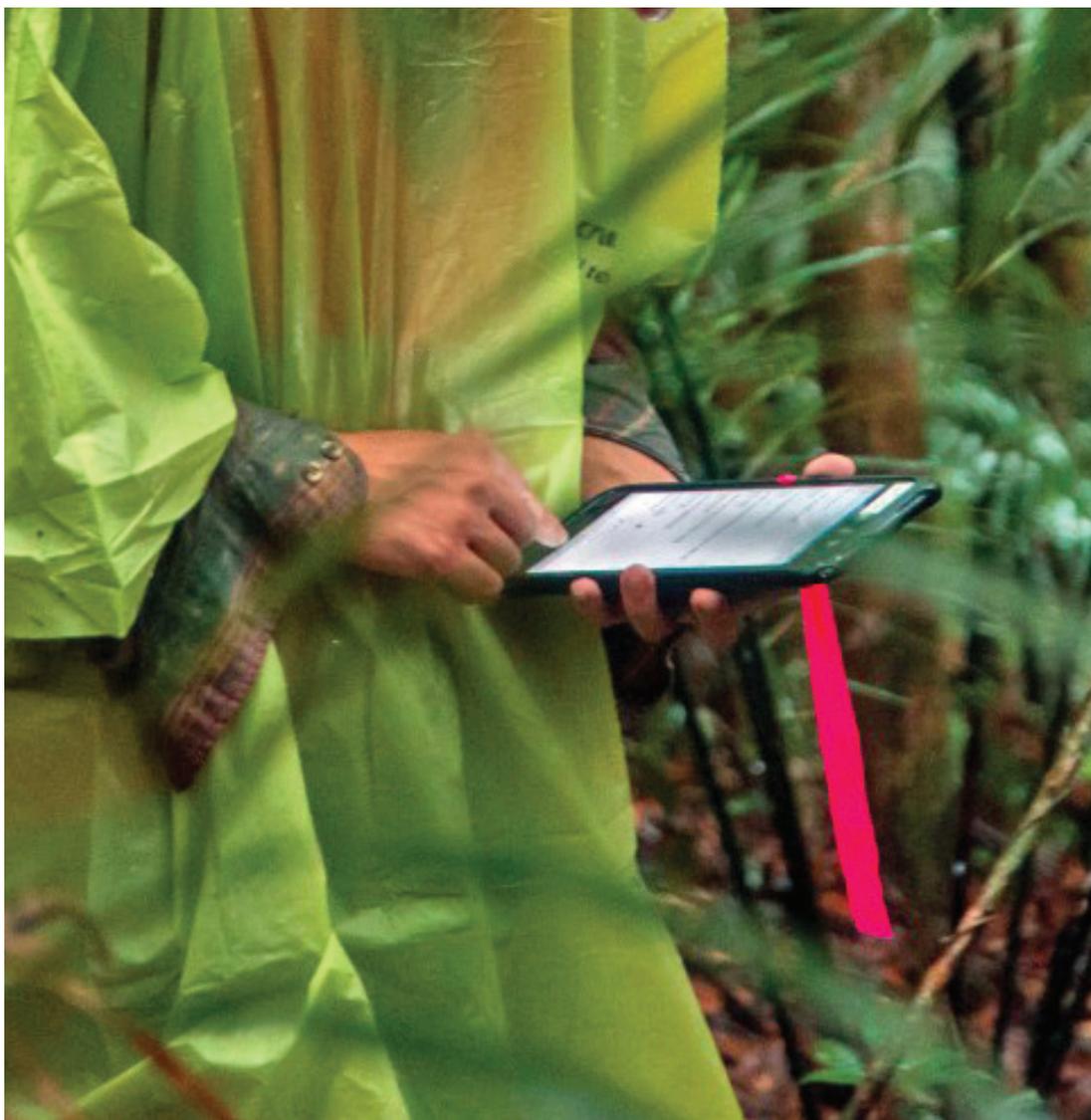
⁴⁶ Disponible en el enlace <http://fluxnet.fluxdata.org/>

⁴⁷ Disponible en el enlace <https://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/>

⁴⁸ AmeriFlux, AsiaFlux, BERMS (Boreal Ecosystem Research and Monitoring Sites), Canadian Carbon Program, CarboAfrica, CarboEurope, CarboItaly, CarboMont, ChinaFlux, EuroFlux, European Fluxes Database (Current database for arboArica), CarboEurope, CarboItaly, EuroFlux, GreenGrass, IMECC, and TCOS Siberia), Fluxnet-Canada, GreenGrass, ICOS (Integrated Carbon Observation System), IMECC (Infrastructure for Measurements of the European Carbon Cycle), IWFLUX (Inland Water Greenhouse Gas FLUX), JapanFlux, KoFlux, LBA (The Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia), MexFlux, NECC (Nordic Centre for Studies of Ecosystem Carbon Exchange), OzFlux, RusFluxNet, Swiss Fluxnet, TCOS (Siberia Terrestrial Carbon Observation System Siberia), Urban Fluxnet, USCCC (US-China Carbon Consortium).

Cada uno de los sitios de toma de datos cuenta con una descripción con información biofísica que incluye características geográficas, vegetación e historia de la ocupación y tipo de uso. Los sitios están agrupados por regiones y vegetación, considerando varios tipos de bosque, pastizales, tierras de cultivo, humedales, arbustos, sabana y otros. Históricamente, la mayor cantidad de sitios de medición han sido instalados en bosques naturales, la mayoría de ellos están en Europa, América del Norte y Asia.

En LAC, la base de datos reporta siete sitios ubicados en bosques tropicales latifoliados siempreverdes, tres de los cuales se encuentran en Brasil (dos en áreas protegidas en la Amazonía y una en un área intervenida), dos en Costa Rica (uno en un área boscosa con ocupación indígena y otro en un área con bosques primarios y secundarios con historial de tala selectiva), uno en México (manglar en la Península de Yucatán, en un área con perturbaciones por huracanes) y uno en Panamá (ubicado en una isla con bosque húmedo tropical). A la fecha estas bases de datos no han sido empleadas con el fin de analizar los flujos de gases en sitios bajo aprovechamiento forestal o para compararlos con los datos provenientes de otras metodologías para la medición de carbono en bosques.



3

Tecnologías para la trazabilidad del aprovechamiento de árboles maderables de bosques naturales

3.1. La trazabilidad forestal en la región de Latinoamérica y el Caribe

La trazabilidad, de acuerdo con la norma ISO 82402, de la Organización Internacional de Normalización (ISO), está definida como “la capacidad para reunir el tejido histórico, la utilización o localización de un artículo o de una actividad por medio de una identificación registrada” (ISO 1994). En el caso del sector forestal, la trazabilidad implica el desarrollo de prácticas, protocolos, procedimientos y sistemas de control definidos que permitan seguir el rastro de los productos forestales desde su origen legal (es decir, desde el bosque o árboles en pie), y a lo largo de la cadena de aprovechamiento, transporte, transformación y distribución hasta el consumidor final (Pacheco 2017), además de



que proporciona información para conocer el destino final del carbono almacenado en la madera proveniente del aprovechamiento de bosques tropicales.

En el bosque, la trazabilidad usualmente implica la georreferenciación de árboles y su marcación con dispositivos que permitan el posterior seguimiento de la madera rolliza sustraída durante las etapas de transporte y transformación. Para esto se han ensayado desde técnicas sencillas como pinturas y placas metálicas, hasta el uso de dispositivos electrónicos como códigos de barras, códigos QR y *chips*. Conforme se avanza en la cadena productiva y los productos se diversifican, la trazabilidad se vuelve más compleja, por lo que es necesario que los actores de la cadena forestal tengan a su disposición soluciones prácticas que faciliten el seguimiento y control. Además, la complejidad del manejo del recurso en términos de diversidad de ecosistemas, especies, tipo de aprovechamiento y tipo de títulos habilitantes, hace que la integración y estandarización de protocolos de trazabilidad a nivel de países, sea una tarea ardua.

3.1.1. Contexto normativo y de mercado para la trazabilidad forestal en Latinoamérica y el Caribe

Los sistemas, metodologías y protocolos de trazabilidad forestal, necesitan estar acordes a los lineamientos de las normativas del sector para cada país. En la mayoría de ellos, los actores de la cadena forestal requieren cumplir también con las exigencias que se imponen en mercados internacionales, bajo la forma de los tratados y convenciones⁴⁹, sobre todo para la madera. Dentro de los mecanismos encontrados para incentivar este cumplimiento, la certificación del manejo forestal en el bosque y de la cadena de custodia en la industria de transformación, han cobrado especial relevancia (Zúñiga Loayza 2010).

El Plan de Acción sobre Aplicación de las Leyes, Gobernanza y Comercio Forestal (FLEGT) de la Unión Europea (UE), presentado en el año 2003, constituye uno de los principales marcos que promueven la certificación y la trazabilidad, tanto con la sociedad civil, como con instituciones estatales y empresas. Este plan propone medidas para mejorar la capacidad de controlar la tala ilegal en los países en vías de desarrollo y en aquellos con mercados emergentes, con lo que pretende reducir el comercio de productos madereros ilegales entre estos países y la UE (Laporte y Vandenhoute 2016).

En el marco de FLEGT se ha impulsado la implementación de acciones para la trazabilidad a través del apoyo en la mejora de la gestión por parte de los países productores, con el desarrollo de sistemas de verificación fiables, fomento de la transparencia, aumento de la capacidad de las agencias gubernamentales y otras instituciones, refuerzo a la ejecución de medidas a través de la mejora de la coordinación entre los organismos reguladores del bosque y la asistencia a las reformas políticas (UE 2004). Los principales mecanismos que FLEGT ha desarrollado para materializar los compromisos de los países productores y compradores son los Acuerdos Voluntario de Asociación (AVA) y el Reglamento de la Madera de la Unión Europea (RMUE). El primero es un acuerdo entre la UE y cada país productor que se comprometa mediante el acuerdo, en el que se garantiza que todos los productos madereros que se señalen cumplen con todas las disposiciones legales y reglamentarias vigentes en el país productor. El segundo persigue la completa eliminación de la madera ilegal en el mercado

⁴⁹ Por ejemplo: la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres y los Acuerdos Comerciales (Tratados de Libre Comercio).

europeo, dando la responsabilidad al sector privado de Europa, de manera que los operadores se aseguren por sí mismos de la legalidad de la madera que importan, a lo que se conoce como diligencia debida (Laporte y Vandenhoute 2016).

3.2. Condiciones habilitadoras, barreras y brechas para implementar tecnologías de trazabilidad de productos forestales en Latinoamérica y el Caribe

En LAC, la capacidad de las autoridades forestales para realizar inspecciones oculares es excedida por las necesidades de fiscalización y control de productos forestales, lo que a su vez dificulta el cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos por los países productores. Ante esto, una alternativa recogida en las más recientes políticas y normativas forestales es la promoción e incentivo a las buenas prácticas de aprovechamiento y trazabilidad forestal, mediante opciones tecnológicas que se adapten al contexto de cada país y faciliten el control de los productos forestales en la cadena de transporte, transformación y comercialización, de manera ágil y costo eficiente. Diversos factores pueden determinar su éxito o fracaso: el costo de los equipos y accesorios, las capacidades humanas e institucionales, el acceso a servicios, el contexto político e inclusive el entorno biofísico, pueden influenciar su adopción o rechazo.

3.2.1. Condiciones habilitadoras para implementar tecnologías de trazabilidad de productos forestales

Uno de los principales factores que habilita el uso de innovaciones tecnológicas para la trazabilidad forestal es la tendencia reciente de las autoridades forestales de los países de LAC de emplear sistemas informáticos para el seguimiento de la cadena forestal, con distintos niveles de sofisticación. Estos sistemas tienen el objetivo de facilitar el control de la cadena forestal, tanto para usuarios como para autoridades, dado que garantizan mayor transparencia que los sistemas convencionales (basados en documentación escrita y dispositivos físicos), a través del uso de bases de datos con información digital, vinculados a tecnologías y dispositivos electrónicos que permiten el manejo más transparente de la información, la agilización de trámites y acceso a la información de los procedimientos administrativos. En su conjunto, esto permite identificar con rapidez el origen legal de los productos, representando una ventaja para la comercialización en mercados donde exigen esto como requisito.

Especialistas en trazabilidad señalan que para que un sistema y protocolos de trazabilidad funcionen adecuadamente, es necesaria la estandarización de los códigos y dispositivos tecnológicos (p.e. *chips*, códigos de barras, códigos QR), a usarse entre los distintos pasos de la cadena y su compatibilidad e integración desde el inventario de campo hasta su transformación final. Para esto es necesario considerar que se precisa alinear metodológica y tecnológicamente a los diferentes actores entre sí, lo que demanda esfuerzos de coordinación, capacitación e implementación y un proceso de adaptación para el reemplazo de los códigos tradicionales hacia tecnologías distintas. Al respecto, la existencia de normativas específicas es un factor que impulsa la tecnificación estandarizada por parte de los distintos actores de la cadena forestal. Países como Panamá o Brasil detallan en su reglamentación

las especificaciones tecnológicas de los equipos y accesorios para el funcionamiento de sus sistemas nacionales de trazabilidad (códigos de barras, *chips*, códigos QR). Otros países como Honduras y Perú no llegan a este nivel de detalle, pero sí incorporan la utilización de sistemas electrónicos que facilitan la recopilación y acceso a la información del origen de los productos forestales. La operatividad (uso efectivo) de estos sistemas depende de la voluntad política, las facilidades administrativas, las condiciones de gobernanza, el financiamiento, el mercado y la accesibilidad de herramientas y dispositivos apropiados (compatibles entre sí, de uso sencillo, accesibles). Estos factores, dependiendo del contexto de cada localidad o país, pueden constituir una barrera para la innovación tecnológica y trazabilidad si son negativos, o una condición habilitadora si son positivos.

Las exigencias por parte de los países compradores de madera son una importante condición habilitadora que impulsa a los actores de la cadena forestal a adoptar prácticas de trazabilidad que involucran innovaciones tecnológicas. Estas exigencias muchas veces llegan a exceder los marcos normativos o las posibilidades de fiscalización de las autoridades forestales de los países productores y por ello, la certificación del manejo forestal y de la cadena de custodia es escogida como el principal mecanismo de mercado para demostrar la legalidad de sus productos. Si bien son mecanismos voluntarios, gozan de aceptación general entre los actores del sector forestal para garantizar a los consumidores finales la legitimidad en los productos forestales, pues está basada en la necesidad de desincentivar la ilegalidad, reducir la deforestación y degradación de los recursos boscosos y garantizar a los consumidores finales la legitimidad en los productos forestales (Laporte y Vandenhoute 2016). La certificación, sin embargo, aplica prioritariamente para los productos de las especies más valiosas comercialmente cuya certificación es exigida (*Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*), e implica procedimientos que son costosos, por lo que el incentivo sólo aplica a los productos cuyo precio de mercado o cuyo volumen de producción sea sostenido, de manera que se compensen los costos de la certificación en una medida suficiente para que sea económicamente viable.

El apoyo financiero de proyectos con financiamiento internacional, tales como los enmarcados en FLEGT (UE), ejerce un rol importante para impulsar la modernización tecnológica y las condiciones habilitantes para su implementación (p.e. políticas, capacidades, gobernanza). De acuerdo a opiniones de especialistas, estos financiamientos tienen la ventaja de ser independientes de las condiciones políticas del país, pero es preciso tomar en cuenta, sin embargo, que estos proyectos pueden estar diseñados de forma tal que no generan sostenibilidad financiera a largo plazo, por lo que las propuestas metodológicas y tecnológicas pierden continuidad una vez terminado su ciclo de vida. Es así que con frecuencia se realizan ensayos piloto de protocolos de trazabilidad que involucran la adopción de innovaciones tecnológicas, que de ser exitosos tienen potencial de réplica.

Otra condición que impulsa la adopción de prácticas y tecnologías de trazabilidad es la necesidad de los empresarios madereros de realizar el control interno de productos y el análisis de rendimientos de las operaciones de aprovechamiento y transformación. Especialistas en certificación señalan que, de manera independiente a cumplir los requisitos de esta, las empresas necesitan monitorear su rentabilidad, por lo que pueden llegar a implementar voluntariamente sistemas de trazabilidad internos, con el uso de herramientas tecnológicas que faciliten estas operaciones.

3.2.2. Barreras y brechas para implementar tecnologías de trazabilidad de productos forestales

La falta de capacidades humanas para el correcto uso de una tecnología puede constituir una barrera para su implementación. Todo proceso de innovación tecnológica necesita estar acompañado por el desarrollo de las capacidades necesarias para que las tecnologías se hagan operativas y cumplan la función que se les ha destinado en la cadena de custodia, lo que en muchos casos puede requerir el soporte de empresas proveedoras de la tecnología, autoridades u organizaciones especializadas y en todos los casos depende de la disposición al aprendizaje del usuario final de la tecnología. Mientras más sencilla de operar sea una innovación tecnológica, mayor será la probabilidad de éxito de su implementación, puesto que el tiempo de aprendizaje será menor, la difusión de los procedimientos de uso será más sencilla y por lo tanto su utilización será más factible para todo tipo de operador en la cadena, tanto en el bosque, como en los puestos de control, almacenes y plantas de transformación.

Para que las prácticas, innovaciones tecnológicas y sistemas de trazabilidad funcionen de manera eficiente, se requiere que todos los actores de la cadena forestal (titulares de los derechos de aprovechamiento, transportistas, transformadores, autoridades), dominen sus protocolos por igual. En tanto no exista una nivelación en las capacidades entre usuarios, intermediarios y funcionarios de las autoridades forestales, existirá un desfase para la operatividad que significa una barrera importante para la trazabilidad. Especialistas señalan que superar estos desfases puede implicar largos procesos de asimilación, que requieren de acompañamiento cercano por parte de las autoridades forestales, las que a su vez, requieren también de un proceso de capacitación a fin de poder operar correctamente las tecnologías. En Guatemala, por ejemplo, el ingreso de datos al Sistema Electrónico de Información de Empresas Forestales (SEINEF) debería estar a cargo de cada titular de derechos de aprovechamiento. Sin embargo, una cantidad importante de actores forestales no cuenta con equipos, servicios de internet o capacidades para ello, por lo que requieren de la asistencia directa de los funcionarios de los puestos de control, lo que genera una sobrecarga de trabajo para estos. El acceso equitativo a procesos de fortalecimiento de capacidades es entonces necesario para la adopción de tecnologías por parte de todos los actores que intervienen en la cadena productiva forestal, desde el bosque hasta la transformación. Diversos esfuerzos de instituciones estatales y ONG se han realizado y han demostrado los beneficios de empoderar a las familias y comunidades para la trazabilidad de sus propios productos forestales, con resultados positivos en el desarrollo de capacidades, sobre todo para titulares de derechos de aprovechamiento y para mujeres. Sin embargo, los recursos para esto también son limitados a proyectos piloto, cuyos resultados generan valiosas lecciones aprendidas que necesitan ser compartidas para el avance de los países y territorios en materia de trazabilidad.

Los testimonios de especialistas de distintos países coinciden en señalar que la disponibilidad limitada a servicios como electricidad e internet en áreas rurales o de difícil acceso es una importante barrera para el funcionamiento de los sistemas tecnológicos que operen con conexión a esta red, lo que demanda soluciones para hacer los sistemas operativos. En Guatemala, para el uso del sistema SEINEF, se ha procurado superar esta barrera con la configuración de modos de ingreso de datos al sistema sin internet, que posteriormente envían la información al sistema cuando se cuenta con la conexión. Además, se intentó dotar de equipos de generación eléctrica con combustible para aquellas localidades en las que la provisión de energía es inestable. Un caso similar ocurre en Brasil, con el sistema Sinaflor (Sistema Nacional de Control del Origen de los Productos Forestales), para el que también se ha desarrollado un modo de operación *offline*.

Las características de los equipos y accesorios empleados para los protocolos, procedimientos y sistemas de trazabilidad pueden afectar o favorecer su propio uso. Equipos de alto costo o muy especializados tienen menos posibilidades de uso masivo o generalizado para el monitoreo de trazabilidad forestal y requieren por lo general del respaldo financiero y acompañamiento técnico por parte de organizaciones interesadas en promoverlos, lo que puede llegar a ser una barrera, más aún si se trata de usuarios del bosque con poca capacidad de inversión. Por ejemplo, especialistas forestales de Honduras relatan el caso de la implementación piloto de un sistema de códigos de barras para monitorear la trazabilidad de productos forestales a cargo de una ONG, para cuya lectura se implementaron teléfonos satelitales configurados para tal fin. La experiencia no prosperó, debido a que el personal de campo desconfiguró los equipos para poder emplearlos como teléfonos, inutilizándolos para la lectura de los códigos de barras, puesto que su reconfiguración implicaba incurrir en altos costos y una complicada logística. Para evitar este tipo de problemas, el uso de aplicaciones para teléfonos móviles de uso común, tienen una alta posibilidad de adopción debido a que son de menor costo, son accesibles en el mercado, son más sencillas de manejar, son compatibles con otras herramientas tales como los códigos QR (Código de respuesta rápida) y los sistemas informáticos y pueden llegar a almacenar una gran cantidad de datos.

3.3. Tecnologías para la trazabilidad de productos forestales

Las autoridades forestales de LAC promueven el uso de una diversidad de materiales, códigos y dispositivos para el marcado de productos forestales maderables. Los sistemas de monitoreo de trazabilidad que existen en la región, por lo general, consideran la fiscalización a cargamentos o lotes completos y se basan en la revisión de los documentos que amparan la movilización legal de los productos forestales (guías de remisión, permisos, guías de transporte), mientras que el método para codificación o marcado sobre los mismos productos por lo general queda a elección de cada titular.

El desarrollo de sistemas informáticos de trazabilidad y certificación ha dado pie al uso de dispositivos tecnológicos para el marcado de árboles y productos forestales, así como para el registro, reporte y verificación de la información. Tecnologías de innovaciones como los códigos QR, los *chips* y las aplicaciones para teléfonos móviles han empezado a difundirse en la región, estando la implementación de la mayoría de ellas en fase experimental o en proceso de adaptación. Los principales dispositivos empleados se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Tecnologías para la trazabilidad de productos forestales maderables

Función	Tipo de tecnología	Ventajas	Desventajas
Marcado y seguimiento de productos forestales	Pintura, placas metálicas y placas plásticas	Bajo costo Su uso no requiere capacitación especializada	El codificado no es necesariamente estandarizado, lo que se requiere en un sistema integrado Lectura y procesamiento de datos manual aumenta la demanda de tiempo de mano de obra y posibilidad de error
	Marquilla forestal	Bajo costo. Su uso no requiere capacitación especializada. Códigos de marcado de los productos estandarizados	Lectura y procesamiento de datos manual aumenta la demanda de tiempo de mano de obra y posibilidad de error
	Códigos de barras	Bajo costo Ingreso de datos estandarizado	Poca capacidad de almacenamiento de datos en comparación a otras tecnologías
	Código QR	Bajo costo Alta capacidad de almacenamiento de datos Existen aplicaciones gratuitas para su lectura	
	RFID	Su lectura es rápida y sin necesidad de contacto visual Se pueden leer en simultáneo una gran cantidad de chips Almacena una gran cantidad de información	Alto costo Requiere de instrumentos de lectura especializados
	Comunicación de campo cercano (NFC)	Precios más accesibles que RFID (pero más alto que códigos de barras y QR) Lectura más confidencial que RFID, proporciona mayor seguridad	Requiere de un sensor especializado para la lectura del dispositivo
	Polvo Stardust	Su uso no requiere de capacitación especializada	Alto costo Solo identifica el origen hasta el título habilitante
	Marcadores moleculares		Alto costo Requiere análisis de laboratorio altamente especializados
Softwares para la transferencia y procesamiento de la información	Aplicaciones para teléfonos móviles	Alta compatibilidad con otras tecnologías La mayoría son de acceso gratuito Uso sencillo.	Fragilidad de los equipos en los que se instalan las aplicaciones
	Sistemas informáticos	Alta compatibilidad con otras tecnologías Permite un control integral de la cadena de custodia	Dependencia de la conexión a redes de internet Requiere capacitación a usuarios

3.3.1. Dispositivos para el marcado de productos forestales

Pintura, placas metálicas y placas plásticas

Los principales materiales empleados para la trazabilidad forestal en LAC son la pintura, las placas metálicas y las placas plásticas. La pintura es un material de bajo costo, que puede ser utilizado desde el inventario hasta la transformación de la madera, pero puede ser fácilmente falsificada haciendo difícil la detección por las autoridades en las operaciones de fiscalización. Las placas metálicas y las etiquetas plásticas (Figura 20) son empleadas por lo general para el inventario de árboles en pie y tienen la ventaja de que pueden transferirse y emplearse en todos los pasos de la cadena de custodia, al transferirse a trozas y madera aserrada. En el caso de las etiquetas plásticas tienen la ventaja de ser más difíciles de falsificar que la pintura, aunque pueden desprenderse con cierta facilidad (Zúñiga Loayza 2010).



■ **Figura 20.** Placa codificada para el marcado de árboles

Fuente: Pacheco (2017)

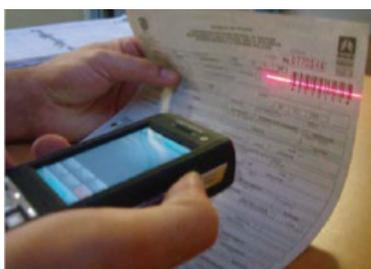
Marquilla forestal

Este dispositivo tiene una marca con un código compuesto de números y letras diferentes para identificar las regiones (p.e. provincias y comarcas) de donde procede la madera, así como el número de permiso que autoriza el aprovechamiento (Espinosa *et al.* s.f.). Las principales desventajas de este dispositivo es que no vincula la madera transportada con el árbol autorizado, por lo que no puede rastrearse su origen real ni emplearse para la trazabilidad de subproductos forestales. En Panamá, el Ministerio de Ambiente estableció la marquilla forestal desde el año 2011 para identificar la madera antes de su movilización. El sistema de trazabilidad panameño complementa el uso de la marquilla con el control basado en documentación en papel, e inscripción de información sobre las piezas de madera que se transportan (Carrera *et al.* 2018).

Códigos de barras

Los códigos de barra están basados en la representación de líneas paralelas verticales de distinto grosor y con diferentes espaciamientos, estampadas en superficies plásticas o de papel, que en su conjunto albergan cierta cantidad de información. Existen dos tipos de códigos de barra: unidimensionales y bidimensionales, ambos necesitan de un escáner laser que decodifica la información para su lectura. Zúñiga-Loayza (2010), señala que son preferibles los códigos de barra bidimensionales ya que pueden contener más información que los lineales (hasta 7000 caracteres).

El uso de los códigos de barra puede aplicar en toda la cadena de trazabilidad, desde la madera en árboles en pie hasta los productos finales en aserraderos o puntos de venta de productos forestales. Entre sus ventajas está su bajo costo y la abundancia de proveedores, lo cual facilita el uso amplio (Montero-Lannegrand 2017). Entre las desventajas de estos códigos está el que no sean capaces de almacenar suficiente información, lo que puede ser un problema dependiendo del objetivo de la trazabilidad (Zúñiga-Loayza 2010). Otra desventaja es que los sensores no pueden leer varios códigos de forma simultánea (solo pueden identificar objetos uno por uno), limitando la velocidad y eficiencia de la lectura. Además, es necesario tener visibilidad directa entre la etiqueta y el lector, por lo que la suciedad o deterioro pueden provocar problemas de lectura (Montero-Lannegrand 2017). Una utilización de esta tecnología se da en los salvaconductos para la movilización de productos forestales en Colombia (Figura 21).



■ **Figura 21.** Lectura de código de barras en documento de transporte forestal en Colombia

Fuente: Pacheco (2017)

Códigos de respuesta rápida (QR)

Los códigos QR son un método de representación y almacenamiento de información en una matriz de puntos bidimensional. Para su uso, se necesita de un generador e impresor de códigos QR, así como de elementos para su lectura, tales como un escáner o una cámara digital funcionando con una aplicación de teléfono móvil (Ordóñez 2012). Su utilización es aplicable a toda la cadena de custodia de la madera (Pacheco 2017), mediante etiquetas impresas adherentes que se pueden colocar sobre los productos o como códigos impresos sobre documentos que amparan su legalidad, tales como las guías de transporte.

Este tipo de códigos almacena una mayor densidad de datos que los códigos de barra tradicionales y su uso puede adaptarse con facilidad a diferentes tipos de datos, pues soportan una múltiple variedad de lenguajes y códigos de caracteres. La lectura de los códigos es sencilla y de alta velocidad y existen aplicaciones de teléfono móvil para su lectura que son gratuitas, aunque no existe la posibilidad de leer varios códigos de forma simultánea (Ordóñez 2012). Al igual que los códigos de barra, en cada país existe una diversidad de proveedores y su costo es relativamente bajo (oscila alrededor de los USD0,5 por etiqueta). Países como Guatemala (Figura 22), Brasil y Panamá incluyen la utilización de este tipo de códigos en sus sistemas nacionales de trazabilidad (Cuadro 10).

inab INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA Y FORESTAL

NOTA DE ENVÍO DE EMPRESA FORESTAL **00000015**
Número Correlativo

Correlativo SEINEF: 0000015

Nombre de la empresa: MEDIOS, S.A. Fecha de emisión: 20/02/15
 Dirección de la empresa: CAR. TAPACHULA, TAPACHULA Fecha de salida: 03/03/15
 NIT: 232049 Nombre del destinatario: MADERAS DE PRUSA, S.A.
 Ciudad del destino: 44001 Dirección del destinatario: CARRETERA A LA ZONA FORESTAL

ESPECIFICACION	UNIDAD	VALOR UNITARIO	CANTIDAD
TRONCOS DE MADERA EN PIE	CM ³	100.000	10.000
MADERA ASERRADA	M ³	100.000	10.000
MADERA EN MADERA (M ³)			10.000

Tipo de Vehículo: TRONCO No de Placa: 2-001

Fecha y sello: _____ Firma y sello: _____
 Nombre de empresa: MEDIOS, S.A. Fecha de recepción: _____

*Este documento es válido solo si se genera electrónicamente en el sistema SIENEFF de la página Web de INAB.
 Antes por favor consulte la publicación de Contabilidad.

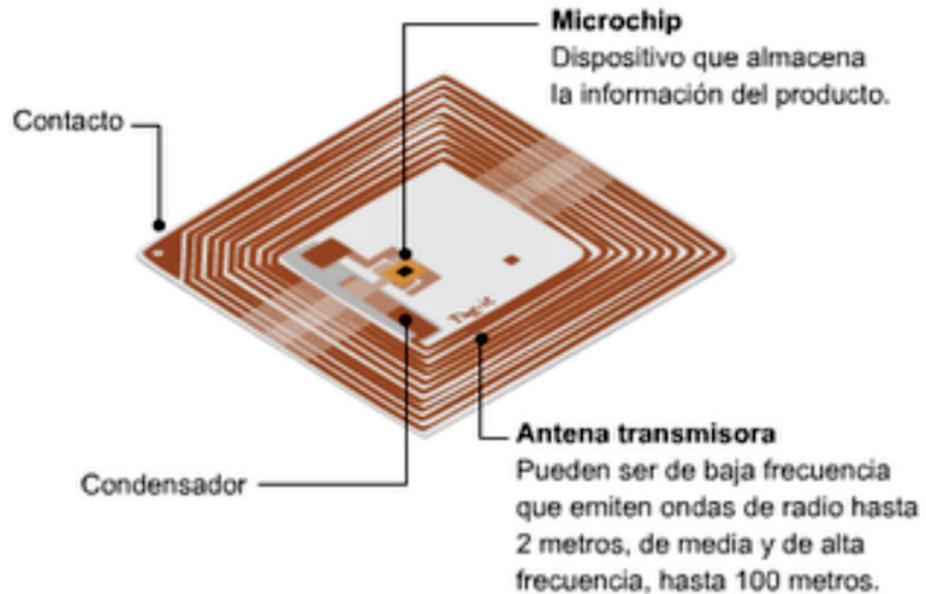
■ **Figura 22.** Uso de códigos QR en notas de envío en el sistema SIENEFF de Guatemala

Fuente: INAB (2018)

Dispositivo de Identificación por radiofrecuencia (RFID)

El RFID es un sistema basado en el uso de tag o chips que permite el seguimiento de un producto en la cadena de trazabilidad, por ejemplo, el registro de la madera desde el árbol en pie en el bosque hasta su llegada al aserradero. Un sistema RFID (Figura 23) consiste en tres componentes: una antena o bobina, un transceptor (con decodificador) y un transponder (llamado también tag o chip) que se programa electrónicamente con información del producto que se está monitoreando (Zuñiga-Loayza 2010), este puede ser un número de identificación único para cada producto (Montero-Lanegrund 2017).

La antena emite señales de radio que activan el chip, permitiendo leer y escribir datos y es el canal entre el chip y el transceptor que controla la recepción de los datos y la comunicación del sistema (Zuñiga-Loayza 2010). Puede ser instalada en los puestos de control para captar los datos de los objetos identificados con chips que pasan por el sitio. La antena y transceptor son adquiridos en conjunto para conformar un lector que puede ser configurado como un colector de mano o un lector fijo para ser conectado a la computadora. El lector emite ondas de radio frecuencia con alcances variados dependiendo de sus características y del chip. Cuando este último pasa a través de la zona del campo electromagnético, es detectada la señal de activación del lector y los datos son transferidos a la computadora



■ **Figura 23.** Estructura de un RFID

Fuente: Adaptado de Montero-Lannegrand (2017)

Existen diferentes tipos de chips: de baja frecuencia (30 a 500 KHz), con un alcance de lectura pequeño, y de alta frecuencia (850 a 950KHz o 2,4 a 2,5 GHz), con un mayor alcance pero de mayor costo. También se pueden clasificar como pasivos (con una capacidad de almacenamiento baja y sin batería incluida) y activos (usualmente con mayor capacidad de almacenamiento en la memoria y batería incluida). De acuerdo con el tipo de memoria, se pueden clasificar en chips de una sola lectura (pueden usarse para escribir y leerse una sola vez, el chip no puede borrarse y regrabarse); múltiples lecturas y una escritura (los datos no pueden borrarse, pero pueden leerse varias veces) y de múltiples lecturas y escrituras (Montero-Lannegrand 2017).

El uso de etiquetas RFID colocadas al momento de la corta de árboles y la carga, pueden asegurar que la madera es de bosques manejados de manera sostenible (Forest World Magazine 2017), existiendo inclusive chips en forma de clavo para evitar que se desprendan de las piezas de madera (Zúñiga-Loayza 2010). Entre las ventajas de esta tecnología está su facilidad de uso en toda la cadena de custodia y que no requiere que los operadores del control forestal estén en contacto directo o visual con el chip para hacer la lectura, además de que permiten lecturas en condiciones adversas y en un promedio de 100 milisegundos. Estos chips almacenan más información que los códigos de barra, se pueden reescribir, se pueden leer a través de diferentes materiales y superficies y soportan ambientes agresivos (Montero-Lannegrand 2017). Además, permiten el almacenamiento de datos sin conexión a internet para su posterior ingreso a un sistema informático en cuanto se cuente con conexión a este servicio.

Montero-Lannegrand (2017) hace referencia a que los RFID son preferibles a otro tipo de tecnología pues dan la posibilidad de leer información a larga distancia y permiten la lectura simultánea de varios chips o tags, lo que reduce el tiempo de lectura y agiliza las operaciones de control. Como resultado se baja el costo en el largo plazo y se hace más eficiente la logística de la trazabilidad. Además, la

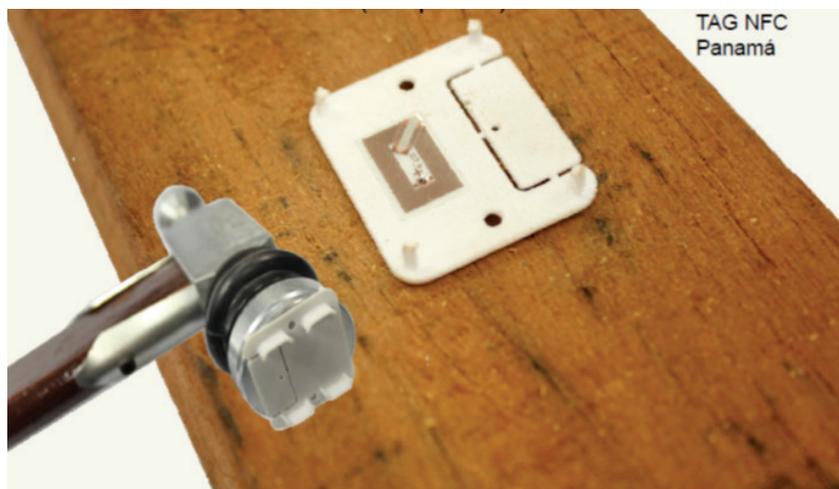
posibilidad de saber en dónde está la madera en cada momento permite abaratar costos y mejorar las rutas logísticas (Forest World Magazine 2017).

Zúñiga-Loayza (2010), señala que la principal desventaja de los RFID es su alto precio en comparación con los códigos de barra. Una recomendación para su implementación es emplear RFID de baja frecuencia para la madera almacenada en patios o aserraderos, mientras que, para la madera transportada, es mucho más útil el uso de chips de alta frecuencia ya que estos ayudarían a reducir el tiempo de paso a través de los sitios de inspección, dependiendo de la afluencia o tránsito por cada puesto de control. Montero-Lannegrand (2017), indica que el precio de esta tecnología se ha ido reduciendo en los últimos años, aunque aún no logra desplazar en su totalidad a los códigos de barra o a los QR.

Comunicación de campo cercano

El NFC es una tecnología inalámbrica de acceso abierto, pensado en sus inicios para dispositivos móviles, que funciona a través de tag o chips de manera similar a la de RFID ya que utiliza inducción de campos magnéticos para comunicarse con otros instrumentos. Estos dispositivos solo pueden ser leídos por los aparatos receptores desde distancias cortas, lo que proporciona confidencialidad en la transmisión de datos, ya que solo permite la comunicación entre los dispositivos con compatibilidad y dificulta el acceso a terceras personas, al acercarse ambos para generar un intercambio de información (Montero-Lannegrand 2017). Entre las ventajas de NFC están: a) ofrece seguridad en el intercambio de información, b) es aplicable a una extensa variedad de áreas, c) es compatible con RFID y tarjetas inteligentes y d) no necesita que los usuarios sepan cómo funciona el sistema (Anaya-Cantellán y López-Martínez, 2014). En el mercado existen etiquetas NFC que en realidad son etiquetas RFID pasivas (sin un sistema de alimentación), las cuales pueden ser leídas por un dispositivo móvil (Montero-Lannegrand 2017).

De acuerdo con Montero-Lannegrand (2017), las etiquetas NFC tienen la ventaja de presentar una alta velocidad de comunicación (casi instantánea) y tener precios relativamente más accesibles (desde menos de USD1 hasta USD4 para las etiquetas de mayor memoria y mayor velocidad de intercambio de información). Además, no necesita ningún tipo de licencia para utilizarse y trabaja con una frecuencia de libre acceso. Este tipo de tecnología ha sido ensayada como piloto en Panamá para el mercado de trozas en el bosque y en patios de acopio, permitiendo el seguimiento a la cadena de custodia forestal (Figura 24) (Pacheco 2017).



■ **Figura 24.** Uso de NFC para trazabilidad de madera en Panamá

Fuente: Pacheco (2017)

Polvo Stardust

Stardust es un polvo con base de cerámica que se rocía en forma de laca o tinta sobre los árboles y permite el rastreo de estos a lo largo de casi todo el sistema de trazabilidad. Se basa en una tecnología de marcadores microscópicos que se aplica bajo la forma de pintura sobre los productos forestales, con nanopartículas que permiten la identificación del origen de una pieza de madera, cuya lectura se realiza mediante scanners (Noguerón 2017). Puede ser utilizado en toda la cadena de trazabilidad, pero solo llega a identificar la unidad de manejo desde la cual proviene la madera, por lo que no genera mucha más información que la legalidad o ilegalidad de la madera. Actualmente, la Fundación Madera Verde está realizando un proyecto piloto de experimentación en Honduras utilizando este producto, con el que se ha llegado a identificar el origen de productos forestales hasta el nivel de título habilitante, mas no de individuo.

Análisis moleculares de ADN

Los marcadores moleculares son regiones del genoma (ADN total), que permiten identificar diferencias dentro de una misma especie (variación intraespecífica) o de especies distintas (variación interespecífica). Para su análisis se requiere tomar muestras de tejidos, extraer el ADN en laboratorio, realizar una tipificación genética y, finalmente, hacer un análisis de datos que permita identificar diferencias entre muestras (Gonzales *et al.* 2015). Este tipo de análisis puede servir para identificar con certeza especies forestales, lo que puede constituir parte de los procedimientos para identificar el origen de productos en la cadena de custodia forestal (Navarro-Gómez 2014).

En Perú se empezó a ensayar esta tecnología para realizar análisis genéticos de especies amenazadas que están contempladas en la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies (CITES), tales como *Swietenia macrophylla* en Perú (Navarro-Gómez, 2014). Aunque este tipo de análisis permite obtener mucha más información que con los métodos convencionales de identificación, se le considera a la fecha un método lento y de alto costo, además de requerir de capacidades especializadas, por lo que aún está en fase experimental. Su uso es más extendido en países compradores de la Unión Europea que buscan controlar el origen de los productos adquiridos.

3.3.2. Softwares para la transferencia y procesamiento de la información

Aplicaciones para dispositivos móviles

En los últimos años, el mayor acceso a las redes de internet y la evolución tecnológica de los teléfonos móviles de uso comercial ha conllevado a la integración de diversas tecnologías a estos dispositivos, con elementos para el acceso a la conexión de internet, transmisión y almacenamiento de datos, tales como WiFi, Bluetooth, GPS, infrarrojo, touchscreen, USB, almacenamiento de información en servidores en línea (p.e. “la nube”) entre otras. Esto facilita la compatibilidad de los teléfonos móviles con una amplia gama de otros dispositivos y equipos que pueden sincronizarse para el intercambio de información, con lo cual se diversifica la gama de servicios a los que puede accederse. Las aplicaciones son programas informáticos que funcionan de manera similar a los programas de computadora, pero adaptados a características tales como el tamaño de pantalla, la capacidad de memoria de los equipos, la movilidad y conectividad, entre otros (Mantilla *et al.* 2014).

Los sistemas nacionales de trazabilidad en Brasil, Bolivia, Guatemala y Panamá usan aplicaciones para teléfono móvil para facilitar y reducir el tiempo de captura de datos en la fiscalización de la cadena de custodia de productos forestales. Estos sistemas son compatibles para la lectura de códigos de barras o QR, que pueden ser leídos por los dispositivos móviles y pueden contar con un sistema *off line* para almacenar información aún sin acceso a internet (Pacheco 2017). Por ejemplo, el sistema de trazabilidad recientemente implementado por MiAMBIENTE, en Panamá, hace empleo de aplicaciones para el ingreso de información de censo vinculado a chips con códigos QR con información para cada árbol y que posteriormente se emplean para la trazabilidad del aprovechamiento y transporte (ITTO 2019).

Además, las aplicaciones para dispositivos móviles permiten vincular la información de los inventarios de madera para su consulta en el momento del control de los productos forestales en el terreno, como es el caso de la aplicación vinculada al sistema de MiAMBIENTE, que integra información geográfica (mapa de dispersión del censo) y permiten una verificación más ágil, tanto de árboles en pie como de trozas transportadas en Panamá (ITTO 2019) y al Sinaflor en Brasil, que actualmente funciona como piloto.

Laporte y Vandenhoute (2016), señalan que las aplicaciones móviles pueden ser empleadas en todas las etapas de la cadena de custodia y citan el caso de Gabón, país en el que se emplea una aplicación gratuita denominada ODK Collect^{®2}, que almacena información desde el bosque, señalando el número de lote, especie, diámetro, transformadores y compradores potenciales. La información suministrada se sube a un servidor gratuito denominado FormHub^{®3} con acceso restringido por contraseña. Otras funciones que pueden apoyarse en aplicaciones para teléfonos móviles son el cálculo de volúmenes de madera transportada en los vehículos que pasan por los puestos de control (aplicación Cubimadera del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia), y la identificación de especies en maderas aserradas con las aplicaciones de lupas digitales (Pacheco 2017).

Entre las principales ventajas de las aplicaciones móviles se tiene que son fácilmente asimilables por los técnicos y personas que manejan bosques comunitarios y parecen ser un soporte tecnológico más accesible, pues no requieren de la compra de equipos especializados (Laporte y Vandenhoute 2016). Una debilidad para su uso está relacionada con la fragilidad del equipo para el trabajo de campo, dependiendo del modelo del teléfono móvil. Además, el personal no acostumbra a hacer una copia de seguridad de los datos cuando se trabaja *off line*, por lo que hay riesgo de pérdida de información entre el momento de capturar la información y el establecimiento de una conexión a internet, lo que puede solucionarse mediante el empleo de funciones de sincronización de datos en espacios de almacenamiento en línea.

El desarrollo de aplicaciones para teléfonos móviles y tabletas como soporte para los procedimientos de trazabilidad de la madera tiene como principal objetivo conferir transparencia sobre las concesiones forestales y permitir que los consumidores finales adquieran madera con garantías de legalidad. Por ello, el desarrollo de estas aplicaciones debe apuntar a convertirlas en una herramienta fácil uso para todo tipo de actor clave de la cadena forestal. Para el concesionario forestal es la oportunidad de demostrar la legalidad del origen de su producto para el mercado consumidor, en particular para los mercados internacionales, como el de Europa y los Estados Unidos, que buscan cada vez más garantizar el origen legal y sostenible de la madera consumida.

Sistemas informáticos de trazabilidad de productos forestales

Los países de LAC han desarrollado sistemas informáticos integrados para facilitar el seguimiento y monitoreo de productos forestales maderables por parte de autoridades que tienen entre sus funciones supervisar la trazabilidad de los productos forestales. Las diferentes situaciones y contextos que se presentan en cada país han influenciado el éxito con el que cada administración ha logrado poner en funcionamiento sus sistemas, así como la diversidad de funciones que se puede atender a través de ellos. Es así como, en algunos países, el sistema tiene el rol de ser una plataforma de reporte por parte de los usuarios y, en otros, se ha llegado a automatizar los protocolos de trazabilidad en los diferentes pasos de la cadena productiva.

Dentro de la región, países como Brasil, Bolivia, Guatemala y Panamá (Cuadro 10) han diseñado e implementado sistemas de trazabilidad. Estos sistemas se caracterizan por el empleo de códigos de respuesta rápida QR, que facilitan la transparencia y simplifican los protocolos de control, en combinación con el uso de aplicaciones para teléfonos celulares o móviles para su lectura con sistemas informáticos que compilan los datos de trazabilidad en cada paso de la cadena y generan los reportes y documentos legales necesarios. Esto mismo está propuesto para el Sistema de Aseguramiento de la Legalidad de la Madera de Colombia, que aún no ha sido implementado (Moreno-Orjuela *et al.* 2017) y que enfrenta actualmente el desafío de integrar los sistemas de trazabilidad regionales en uno solo.

Los sistemas nacionales de trazabilidad encontrados en el presente estudio y su forma de funcionamiento son presentados en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Sistemas de trazabilidad forestal en Latinoamérica y el Caribe

País	Nombre del Sistema	Institución a cargo	Descripción de funcionamiento y tecnologías asociadas	Innovaciones tecnológicas asociadas
Brasil	Sistema de Cadena de Custodia (SCC)	Servicio Forestal Brasileño (SFB)	Consta de un conjunto de procedimientos para el rastreo de productos provenientes de las concesiones forestales del país, a partir del registro del inventario forestal (titulares registran la información de todos los árboles). La información se contrasta en las inspecciones y el monitoreo del transporte de la madera del bosque a la industria, hasta la primera transformación. Para cada etapa se genera un código QR, que aparece en cada documento que se supervisa. Al llegar al aserradero, la madera se coloca en paquetes o fardos y se le asigna un código QR. Así, al consultar los códigos generados, el sistema rescata automáticamente qué árboles dieron origen a la madera consultada y genera un mapa con las coordenadas geográficas de esos árboles. Como soporte tecnológico, se ha desarrollado una aplicación para teléfonos móviles y tabletas para la lectura de los códigos (SFB 2018). La información registrada se contrasta con verificaciones oculares en campo y el procesamiento de imágenes de satélite LANDSAT y SENTINEL, imágenes LiDAR y fotografías tomadas con drones.	Códigos QR SIG Aplicaciones para dispositivos móviles Imágenes Landsat y Sentinel LiDAR Fotografías tomadas desde drones
	Sistema Nacional de Control del Origen de los Productos Forestales (Sinaflor)	Instituto Brasileño del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (Ibama)	Diseñado para el control de los productos o subproductos forestales que están bajo la supervisión de Ibama (no concesiones forestales). Integra información legal y geográfica (bajo la forma de <i>shapefile</i>) de propiedades rurales (provenientes de un catastro), de los inventarios forestales en cada predio (se registra información de identificación, volumen y otras variables para cada árbol), de las autorizaciones de explotación y de transporte y almacenamiento de productos forestales (documento de origen forestal - DOF), que sirve para el monitoreo hasta el consumidor final. Se deben registrar todas las personas físicas y jurídicas poseedoras de emprendimientos que tengan como actividad la explotación de productos y subproductos forestales, quienes deben cargar los datos correspondientes a sus respectivos proyectos, incluyendo el plan de manejo forestal sostenible (PMFS), autorización de supresión de vegetación (ASV), explotación del bosque plantado, entre otros. Durante el 2019 se estaban desarrollando aplicaciones para dispositivos móviles a ser integrados dentro de Sinaflor	SIG Software en línea Aplicaciones para dispositivos móviles
Surinam	LogPro	Fundación para la Gestión Forestal y la Supervisión Forestal (SBB)	Se desarrolló inicialmente como una de base de datos, pero gradualmente se convirtió en un sistema totalmente integrado a información geográfica, con cuatro módulos: Módulo de Planificación de la Producción, Módulo de Control de Producción, Módulo Financiero y Módulo de Gestión de Sistemas. Proporciona información para gestionar procedimientos administrativos, como el procesamiento de diferentes formularios con datos de producción y estadísticas para hacer una planificación a largo plazo de la política forestal (SBB 2010). Al 2019, se estaba creando un sistema más robusto que integraría una nueva plataforma en línea, visores espaciales de las explotaciones forestales y aplicaciones móviles, todo para uso de instituciones de gobierno, comunidad y empresas madereras.	SIG
Guatemala	Sistema Electrónico de Información de Empresas Forestales (SEINEF ⁵⁰)	Instituto Nacional de Bosques (INAB)	EL SEINEF funciona integrado con el Registro Nacional Forestal, por lo que requiere que los usuarios estén inscritos para la generación de las notas de envío de los productos extraídos del bosque para su transporte y transformación. El sistema permite generar de manera automática estos documentos, con la impresión en un formato único de notas de envío de productos forestales, que tienen un código QR que facilita la inspección en los puestos de control forestales, a través de aplicaciones en teléfonos móviles (INAB 2018).	Códigos QR Aplicaciones para dispositivos móviles Software en línea

50 Disponible en línea en el enlace <http://seinef.inab.gob.gt/>

País	Nombre del Sistema	Institución a cargo	Descripción de funcionamiento y tecnologías asociadas	Innovaciones tecnológicas asociadas
Panamá	Sistema de Trazabilidad y Control Forestal de Panamá ⁵¹ (SCTF)	Ministerio de Ambiente	Está compuesto por tres elementos: a) etiquetas de identificación de color azul con chips (NFC) y código QR para la identificación y registro de los árboles del inventario (semilleros y aprovechables); estas etiquetas deben permanecer en los tocones, una vez talado el árbol; b) etiquetas de identificación de color amarillo con código QR para la identificación y registro de los productos derivados del aprovechamiento de los árboles autorizados por especie (trozas, cubos o madera aserrada en bosque), y c) una plataforma virtual para aplicaciones en dispositivos móviles y web, tanto para la gestión del aprovechamiento forestal como para la fiscalización (Ministerio de Ambiente de Panamá 2018)	Chips NFC Códigos QR Software en línea
Bolivia	Sistema Boliviano de Certificación de Bosques e Incentivos (SBCBI) ⁵²	Autoridad de Bosques y Tierra	Integra dos sistemas: un sistema nacional de certificación y trazabilidad de manejo forestal en bosque con base en el programa informáticos Kaa-lya y un sistema de trazabilidad digital de industria y mercado (Sitepap) que tiene por finalidad registrar la información del movimiento de madera en cada uno de los procesos. El sistema tiene un estándar de principios, criterios e indicadores para evaluar el desempeño de cada empresa forestal y un código de evaluación semáforo (verde para la mejor puntuación, amarillo para la intermedia y rojo para el desempeño más bajo). De acuerdo con la Autoridad de Bosques y Tierra (2014), el sistema en bosques debería incluir innovaciones tales como el censo de árboles con chip, trozas con código de barras y un aplicativo para teléfonos Android que faciliten la supervisión, pero esto aún no ha sido reglamentado.	Chips Código de barras Aplicaciones para teléfonos móviles
Perú	Sistema Nacional de Información Forestal y de Fauna Silvestre (SNIFFS)	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (Serfor)	El sistema de trazabilidad involucra a Serfor en los primeros pasos de la cadena y, posteriormente, a otras instituciones de fiscalización y control de productos forestales y del comercio interno y externo (Ministerio de Producción, el Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre y la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria). El control de trazabilidad se realiza a través de documentos como la guía de transporte forestal (bosque, transporte y transformación primaria), los libros de operaciones (bosque, transformación primaria y secundaria), las guías de remisión y los permisos de exportación. El módulo de control del SNIFFS fue diseñado para la gestión de información de títulos habilitantes que conlleve a la verificación del origen legal de la madera aprovechada e integra información de los títulos habilitantes y de las guías de transporte forestal. A través del sitio web del módulo, se puede acceder a un software en línea de Emisión y Registro de Guías de Transporte Forestal, en el que los titulares en conjunto con la autoridad forestal, registran sus inventarios forestales y existencias en plantas de transformación primaria para su posterior aprobación por parte de la autoridad. Luego de ello, cada titular procede a la emisión estandarizada de guías de transporte. Además, está disponible un software en línea para la inspección y registro de guías de transporte forestal y de títulos habilitantes y documentos de gestión, en los que se puede hacer un seguimiento del recorrido de las guías (Serfor s.f.).	Software en línea
Honduras	Sistema para el Rastreo de la Madera (Sirma) ⁵⁴	Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal (ICF)	Diseñado como un sistema único que facilite la gestión y la trazabilidad. Requiere la inscripción de usuarios y los registros se hacen a través de una herramienta Excel descargable en donde se ingresan datos de inventario, ingresos de madera por guías, facturas e importaciones, así como los volúmenes en producción, transformados y las salidas de productos maderables. Esta información se carga en el sistema de manera diaria o mensual; el mismo procesa la información de manera automática. Sirma también genera reportes informativos y estadísticas.	Software en línea

51 Disponible en línea en el enlace <http://www.animalltag.com.br/trazabilidadforestal/panama/>

52 Disponible en línea en el enlace <http://usi.abt.gob.bo:82/Certificacion/sistema/login.php>.

53 Disponible en línea en el enlace <https://www.serfor.gob.pe/modulos-sniiffs/modulo-de-control>

54 Disponible en el enlace <http://sirma.icf.gob.hn/>

4

Reflexiones finales y recomendaciones

4.1 Respecto al monitoreo de impactos del manejo forestal, el flujo de carbono y el uso de tecnologías

La mayoría de los recursos, sistemas e innovaciones tecnológicas están actualmente dedicados a monitorear el cambio de uso de las tierras forestales y avance de la deforestación. El monitoreo posterior al aprovechamiento forestal en bosques manejados, en cambio, no es abordado de manera sistemática por parte de la gran mayoría de usuarios del bosque y autoridades, y ha sido concebido más como una obligación para el cumplimiento de estándares de certificación forestal, no generando de manera consistente información útil para la toma de decisiones en la mayoría de las áreas bajo manejo de la región de LAC.

En los países tropicales de LAC existen pocas experiencias de monitoreo silvicultural a largo plazo en bosques manejados, que estén a cargo de instituciones de investigación o de usuarios del bosque con interés particular en esta temática. Algunas de estas experiencias son las concesiones comunitarias de Petén en Guatemala, el sistema CELOS en Surinam y los experimentos silviculturales de CATIE en Costa Rica. Publicaciones recientes de resultados de ensayos a largo plazo, dan indicios de la importancia del manejo forestal y el AIR para la mitigación de impactos y de emisiones de GEI provenientes de la actividad forestal, lo que evidencia la necesidad de difundir entre los actores forestales la importancia económica, ecológica y sociocultural de este tipo de monitoreos y de asumir compromisos para su continuidad. Estas publicaciones aún son pocas, por lo que se recomienda fomentar la sistematización y socialización conjunta y/o coordinada de las lecciones aprendidas de los demás sistemas silviculturales monitoreados en países como Surinam, Bolivia, Guatemala, Brasil y Costa Rica, de modo que se incentive la implementación de más redes de PPM que puedan generar información sitio-específica útil para la toma de decisiones y para la incidencia en las políticas nacionales e internacionales que rigen en el sector. Actualmente y ante la existencia de innovaciones tecnológicas como sensores remotos de alta resolución, plataformas en línea de análisis geoespacial o aplicaciones para dispositivos móviles, se recomienda también que se replanteen los procedimientos metodológicos para este tipo de ensayos con base en las lecciones aprendidas en la región y un análisis de las ventajas y desventajas de cada tecnología.

Los resultados del presente estudio revelan que hasta el año 2019, no existen acuerdos explícitos entre los países e instituciones respecto a procedimientos metodológicos y tecnológicos para el monitoreo del manejo forestal. En la actualidad, predominan los métodos tradicionales de toma de información (observación ocular, uso de cintas métricas, toma de datos en libretas de campo). En años recientes, sin embargo, se han desarrollado ensayos del uso de innovaciones tecnológicas que pueden integrarse, potenciarse, adaptarse y replicarse. Dentro de estos, la programación y uso de aplicaciones digitales para teléfonos móviles y tabletas destaca como una innovación de alto potencial debido a su bajo costo, facilidad de difusión, su compatibilidad con diversas funciones y la sencillez de uso.

Se recomienda que centros de investigación, autoridades forestales y demás organizaciones de actores interesados en desarrollar aplicaciones para dispositivos móviles de usos forestales en bosques manejados, procuren crear *softwares* de uso múltiple. Se propone que existan aplicaciones con módulos para el registro geográfico de árboles y parcelas, cálculo de volúmenes de aprovechamiento, de indicadores económicos y, además, el registro de indicadores de impacto del aprovechamiento forestal *in situ* (de manera similar a como opera el SCC de Brasil). Esto último podría incluir, por ejemplo, la estimación de áreas de claros, la afectación a vegetación remanente, la estimación de emisiones de carbono de acuerdo con metodologías como la propuesta por Pearson *et al.* (2014), la evaluación de regeneración natural, etc. La vinculación de la información ingresada a las aplicaciones con bases de datos digitales permitiría que el uso de las mismas sea sostenido en el tiempo y las evaluaciones se puedan realizar de manera periódica y a largo plazo, tal como lo demandan los ciclos forestales de bosques naturales. Se recomienda también retomar el uso de calculadoras de carbono para usos forestales, bajo la forma de aplicaciones para teléfonos móviles, así como la adaptación del *software* Fantallometrik (disponible en la plataforma GlobAllomTree), de manera que se pueda difundir su uso entre más tipos de usuarios y actores de la cadena forestal.

El desarrollo tecnológico de los sensores remotos en los últimos años proporciona recursos valiosos para el monitoreo y vigilancia forestal. En particular, el uso de sensores LiDAR, fotografías aéreas tomadas desde drones e imágenes satelitales de alta resolución son una alternativa tecnológica con potencial para brindar información del estado de los recursos boscosos en zonas remotas, inseguras o demasiado extensas, que involucren dificultades para el ingreso periódico de personal de campo, lo que, sin embargo, se ve limitado por el alto costo de adquisición de estos equipos e imágenes. La coordinación entre actores del mismo territorio, a través de plataformas de gobernanza para la colaboración, es una opción recomendada para el intercambio y sinergia. Se recomienda la adquisición colectiva de imágenes satelitales entre diferentes instituciones y organizaciones que tengan interés en el monitoreo y vigilancia de áreas grandes. Aunque existen estudios que ensayan el cálculo de biomasa y reservas de carbono en bosques con estas herramientas, aún no se cuenta con suficiente certeza de que este tipo de recursos pueda brindar información exacta para la toma de decisiones silviculturales, o sobre el impacto de las operaciones forestales en los flujos de carbono, aunque se ha demostrado su potencial para el control y la trazabilidad. En ese sentido, se recomienda fomentar la investigación y realizar análisis comparativos de costos y precisión entre el uso de estas tecnologías y el monitoreo tradicional con personal de campo.

La experimentación tecnológica y la instalación de PPM para el monitoreo de sistemas silviculturales es costosa, lo que constituye una dificultad para su implementación, siendo uno de los motivos por los que su instalación es poco frecuente. Se recomienda, como alternativa, el fomento de alianzas público-privadas para generar oportunidades de investigación en áreas bajo manejo forestal (concesiones, áreas privadas, áreas comunales), de manera que se facilite la logística y se asegure la vigilancia de las áreas bajo monitoreo. Esto abriría oportunidades para la generación de información fundamental para la toma de decisiones sobre los territorios, la generación de empleo y el fortalecimiento de capacidades para la población que depende de los bosques, de manera que se contribuya a su bienestar.

De manera complementaria, se recomienda que los sistemas nacionales de vigilancia incorporen de manera progresiva y sistemática procedimientos para la detección temprana de tala ilegal. Hasta el momento esto se ha hecho de manera experimental o piloto, con resultados que demuestran que el uso de imágenes satelitales de alta resolución (constelación DigitalGlobe) y fotografías tomadas desde drones son útiles para la identificación de operaciones madereras no autorizadas. Para esto, es necesario que los lineamientos de políticas consideren que el aprovechamiento forestal ilegal, pese a que no involucra un cambio de uso de la tierra, es potencialmente un importante factor de degradación que atenta contra el uso sostenible de los recursos boscosos, distorsiona el mercado nacional de la madera y genera emisiones de carbono que no se pueden contabilizar. Para la priorización de zonas a monitorear, resulta útil el uso de tecnologías de teledetección con imágenes satelitales gratuitas de resolución media (Landsat, Sentinel). Para esto, plataformas de libre acceso como Global Forest Watch, Google Earth, y Google Earth Engine, pueden resultar útiles. Luego de priorizar zonas, la inversión económica en el uso de imágenes satelitales de alta resolución o de fotografías aéreas mediante drones estaría justificada para el análisis a un mayor nivel de detalle.

Sobre el tema de flujos y reservas de carbono en áreas bajo manejo forestal, los esfuerzos e incentivos existentes se han centrado más en evitar el incremento de áreas bajo cambio de uso de la tierra y los principales estudios están dirigidos a calcular las reservas de carbono en áreas boscosas en comparación con áreas de no bosque.

4.2. Respecto a las tecnologías para la trazabilidad de la madera

La trazabilidad de los recursos forestales goza de un ambiente internacional favorable en cuanto a incentivos provenientes de los mercados de productos certificados y de acuerdos internacionales de comercio. Sin embargo, las características de los recursos forestales tropicales y sus productos derivados (alta diversidad de especies, producción en zonas remotas, dificultades en las cadenas de transporte y el registro, etc.), generan limitaciones para la estandarización e implementación de procedimientos a lo que se suman las dificultades para el financiamiento, la generación de capacidades y el acceso inequitativo a servicios por parte de los diferentes actores forestales, tales como los titulares de derechos de aprovechamiento y las autoridades forestales de los niveles central y regional.

En los últimos años, los proyectos piloto y los programas de actualización de procedimientos y sistemas de trazabilidad en diferentes países de LAC han generado lecciones aprendidas (tecnologías, capacidades, estrategias para la implementación de sistemas), que son necesarias de visibilizar y compartir, puesto que, ante la necesidad de atender los desafíos propios de cada localidad, han surgido interesantes estrategias para superar barreras como las limitaciones de internet en zonas alejadas o las diferencias de capacidades entre actores de una misma cadena forestal. Se recomienda, por lo tanto, dar continuidad a estas iniciativas, replicarlas en distintos territorios y organizar eventos de intercambio de experiencias en los que se recojan tanto las perspectivas de las autoridades y funcionarios forestales encargados de los puestos de control, como las de los titulares forestales y las demás instituciones y organizaciones. Las experiencias de los sistemas de trazabilidad privados de concesionarios y empresas forestales también han generado enseñanzas que pueden aportar a la construcción colectiva de sistemas de trazabilidad adaptados a las necesidades de las cadenas productivas forestales de los países de la región, por lo que se recomienda recoger estas experiencias también.

Básicamente, la trazabilidad forestal en un país implica cuatro componentes: a) el monitoreo de las operaciones de corta y arrastre, b) el monitoreo de la transformación primaria y secundaria, c) el monitoreo del transporte y d) la integración de estos en un sistema general para la gestión, ya sea este estatal (si se trata de recursos naturales que forman parte del patrimonio nacional), o privado (si se trata del ámbito de la gestión de empresas forestales). Conforme se avanza en la cadena productiva, las operaciones se diversifican y se vuelven más especializadas y complejas, con lo que la trazabilidad enfrenta más desafíos. Para abordarlos, los procedimientos y las innovaciones tecnológicas necesitan ser al mismo tiempo eficaces, costo-eficientes y sencillos de implementar, buscando en lo posible una mayor estandarización de códigos y de dispositivos, de manera que un mismo procedimiento de trazabilidad se pueda aplicar a una mayor cantidad de etapas de la cadena productiva. En este contexto, las aplicaciones para teléfonos móviles destacan entre las innovaciones tecnológicas con mayor potencial para contribuir a los sistemas de trazabilidad. Se recomienda también el desarrollo de aplicaciones multiuso, que integren funciones como la cubicación de madera, la identificación de las principales especies comerciales, el registro y control de la extracción y movilización de productos, la lectura de códigos y dispositivos de trazabilidad (códigos QR), entre otros.

Los códigos QR, ya sea impresos sobre los documentos que ampara la legalidad (guías de remisión, notas de envío, etc.), o sobre chips y etiquetas que se colocan sobre los productos forestales, son una de las alternativas tecnológicas más destacadas debido a su bajo costo, su capacidad para almacenar gran cantidad de información, su facilidad de uso (que reduce los tiempos en el control forestal) y su compatibilidad de lectura a través de aplicaciones de teléfonos móviles.

Como señalan los especialistas en la materia, la efectividad de todo sistema de trazabilidad depende de la buena fe, la voluntad y la coordinación entre los actores clave que lo implementan y participan de él, ya sea que este se base en innovaciones tecnológicas como chips, códigos QR o en elementos tradicionales como marcas, pinturas y registros manuales. En todos los casos, se recomienda que los lineamientos de las autoridades exijan o fomenten la estandarización de los códigos de marcado de los productos forestales, indicando como mínimo información referente al área geográfica, identificación del permiso de aprovechamiento, especie forestal, año de cosecha y, de ser posible, número de parcela de corta o de árbol.

4.3. Recomendaciones generales sobre la implementación de innovaciones tecnológicas

La implementación de una innovación tecnológica, como piloto o como lineamiento normativo, demanda de un proceso de asimilación que requiere del desarrollo de capacidades. La cadena productiva forestal se caracteriza por tener una diversidad de actores clave, con diferentes características y es necesario que estas diferencias sean consideradas para que estos procesos sean exitosos. Ello involucra considerar no solo las diferencias entre autoridades forestales, titulares de derechos de aprovechamiento, empresarios, entre otros, sino también las necesidades diferenciadas de acuerdo con género, etnia y grupo etario para que el acceso a la tecnología sea equitativo y efectivo.

Las condiciones de gobernanza de los territorios pueden constituir factores habilitantes o barreras para la implementación de nuevas tecnologías. Se recomienda también que toda propuesta de innovaciones tecnológicas esté acompañada de un análisis detallado de la dinámica entre actores clave de la cadena forestal y de los actores secundarios que tienen influencia sobre ella, de modo que se eviten o aborden desafíos tales como la desconfianza entre actores claves, conflictos y duplicidad de esfuerzos, entre otros.

Referencias bibliográficas

- Achard, F; Beuchle, R; Mayaux, P; Stibig, H-J; Bodart, C; Brink, A; Carboni, S; Desclée, B; Donnay, F; Eva, H; Lupi, A; Rasi, R; Seliger, R; Siminneti, D. 2014 Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010 *Global Change Biology*. 20 2540–2554
- Agroterra. 2019. Forcipula Electronica Haglof “md-li” 800Mm (en línea, sitio web). Consultado 26 mar 2019. Disponible en <https://www.agroterra.com/p/forcipula-electronica-haglof-md-ii-800mm-3144541/3144541>
- Anaya-Cantellán, A; López-Martínez, I. 2014. La tecnología NFC en teléfonos celulares, sus retos y aplicaciones. *Research in Computing Science* 77:97-107.
- Ancira-Sánchez, L; Treviño Garza, E. J. 2015. Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques* 21(1): 77-91.
- Andersen, HE; Reutebuch, SE; McGaughey, RJ; D’Oliveira, MV; Keller, M. 2014. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. *Remote Sensing of Environment* 151:157-165.
- Argotty, F; Fung, E; Imbach, P; Medellín, C; Carrillo, O; Larios, E; Islas, G; López, D; Muñoz Maldonado, M. 2019. Estado del monitoreo forestal en Latinoamérica y el Caribe. Tipos de iniciativas y uso de tecnologías. Nota técnica del BID 1690. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 85 p.
- Asner GP; Keller, M; Pereira. R; Zweede, JC. 2002. Remote sensing of selective logging in Amazonia: assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM1, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment* 80:483–496.
- Asner, GP; Keller, M; Silva, JNM. 2004. Spatial and temporal dynamics of forest canopy gaps following selective logging in the eastern Amazon. *Global Change Biology* 10:765–783.
- Autoridad de Bosques y Tierra. 2014. Sistema Boliviano de Certificación de Bosques e Incentivos (SBCBI). Consultado 6 dic. 2018. Disponible en <https://sioc.minagricultura.gov.co/Forestal/Documentos/005%20-%20Documentos%20T%C3%A9cnicos/Sistema%20Boliviano%20de%20Certificaci%C3%B3n%20de%20Bosques%20e%20Incentivos.pdf>
- Axel, C; van Aardt, JA; Aros-Vera, F; Holguín-Veras, J. 2016. Remote sensing-based detection and quantification of roadway debris following natural disasters. *Laser Radar Technology and Applications XXI*. Consultado 15 nov. 2018. Disponible en <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9832/1/Remote-sensing-based-detection-and-quantification-of-roadway-debris-following/10.1117/12.2223073.short>
- Baccini, A; Goetz, SJ; Walker, WS; Laporte, NT; Sun, M; Sulla-Menashe, D; Hackler, J; Beck, P; Dubayah, R; Friedl, M; Samanta, S; Houghton, RA. 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change* 2(3):182–185.
- Barreto, P; Amaral, P; Vidal, E; Uhl, C. 1998. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108:9–26.
- Bertault, J-G; Sist, P. 1997. An experimental comparison of different harvesting intensities with reduced-impact and conventional logging in East Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 94:209-218.
- Bholanath, P; Dewnath, N; Singh, J. 2013. Developing a monitoring, reporting and verification system for REDD+ in Guyana. *In* Mora, B; Herold, M; De Sy,V; Wijaya, A; Verchot , L; Penman, J (eds.). *Capacity development in national forest monitoring. Experiences and progress for REDD+*. Bogor, Indonesia, CIFOR & GOF-C-GOLD. p. 5-18.
- Boltz, F; Carter, DR; Holmes, TP; Pereira Jr., R. 2001. Financial returns under uncertainty for conventional and reduced-impact logging in permanent production forests of the Brazilian Amazon. *Ecological Economics* 39:387–398.
- Boltz, F; Holmes, TP; Carter, DR. 2003. Economic and environmental impacts of conventional and reduced-impact logging in Tropical South America: a comparative review. *Forest Policy and Economics* 5:69–81.

- Boxman, O; de Graaf, NR; Hendrison, J; Jonkers, WBJ. 1985. Towards sustained timber production from tropical rain forests in Suriname. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 33:125–132.
- Brokaw, NVL. 1985. Gap-Phase Regeneration in a Tropical Forest. *Ecology* 66:682–687.
- Cabrelli, D; Rebottaro, S; Efron, D. 2006. Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. *Quebracho – Revista de Ciencias Forestales* 13:17-25.
- Campo-Kurmen, J M. 2015. Validación del modelo de dinámica forestal Gavilán: una herramienta para el manejo e investigación en bosques lluviosos tropicales de tierras bajas de Centroamérica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 58p.
- Carrera, F. 2018. Manejo diversificado y certificación de bosques naturales: El caso de las concesiones forestales en Guatemala. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 9 p.
- Carrera, F; Espinosa Peña, C; Magallón, F; Díaz, J; Aguilar, M; Venegas, G; Imaña, J; Camacho, M; Landívar, M; Escobar, S. 2018. Manual para el Manejo de Bosques Naturales en Panamá. Ciudad de Panamá, Panamá, USAID, Ministerio de Ambiente Panamá. 88 p.
- Carrera, F; Louman, B; Jiménez S. 2006. Contexto actual del aprovechamiento forestal en América Central. In Orozco, L; Brumér, C; Quirós, D (eds). *Aprovechamiento de impacto reducido en bosques latifoliados húmedos tropicales*. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p. 1-28. (Serie Técnica. Manual Técnico no. 63).
- Casarim, FM; Ramírez-Delgado, JP; Sidman, G; Bernal, B; McMurray, A; Pearson, TR. 2017. Estimación de Emisiones del Aprovechamiento Forestal por Tala Selectiva: Propuesta de un método operacional para Colombia. s. l. Winrock International. 23 p.
- Chave, J; Andalo, C; Brown, S; Cairns, MA; Chambers, JQ; Eamus, D; Fölster, H; Fromard, F; Higuchi, N; Kira, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1):87-99.
- Chaves, J. 2018. Monitoramento dos Contratos de Concessao Florestal. Apresentação 29 p. Servio Florestal Brasileiro.
- Chazdon RL; Fetcher, N. 1984. Photosynthetic light environments in a lowland tropical rain forest in Costa Rica. *Journal of Ecology* 72:553–564.
- CIFOR (Center for International Forestry Research). 2011. Software (en línea, sitio web). Consultado 21 nov. 2018. Disponible en <https://www.cifor.org/carbofor/tools/software.html>
- Colomb, V; Bernoux, M; Bockel, L; Chote, JL; Martin, S; Martin-Phipps, C; Mousset, J; Tinlot, M; Touchemoulin, O. 2012. Estudio de las calculadoras GEI para los sectores agrícola y forestal. Guía para la elección y utilización de herramientas de evaluación a nivel territorial. 2 ed. S. l. FAO. 47 p.
- Comeau, P. 2000. Measuring light in the forest. British Columbia, Canada, Ministry of Forest. 8 p.
- Contreras, F; Cordero, W; Fredericksen, T. 2001. Evaluación del aprovechamiento forestal. Cobija, Bolivia, ITTO.49 p.
- Curtis, PG; Slay, CM; Harris, NL; Tyukavina, A; Hansen, MC. 2018. Classifying drivers of global forest loss. *Science* 361(6407):1108-1111.
- Dauber, E; Fredericksen, TS; Peña-Claros, M. 2005. Sustainability of timber harvesting in Bolivian tropical forests. *Forest Ecology and Management* 214:294–304.
- De Graaf, NR. 2000. Reduced-impact logging as part of the domestication of a neotropical rainforest. *International Forestry Review* 2:40–44.
- De Graaf, NR; van Eldik, T. 2011. Management for sustainable forestry in other tropical countries. *Precious Wood, Brazil*. In Werger, M (ed.). 2011. *Sustainable Management of Tropical Rainforests. The CELOS Management System*. Paramaribo, Suriname. 149 p. (Tropenbos Series 25).
- Delgado, D; Finegan, B; Zamora, N; Meir, P. 1997. Efectos del aprovechamiento forestal y el tratamiento silvicultural en un bosque húmedo del noreste de Costa Rica: cambios en la riqueza y composición de la vegetación. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 43 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 298/ Colección Manejo Diversificado de Bosques Naturales no. 12).
- Delgado-Aguilar, M; Hinojosa, L; Schmitta, C. 2019. Combining remote sensing techniques and participatory mapping to understand the relations between forest degradation and ecosystems services in a tropical rainforest. *Applied Geography* 104:65-74.
- DigitalGlobe. 2011. QuickBird (en línea, sitio web). Consultado 15 nov. 2018. Disponible en <https://www.spaceimagingme.com/downloads/sensors/datasheets/QuickBird-DS-QB-Web.pdf>

- Duarte, E; Emanuelli, P; Milla, F; Orellana, O; López, S. 2017b. Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial: años 2009-2012-2015. Sitio piloto cantón de Puriscal. Costa Rica. Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, GIZ. 48 p.
- Duarte, E; Emanuelli, P; Milla, F; Orellana, O; López, S. 2017a. Mapa De Cobertura Forestal Y Uso De La Tierra Año 2015. Metodología y Resultados Preliminares. Sitio Piloto Área de Conservación Imposible-Barra de Santiago, Microregión Ahuachapán Sur. El Salvador. Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, GIZ. 28 p.
- Elias, 1999. Reduced Impact Timber Harvesting in the Indonesian Selective Cutting and Planting System. Bogor, Indonesia, Bogor Agricultural University Press.
- Ellis, P; Gopalakrishna, T; Goodmanb, RC; Putz, FE; Roopsin, A; Umunay, PM; Zalman, J; Ellis, EA; Mo, K; Gregoire, TG; Griscom, BW. 2019. Reduced-impact logging for climate change mitigation (RIL-C) can halve selective logging emissions from tropical forests. *Forest Ecology and Management* 438:255–266
- Espinosa, C; Arancibia, D; Pacheco, M. s. f. Guía para la exportación y compra responsable de madera y manufacturas de madera desde Panamá. Colombia, WWF - Red Global de Comercio Forestal - GFTN. 70 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). s.f. Manejo forestal (en línea, sitio web). Consultado 2 mar. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/ah646s/AH646S09.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2018a. Hacia concesiones forestales en las zonas tropicales que contribuyan a la consecución de la Agenda 2030: Directrices voluntarias . Roma, Italia. 128 p. (Estudio FAO: Montes No. 180).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2018b. Nueva herramienta para informar sobre los recursos forestales mundiales (en línea, sitio web). Consultado 15 oct. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/news/story/es/item/1105263/icode/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2010. Casos ejemplares de manejo forestal sostenible en América Latina y el Caribe. Roma, Italia. 284 p. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/casejes.pdf
- Fimbel, RA; Grajal, A; Robinson, JG. 2001. The Cutting Edge: Conserving Wildlife in Logged Tropical Forests. New York, United States of America, Columbia Univ. Press. 700 p.. (Biology and Resource Series)
- Finegan, B. 2014. A 21st century viewpoint on natural tropical forest silviculture. In Pancel, L; Köhl, M (eds.). *Tropical Forestry Handbook*. Berlin, Germany, Springer-Verlag. p. 1-28.
- Finegan, B; Camacho, M. 1999. Stand dynamics in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest, 1988-1996. *Forest Ecology and Management* 121:177-189.
- Finegan, B; Delgado, D; Camacho, M; Zamora, N. 2001. Timber production and plant biodiversity conservation in a Costa Rican rain forest: an experimental study and its lessons for adaptive sustainability assessment. In Franc, A; Laroussinie, O; Karjalainen T (eds.). *Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management at the Forest Management Unit Level*. European Forestry Institute Proceeding no. 38. p. 123-134.
- Finegan, B; Camacho, M; Zamora, N. 1999. Diameter increment among 106 tree species in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest. *Forest Ecology and Management* 121:150-176.
- Forest Pal. 2019. Mapping Toolbox - Timber Cruise Calculators and Field Data Collection Software (en línea, sitio web). Consultado 26 mar 2019. Disponible en http://www.forestpal.com/timber_cruise_calculator.html
- Forest World Magazine. 2017. Tecnología RFID para el transporte de madera certificada (en línea, sitio web). Consultado 15 nov. 2018. Disponible en <http://www.forestworldmagazine.com/es/tecnologia-rfid-para-el-transporte-de-madera-certificada/>.
- Fredericksen, TS; Putz, FE; Pattie, P; Pariona, W; Peña-Claros, M. 2003. Tropical Forestry in Bolivia: the next steps from planned logging towards sustainable forest management. *Journal of Forestry* 101:37–40.
- FSC (Forest Stewardship Council). 2019. Facts & Figures January 2019. Disponible en <https://ic.fsc.org/es/facts-and-figures>
- Gasmet. s. f. DX4040 FTIR Gas Analyzer (en línea). 2 p. Consultado 27 mar 2019. Disponible en <https://www.gasmet.com/uk/wp-content/uploads/sites/10/2018/03/Gasmet-DX4040-Technical-Data-ID-7092.pdf>
- Gastellu-Etchegorry, JP; Guillevic, P; Zagolski, F. Demarez, V. 1999. Modeling BRF and radiation regime of boreal and tropical forests: I. BRF. *Remote Sensing of Environment* 68:281–316.
- Geocento. 2019. Satélite de imágenes SPOT-7 (en línea, sitio web). Consultado 29 mar 2019. Disponible en <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-spot-7/>

- GeoEye. 2012. GeoEye (en línea). 4 p. Consultado 15 oct. 2018.
 Disponible en <http://www.imagenesgeograficas.com/sites/default/files/pdfs/SATELITES.pdf>
- Gerwing, JJ. 2002. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management* 157:131–141.
- GIS Iberica. 2019. Forcípula digital (en línea, sitio web) Consultado 26 mar 2019.
 Disponible en <http://www.gisiberica.com/forcipulas/FO260.html>
- GOFC-GOLD. 2015. 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. Wageningen, The Netherlands. 266 p.
- González C J; Gutiérrez Caro, B; Ipinza, R; Molina Brand, M; Delard, C. 2015. Nuevas Herramientas Tecnológicas para la Identificación de Especies Forestales CITES. In Taller Internacional “Trazabilidad y Control Transfronterizo de Productos de Especies Maderables incluidos en los Apéndices de CITES” (2, 2015). Arica, Chile. INFOR. 37 p.
- Gonzales Ferreira, E. 2012. Aplicaciones forestales de LiDAR. In Congreso Nacional sobre Tecnologías de la Información Geográfica (15, 2012). España. 31 p.
- Goodman, R; Harman Aramburu, M; Gopalakrishnac, T; Putz, F; Gutiérrez, 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.
- Gourlet-Fleury S; Guehl, JM; Laroussinie O. 2004. Ecology and management of a neotropical rainforest : lessons drawn from Paracou, a long-term experimental research site in French Guiana. Paris, France, Elsevier. 326 p.
- Gourlet-Fleury, S; Guehl, JM; Laroussinie, O. 2004. Ecology and management of a neotropical rainforest. Lessons drawn from Paracou, a long-term experimental research site in French Guiana. Paris, France, Elsevier SAS. 311 p.
- Government of the Cooperative Republic of Guyana. 2015. The Reference Level for Guyana's REDD+ Program. Guyana. 74 p.
- Grace, P; van der Weerden, TJ; Kelly, K; Rees, RM; Skiba, UM. 2015. Automated greenhouse gas measurement in the field. In Klein, C; Harvey, M (eds.). Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines. Wellington, Nueva Zelanda, Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. p. 73-94.
- Guariguata, MR. 1999. Early response of selected tree species to liberation thinning in a young secondary forest in northeastern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 124:255–261.
- Gullison, R. E; Hardner, JJ. 1993. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management* 59:1-14.
- Haglof. 2019. The Vertex Laser Geo. 2 p. Consultado 1 mar. 2019. Disponible en <http://www.haglofcg.com/index.php/en/support-news/download/software/en/leaflets/85-the-vertex-laser-geo/file>
- Henderson, J. 1990. Damage-controlled Logging in Managed Tropical Rain Forest in Suriname. Netherlands. , Wageningen Agricultural University. 204 p. (Series on the ecology and management of tropical rainforests in Suriname 4).
- Heumesser, C. 2014. World Bank GHG Accounting Guidance Note# 3: Agriculture Sector Investment Projects (v1). Banco Mundial. 17 p.
- Hewson, J; Steininger, M; Pesmajoglou, S. 2014. Manual de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de REDD+. 2 ed. Washington, D.C; Estados Unidos de América, USAID. 243 p.
- Hu, J; Herbohn, J; Chazdon, R; Baynes, J; Wills, J; Meadows, J; Shawkat, M; Sohel, I. 2018. Recovery of species composition over 46 years in a logged Australian tropical forest following different intensity silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*. 409:660-666.
- IFAD (International Fund for Agricultural Development). 2016. Rural Development Report 2016: Fostering inclusive rural transformation. Roma. 370 p. Disponible en <https://www.ifad.org/documents/38714170/39155702/Rural+development+report+2016.pdf/347402dd-a37f-41b7-9990-aa745dc113b9>
- INAB (Instituto Nacional de Bosques de Guatemala). 2018. Experiencia en la implementación de herramientas electrónicas para mejorar la legalidad y trazabilidad de la madera en Guatemala. Diapositivas.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México). 2018. Imágenes de Satélite. RapidEye (en línea). Consultado 15 set. 2018.
 Disponible en <https://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/rapideye.aspx>

- Ingeoexpert. s. f. Tipos de drones: forma y método de control (en línea). Consultado 30 set. 2018. Disponible en 2018 <https://ingeoexpert.com/tipos-de-drones/?v=1d7b33fc26ca>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, K.S. White (Edit.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations, and Vulnerability*. Cambridge University Press, New York.
- ISO (International Organization for Standardization). 1994. *ISO 8402:1994 Quality management and quality assurance-Vocabulary*, 2 ed.
- ITTO (Organización Internacional de Maderas Tropicales). 2019. Sistema de trazabilidad mejora la gobernanza forestal en Panamá (en línea, sitio web). Video. Consultado 28 mar 2019. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=TOeLTiQQZc&t=3s>
- Jantz, P; Goetz, S; Laporte, N. 2014. Carbon stock corridors to mitigate climate change and promote biodiversity in the tropics. *Nature Climate Change* 4(2):138–142.
- Johns, JS; Barreto, P; Uhl, C; 1996. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management* 89:59–77.
- Jonkers, WBJ. 1987. Vegetation structure, logging damage and silviculture in a tropical rain forest in Suriname. Ph.D. Thesis. The Netherlands, Wageningen Agricultural University.
- Kammesheidt, L; Kohler, P; Huth, A. 2001. Sustainable timber harvesting in Venezuela: a modelling approach. *Journal of Applied Ecology* 38:756–770.
- Klein, C; Harvey, M. 2015. *Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines*. Wellington, Nueva Zelanda, Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. 146 p.
- Kumar, A; Bhatia, A; Fagodiya, RK; Malyan, SK; Meena, BL. 2017. Eddy Covariance Flux Tower: A Promising Technique for Greenhouse Gases Measurement. *Advances in Plants & Agriculture Research* 7(4):337–340.
- LABFERRER. 2019. Accupar LP-80 (en línea, sitio web). Consultado 26 mar 2019. Disponible en <https://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/ceptometro-par-y-lai/accupar-lp-80.html>
- Laporte, J; Vandenhaute, M. 2016. Trazabilidad: una herramienta de gestión para las empresas y los gobiernos. Roma, Italia, Programa FAO FLEFGT. 68 p. (Documento Técnico).
- Lau, A; Martius, c; Harm, B; Shenkinc, A; Jackson, T; Malhi, Y; Herold, M; Patrick Bentley, L. 2019. Estimating architecture-based metabolic scaling exponents of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. *Forest Ecology and Management* 439:132–145.
- Laumonier, Y. 2018. Pros, contras y potencial del uso de drones para la investigación forestal (en línea, sitio web). Consultado 10 oct. 2018. Disponible en <https://forestsnews.cifor.org/58075/pros-contras-y-potencial-del-uso-de-drones-para-la-investigacion-forestal?fnl=es>
- Lee DW. 1987. The spectral distribution of radiation in two neotropical rainforests. *Biotropica* 19:161–166.
- Li-Cor. 2019. LI-COR Trace Gas Analyzer Advantages (en línea, sitio web). Consultado 27 mar 2019. Disponible en https://www.licor.com/env/products/soil_flux/survey.html
- Lieberman, D; Lieberman, M. 1987. Forest tree growth and dynamics at La Selva, Costa Rica (1969-1982). *Journal of Tropical Ecology* 3(4):347-358.
- Louman, B; Quirós, D; Nilsson, M. (eds.). 2001. *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 265 p. (Serie técnica. Manual técnico No. 46).
- Mandujano, S; Mulero-Pázmany, M; Rísquez-Valdepeña, A. 2017. Drones: una nueva tecnología para el estudio y monitoreo de fauna y hábitats. *Agro Productividad* 10(10):79-84.
- Manocharan, N; Kochummen, K. M. 1987 Recruitment, growth and mortality of tree species in a lowland dipterocarp forest in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology* 3:315-330.
- Mantilla, MG; Ariza, LLC; Delgado, BM. 2014. Metodología para el desarrollo de aplicaciones móviles. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*. 18(40):20-35.
- Mas, J-F; Lemoine-Rodríguez, R; Taud, H. 2016. Hacia un sistema de monitoreo forestal en tiempo casi real. *Investigaciones Geográficas UNAM* 9:168-175.

- Mauro-Díaz, G; Lencinas, JD; del Valle, H. 2014. Introducción a la fotografía hemisférica en ciencias forestales. *Madera y bosques* 20(1):109-117.
- Mena Ramírez, M. 2018. La seguridad aeronáutica. Regulación vigente para el uso de vehículos no tripulados. *Jurídica* N° 690 (sup.: El Peruano):2-3.
- Ministerio de Ambiente de Panamá. 2018. Resolución No 68-2018. Establece el Sistema de Trazabilidad y Control Forestal del Ministerio de Ambiente. 92 p. *Diario Gaceta Oficial*. 27 feb.
- Mojica, P; Cuellar, S; Medina, P. 2015. Vehículos aéreos no tripulados y sus Sistemas de Comunicación. Colombia, Centro de Información Tecnológica y Apoyo a la Gestión de la Propiedad Industrial - CIGEPI. 104 p.
- Montero Lannegrand, R. 2017. Estudio de tecnología de comunicación de campo cercano, NFC. Tesis Ing. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 155 p.
- Montoya, CS; Monge, RQ; Gaitán, IM; Vargas, LGA; Calvo, JV; Salazar, GM. 2016. Tecnologías para la identificación de especies arbóreas con dispositivos móviles-eFlora. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* (1):1-28.
- Mora, D; Jiménez, J; Fábrega, J. Relación Entre el Índice de Área Foliar y el Índice Normalizado de Vegetación en el Bosque Húmedo Tropical de Panamá, en Gamboa. *I+D Tecnológico* 10(1):28-40
- Moreno Orjuela, RD; Villota Echeverri, N; Marín Montoya, J; Zúñiga Gallego, J; Gutiérrez Rodríguez, E. 2017. Sistema de aseguramiento de la legalidad de la madera. Propuesta para implementación en Colombia. Colombia, CARDER. 48 p.
- Muñoz, L. 8 abr. 2013. Uso de Densiómetro Cóncavo (en línea, blog). *El Blog Forestal*. Hacia un manejo y conservación de los bosques tropicales. Consultado 1 nov 2018. Disponible en <https://mluisforestal.wordpress.com/2013/04/08/uso-de-densio metro-concavo/>
- Murray, KG. 1988. Avian Seed Dispersal of Three Neotropical Gap-Dependent Plants. *Ecological Monographs* 58:271-298.
- Navall, M; Cassino, W; Carignano, P; D'Angelo, P. 2013. SilvoINTA: una aplicación móvil para asistir la silvicultura de bosques irregulares. In *Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano* (4, 2013). Puerto Iguazú, Argentina. 6 p.
- Navarro Gómez, R. 2014. Avances tecnológicos hacia la trazabilidad de la madera. Leticia, Perú, OSINFOR. 19 p.
- Nguyen-The, N; Favrichon, V; Sist, P; Houde, L; Bertault, J-G; Fauvet, N. 1998. Growth and mortality patterns before and after logging. In Bertault, J-G; Kadir, K (eds.). *Silvicultural research in a lowland mixed dipterocarp forest of East Kalimantan, the contribution of STREK project*. Montpellier, France, CIRAD- Forêt Publication. p. 181-216..
- Nicholson DI. 1979. The effects of logging and treatment on the mixed dipterocarp forests of Southeast Asia. Rome, Italy, FAO. (Report FO: MISC/79/8, 65).
- Noguerón, R. 2017. Trazabilidad de productos forestales: Una perspectiva global (en línea). Consultado 15 nov 2018. Disponible en <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/10/03-Ruth-Nogueron.pdf>.
- Ong, R; Kleine, M. 1995 DIPSIM. A dipterocarp forest growth simulation model for Sabah. Sabah, Malaysia, Forest Department. (Forest Research Centre Research paper No. 2) 94 p.
- Ordóñez, JL. 2012. Códigos QR. Manual formativo. *ACTA* (63):9-28.
- Pacheco, M. 2017. Trazabilidad en la Industria Forestal: Experiencias en Colombia y Panamá. In *La Trazabilidad: Herramienta de Gestión y Comercio Responsable de la Madera – SERFOR* (1, 2017). Lima, Perú. 37 p.
- Paneque-Gálvez, J; McCall, M. K; Napoletano, B. M; Wich, S. A; Koh, L. P. 2014. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests* 5(6):1481-1507.
- Pearson, TR; Brown, S; Casarim, FM. 2014. Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging (en línea). *Environmental Research Letters* 9(3):034017. Consultado 15 nov. 2018. Disponible en doi:10.1088/1748-9326/9/3/034017
- Pearson, TR; Brown, S; Murray, L; Sidman, G. 2017. Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source (en línea). *Carbon balance and management* 12(1):3. Consultado 15 nov. 2018. Disponible en DOI 10.1186/s13021-017-0072-2
- Pereira, R; Zweede, J; Asner, G. P; Keller, M. 2002. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. *Forest Ecology and Management* 168:77-89.
- Pinage, E; Locks, C. 2014. Application of LiDAR data for assessing forest understory disturbances at forest concession areas. Artículo de conferencia. XI Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal. Curitiba, Brasil.

- Pinard, MA; Howlett, B; Davidson, D. 1996. Site conditions limit pioneer tree recruitment after logging of dipterocarp forests in Sabah, Malaysia. *Biotropica* 28:2–12.
- Pinard, MA., Putz, FE. 1996. Retaining forest biomass by reducing logging damage. *Biotropica* 28:278–295.
- Piponiot, C; Sist, P; Mazzei, L; Peña-Claros, M; Putz, F. E; Rutishauser, E; Shenkin, A; Ascarrunz, N; De Azevedo, C; Baraloto, C. 2016. Carbon recovery dynamics following disturbance by selective logging in Amazonian forests (en línea). *ELife* 5: e21394. Consultado 15 nov. 2018. Disponible en <https://elifesciences.org/articles/21394>
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2016. Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, Chile, CEPAL. 50 p. Disponible en <http://www.sela.org/media/2262361/agenda-2030-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf>
- Pratihast, AK; Souza Jr, CM; Herold, M; Ribbe, L. 2012. Application of mobile devices for community based forest monitoring. In *Proceedings of the Workshop Sensing a Changing World*, Wageningen, 9-11 May 2012. p. 6-6.
- Primack, RB; Ashton, PS; Chai, P; Lee, HS. 1985. Growth rates and population structure of Moraceae trees in Sarawak, East Malaysia. *Ecology* 66:577-588.
- Promis, Á. 2013. Medición y estimación del ambiente lumínico en el interior del bosque: Una revisión. *Revista Chapingo-Serie ciencias forestales y del ambiente* 19(1):139-146.
- Putz, FE; Blate, GM; Redford, KH; Fimbel, R; Robinson, JG. 2001. Biodiversity conservation in the context of tropical forest management. *Conservation Biology* 15:7–20.
- Putz, FE; Ruslandi, R. 2015. Intensification of Tropical Silviculture. *Journal of Tropical Forest Science* 27(3):285-288.
- Putz, FE; Sist, P; Fredericksen, T; Dykstra, D. 2008a. Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 256:1427–1433.
- Putz, FE; Zuidema, PA; Synnott, T; Peña-Claros, M; Pinard, MA; Sheil, D; Vanclay, JK; Sist, P; Gourlet-Fleury, S; Griscom, B; Palmer, J; Zagt, R. 2012. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: the attained and the attainable. *Conservation Letters* 5:296–303
- Putz, F; Zuidema, PA; Pinard, MA; Boot, RGA; Sayer, JA; Sheil, D; Sist, P; Elias; Vanclay, JK. 2008b. Improved Tropical Forest Management for Carbon Retention. *Plos Biology* 6(7):1368-1369.
- Raffo, D. 2014. La radiación solar y las plantas. Un delicado equilibrio. *INTA Alto Valle* 74: 40-45.
- RapidEye; Geosystems. s. f. Información fidedigna para la toma de decisiones en la industria forestal. Silvicultura: soluciones de gestión basadas en información geográfica (en línea). 2 p. Consultado 15 oct. 2018. Disponible en http://www.geosystems.cc/catalogos/RapidEye_silvicultura.pdf
- Rautner, M; Leggett, M; Davis, F. 2013. *El Pequeño Libro de las Grandes Causas de la Deforestación*. Oxford, Programa Global Canopy. 118 p. Disponible en https://forest500.org/sites/default/files/the_little_book_of_big_deforestation_drivers_-_spanish.pdf
- Romero, C; Sills, EO; Guariguata, MR; Cerutti, PO; Lescuyer, G; Putz, FE. 2017. Evaluation of the impacts of Forest Stewardship Council (FSC) certification of natural forest management in the tropics: a rigorous approach to assessment of a complex conservation intervention. *International Forestry Review* 19(S2):36-49.
- Roopsind, A; Wortel, V; Hanoeman, W; Putz FE. 2017. Quantifying uncertainty about forest recovery 32-years after selective logging in Suriname. *Forest Ecology and Management* 391:246–255.
- Ruiz, M; Santos, L; Van der Elstraeten, A. 2017. Drones para el monitoreo comunitario de bosques. *Nuevas tecnologías para la autogestión de territorios indígenas en Panamá*. s. l. FAO. 21 p.
- Saldaña Díaz, M. 2013. Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2. Tesis Doc. Almería, España, Universidad de Almería. 241 p.
- Sánchez, D; Arends, E; Villareal, A; Serrano, J. 2008. Composición florística de la regeneración natural en áreas de aprovechamiento forestal, Estación Experimental Caparo, Barinas-Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana* 23(1):35-52.
- Schwartz, G; Lopes, J.dC. 2014. Logging in the Brazilian Amazon Forest: The Challenges of Reaching Sustainable Future Cutting Cycles. In Daniels, J (ed.). *Advances in Environmental Research*. New York, Estados Unidos de América, Nova Science Publishers. Vol 36. 274 p.

- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). s. f. Emisión y Registro de Guías de Transporte Forestal (en línea, sitio web). Consultado 20 nov. 2018.
 Disponible en <https://www.serfor.gob.pe/sistema-nacional-de-informacion-forestal-y-de-fauna-silvestre-sniifs/emision-y-registro-de-guias-de-transporte-forestal#>
- Sesnie , SE; Finegan, B; Gessler, PE. 2009. Landscape-Scale Environmental and Floristic Variation in Costa Rican Old-Growth Rain Forest Remnants. *Biotropica* 41(1):16-26.
- Sist, P. 2000. Reduced impact logging in the tropics: objectives, principles, and impacts. *International Forestry Reviews* 2:3–10.
- Sist, P; Bertault, J-G. 1998. Reduced-Impact logging experiments: impact of harvesting intensities and logging techniques on stand damage. In Bertault, J-G; Kadir, K (eds.). *Silvicultural research in a lowland mixed dipterocarp forest of East Kalimantan: the contribution of STREK project*. Montpellier, France, CIRAD-Forêt Publication. p: 139-162.
- Sist, P; Ferreira, FN. 2007. Sustainability of reduced-impact logging in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management* 243:199–209.
- Sist, P; Fimbel, R; Nasi, R; Sheil, D; Chevallier, M-H. 2003. Towards sustainable management of mixed dipterocarp forests of South East Asia: moving beyond minimum diameter cutting limits. *Environmental Conservation* 30:364–374.
- Sitoe, A; Finegan, B; Franc, A. 2001. Gavilán: un modelo para simulación del crecimiento, rendimiento y cambios florísticos de los bosques centroamericanos dominados por *Pentaclethra macroloba*. *Revista Forestal Centroamericana* 34:19-22.
- Snook, LK. 2005. Sustaining mahogany: research and silviculture in Mexico's community forests. *Bois et Forêts des Tropiques* 285(3):55-65.
- Stankey, GH; Clark, RN; Bormann, BT. 2005. *Adaptive Management of Natural Resources: Theory, Concepts, and Management Institutions*. Portland, Unites States of America, USDA. 73 p.
- Steege, HT; Boot, RGA; Brouwer, LC; Caesar, JC; Ek, RC; Hammond, DS; Haripersaud, PP; van der Hout, P; Jetten, VG; van Kekem, AJ; Kellman, MA; Kahn, Z; Polak, AM; Pons, TL; Pulles, J; Raaimakers, D; Rose, SA; Sanden, J van der; Zagt, RJ. 1996. *Ecology and logging in a tropical rain forest in Guyana. With recommendations for forest management*. Wageningen, The Netherlands, The Tropenbos Foundation. 123 p. (Tropenbos Series no. 14).
- Steege, HT; Bokdam C; Boland, M; Dobbelseen, J. 1994. The effects of man-made gaps on germination, early survival, and morphology of *Chlorocardium rodiei* seedlings in Guyana. *Journal of Tropical Ecology* 10:245–260.
- SBB (Stichting Bosbeheer En Bostoezicht). 2010. LogPro System (en línea, sitio web). Consultado 10 dic. 2018.
 Disponible en <https://sbbsur.com/facilitaire-diensten/logpro/>
- Tubiello, F; Córdor, R; Salvatore, M; Piersante, A; Federici, S; Ferrara, A; Rossi, S; Flammini, A; Cardenas, P; Biancalani, R. 2015. *Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura: Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo*. Roma, Italia, FAO. 193 p.
- UE (Unión Europea). 2004. ¿En qué consiste FLEGT? FLEGT. *Notas informativas* (1). 2 p.
- Uhl, C; Barreto, P; Veríssimo, A. 1997. Natural resource management in the Brazilian Amazon: an integrated research approach. *BioScience* 47:160–168.
- Universidad Austral de Chile. s. f. *Cuantificación de Carbono. Softwares para el Cálculo de Flujos de Carbono* (en línea, sitio web). Consultado 21 de nov. 2018.
 Disponible en https://www.uach.cl/procarbono/cuantificacion_del_carbono.html
- USDA (United States Department of Agriculture). 2019. *Timber Cruising* (en línea, sitio web). Consultado 26 mar. 2019.
 Disponible en <https://www.fs.fed.us/forestmanagement/products/measurement/cruising/index.shtml>
- Van der Hout, P. 1999. *Reduced Impact Logging in the Tropical Rain Forest of Guyana: Ecological, Economic, and Silvicultural Consequences*. Georgetown, Guyana, Wageningen – Tropenbos International. (Tropenbos-Guyana Series no.6). .
- Van der Hout, P. 2011. *Management for sustainable forestry in other tropical countries. Guyana. In Werger, M (ed.). Sustainable Management of Tropical Rainforests. The CELOS Management System*. Paramaribo, Suriname, 149 p. (Tropenbos Series 25).

- Van Gardingen, PR; McLeish, MJ; Phillips, PD; Fadilah, D; Tyrie, G; Yasman, I. 2003. Financial and ecological analysis of management options for logged-over Dipterocarp forests in Indonesian Borneo. *Forest Ecology and Management* 183:1–29.
- Van Gardingen, PR; Valle, D; Thompson, I. 2006. Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajos National Forest, Brazil. *Forest Ecology and Management* 231:184–195.
- Vanclay, JK. 1994. Sustainable timber harvesting: simulation studies in the tropical rainforests of north Queensland. *Forest Ecology and Management* 69:299-320.
- Vergés, FAR; Bocco, G. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta ecológica* (68):43-54.
- Veríssimo, A; Barreto, P; Tarifa, R; Uhl, C. 1992. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: the case of Paragominas. *Forest Ecology and Management* 55:169–199.
- Verwer, C; Peña-Claros, M; van der Staak, D; Ohlson-Kiehn, K; Sterck, F.J. 2008. Silviculture enhances the recovery of overexploited mahogany *Swietenia macrophylla*. *Journal of Applied Ecology* 45:1770–1779.
- Vidal, E; Gerwing, J; Barreto, P; Amaral, P; Johns, J. 1998. Vine management for reduced-impact logging in eastern Amazonia. *Forest Ecology and Management* 2:105–114.
- Vila, L; Finer, M. 2018. Detecting Logging in the Peruvian Amazon with High Resolution Imagery (en línea). MAAP. Consultado 10 dic. 2018. Disponible en <https://maaproject.org/2018/tala-alta-resolucion/>
- Vilanova, E; Sabogal, C. 2012. La silvicultura en bosques naturales de Venezuela: Lecciones aprendidas y recomendaciones para la política y la práctica. *Revista Forestal Venezolana* 56(1):95-107.
- Orozco Vilchez, L; Brumer, C; Quirós, D. 2006. Aprovechamiento de impacto reducido en bosques latifoliados húmedos tropicales. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 456 p. (Serie técnica. Manual técnico No. 63).
- Wadsworth, FH; Zweede, JC. 2006. Liberation: acceptable production of tropical forest timber. *Forest Ecology and Management* 233:45–51.
- WALZ. 2019. UML-500 (en línea, sitio web). Consultado 26 mar. 2019. Disponible en <https://www.walz.com/products/light/ulm-500/introduction.html>
- Werger, M (ed.). 2011. Sustainable Management of Tropical Rainforests. The CELOS Management System. Paramaribo, Suriname, Tropenbos International. 149 p. (Tropenbos Series 25).
- West, TA; Vidal, E; Putz, FE. 2014. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. *Forest Ecology and Management* 314:59-63.
- WRI (World Resource Institute). 2014. Global Forest Watch (en línea, sitio web). Consultado 21 de oct. 2018. Disponible en <https://www.globalforestwatch.org/>
- Zalman, J; Ellis, P.W; Crabbe, S; Roopsind, A. 2019. Opportunities for carbon emissions reduction from selective logging in Suriname. *Forest Ecology and Management* 439:9–17.
- Zamora-Martínez, MC. 2017. La tecnología LiDAR, herramienta útil para el estudio de la biodiversidad. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8:4-6.
- Zúñiga Loayza, C. 2010. BSD Opciones tecnológicas para la trazabilidad. Perú. 55 p. (Informe). Consultado 21 de oct. 2018. Disponible en <https://www.globalforestwatch.org/>

Anexo 1.

Glosario de términos forestales

Aprovechamiento forestal: refiere a la cosecha o corta de árboles en bosques para obtención de madera, su preparación, arrastre de trozas y su transporte a aserraderos.

Aprovechamiento selectivo de madera: corta o cosecha de un limitado número de árboles de especies comerciales, la preparación y arrastre de trozas y su transporte a aserraderos.

Aprovechamiento sostenible: cosecha o aprovechamiento de los componentes de la diversidad biológica de forma que no ocasione su disminución a largo plazo, manteniendo su potencial para satisfacer las necesidades y pretensiones de las generaciones presentes y futuras.

Árboles comerciales: árboles cuya madera tiene un valor de mercado reconocido y por el cual son sujetos a aprovechamiento.

Árboles de futura cosecha: árbol comercial con dimensiones aun no adecuadas o permitidas para cosecha, y que se prevé será aprovechado en un futuro. Entre sus características están: ser de una especie comercial, tener un tallo recto, sin torceduras o deformidad y una adecuada forma de copa.

Área basal: variable de referencia de la masa forestal. Este parámetro resulta de expresar en m^2 ha⁻¹, la relación entre las secciones normales de los árboles y la superficie de terreno que ocupan. La sección normal de un árbol es la que se encuentra a la altura del pecho, o a 1,3 m de su base. El área basal se obtiene a través de la medida del diámetro «d» en la sección normal y la aplicación de la fórmula del área del círculo.

Biomasa forestal: se define como el peso seco de materia orgánica que existe en un ecosistema forestal. Si bien considera la materia orgánica por encima y por debajo del suelo, en términos de manejo forestal se refiere a la que se encuentra contenida en los árboles (tallo y ramas). Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea.

Caminos de extracción de trozas: todo aquel camino por donde transitan camiones y que termina en un patio de acopio.

Claro del bosque: apertura del dosel del bosque que se extiende en forma vertical hasta el piso del suelo o a una altura relativamente cercana a este.

Composición del bosque: refiere a las especies que conforman el bosque. Normalmente la composición de un bosque se analiza con base en las especies registradas y alguna variable relacionada a su importancia (como por ejemplo su abundancia, volumen y área basal).

Cosecha de madera: ver aprovechamiento forestal.

Diámetro a la altura del pecho: es el diámetro del círculo que se forma en el punto de corte transversal de un tallo a 1,3 m de altura (sección normal).

Dinámica del bosque: refiere a los cambios que experimenta un bosque a lo largo del tiempo, en términos de su estructura (número de árboles, área basal, volumen, biomasa), composición (especies dominantes) y diversidad.

Dinámicas poblacionales: son los cambios que experimentan las poblaciones o grupos de individuos de las especies en el tiempo, producto de su mortalidad, reproducción o crecimiento.

Dosel: refiere a las copas o regiones superiores de los árboles de un bosque.

Estructura del bosque: trata de la disposición de la vegetación en un bosque en el plano horizontal o vertical. Normalmente se divide en dos: estructura horizontal que se mide en términos de la abundancia de la vegetación, su área basal, biomasa, etc., y la estructura vertical (altura de vegetación, número de estratos de altura, etc.).

Fuste: sinónimo de tallo en árboles y palmas.

Intensidad de aprovechamiento: es la cantidad de producto que se extrae por el aprovechamiento o cosecha de un bosque. En manejo forestal, la intensidad de aprovechamiento de madera se expresa en términos del número de árboles, área basal, volumen o biomasa cosechado por unidad de área (normalmente los datos se muestran por hectárea)

Manejo forestal o manejo forestal sostenible: administración del recurso forestal orientada a asegurar que todos los bienes y servicios derivados de los bosques abastezcan las necesidades actuales, mientras que al mismo tiempo aseguren su capacidad y contribución continua para las futuras generaciones. El manejo forestal abarca los aspectos administrativos, legales, técnicos, económicos, sociales y ambientales de la conservación, protección y uso de los bosques.

Método de aprovechamiento: se refiere a la forma en que se planifica, se cosecha y se extrae la madera de un bosque hacia el exterior. Existen dos métodos principales de aprovechamiento en bosques naturales: el aprovechamiento convencional (AC) y el aprovechamiento de impacto reducido (AIR) (ver descripción de ambos métodos en el Cuadro 2 del texto)

Parcelas permanentes de muestreo (PPM): dispositivos para el monitoreo de la dinámica de la vegetación en bosques. Consiste de un área delimitada en forma permanente en el bosque en donde cada elemento dentro de esta área (árbol, palma, liana, helecho, etc., dependiendo de los objetivos del estudio) es evaluada en el tiempo en términos de su tamaño y estado. El seguimiento a cada elemento permite obtener información sobre el crecimiento y productividad del bosque.

Patios de acopio: áreas destinadas al almacenamiento temporal de trozas para su posterior carga y transporte fuera del bosque.

Producto forestal: Es toda troza, madera en block, enchapados, aglomerados, fósforos, pulpa, paletas, palillos, astillas, muebles, puertas, marcos de ventanas y molduras.

Producto maderable: refiere a los productos derivados de la madera, incluyendo la leña y el carbón.

Producto no maderable: productos renovables y tangibles diferentes a los productos madera, leña y carbón, derivados del bosque o cualquier tierra de uso similar. Abarca toda la gama de productos vegetales, excluyendo la madera en todas sus formas, como resinas, especias,

ornamentales, fibras, hojas para forraje y construcción de techos, frutos, semillas, cortezas, y la fauna del bosque.

Radiación fotosintéticamente activa (Rafa): cantidad de radiación capaz de producir fotosíntesis, usualmente comprendida entre las longitudes de onda de 400-700 nm

Regeneración asistida: es la regeneración de especies deseadas mediante la acción humana. Las intervenciones pueden incluir la preparación del sitio para la germinación, la eliminación de barreras como el caso de la competencia o depredación, el traslado de semillas y plántulas hacia otras áreas y su posterior siembra, etc.

Regeneración natural: trata del establecimiento de vegetación en áreas mediante procesos naturales, como lo son la dispersión de semillas por viento, agua o mediante la acción de animales dispersores. También existen especies vegetales que tienen mecanismos de dispersión autócora, es decir expulsan sus semillas por sus propios medios (por ejemplo, frutos explosivos).

Senderos de arrastre: camino que solamente es utilizado para halar con cable del tractor los fustes de los árboles cosechados, desde el punto donde se derribó el árbol hasta donde se encuentra el tractor.

Silvicultura: La ciencia y el arte de controlar el establecimiento, crecimiento, composición, estado de salud y calidad del bosque y de las otras tierras boscosas con el fin de satisfacer de manera sostenible una serie de necesidades y valores precisos, dictados por los propietarios y la sociedad.

Sistemas silviculturales policíclicos: se basa en la corta o eliminación selectiva y periódica de un número reducido y limitado de árboles tratando de mantener una cantidad adecuada de árboles maduros de buena forma y bien distribuidos como semilleros.

Sotobosque: dicese del área de un bosque que se encuentra más cerca del suelo, por debajo del dosel vegetal (por ejemplo, en los primeros 5 metros con respecto al piso del bosque).

Sucesión ecológica: refiere a los cambios en el tiempo que experimentan los bosques, en términos de estructura, composición y diversidad.

Tractor de oruga: vehículo con dispositivo de tracción que consiste en un conjunto de eslabones modulares rígidos unidos fuertemente a otros que permiten un desplazamiento estable aun en terrenos irregulares.

Tractor skidder: vehículo forestal con llantas para arrastre de trozas.

Tratamiento silvicultural: prácticas diseñadas para conducir la dinámica del bosque y optimizar su productividad. Los tratamientos silviculturales modifican la estructura del bosque y reducen la competencia sobre los árboles de especies de mayor valor. Se trata de crear un espacio ideal para el desarrollo de cada individuo deseado mejorando su condición de iluminación y su espacio para crecer. Para ello, se elimina una proporción de la masa de árboles no deseable (especies o individuos con poco valor de mercado, enfermos, de mala forma, etc.).

Troza: sección del fuste de un árbol cosechado

Volumen de madera: variable de referencia de la masa forestal. Parámetro que se deriva de la multiplicación del área basal y la altura de un árbol individual, también puede incluir la consideración de un factor de forma del fuste. En un bosque, el volumen de madera se calcula mediante la suma de los volúmenes de los árboles individuales en un área específica y, normalmente, se expresa en m³ por hectárea.

Anexo 2.

Expertos consultados en la región sobre el tema de monitoreo y uso de tecnologías

	Cargo/institución	País
Especialistas impacto manejo forestal		
Jean Pierre Morales	Especialista CATIE	Costa Rica
Eddy Peña	Especialista Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA)	Perú
Cristina Vidal	Especialista Rainforest Alliance	Latinoamérica, con énfasis Guatemala, Surinam, Bolivia, México y Costa Rica
Karla Ramírez	Especialista FAO	Latinoamérica, con énfasis en Centroamérica
Bastiaan Louman	Especialista TROPENBOS	Latinoamérica
César Sabogal	Consultor FAO	Brasil, Perú
William Arreaga	Especialista Rainforest Alliance	Guatemala
Manuel Guariguata	Especialista CIFOR	Varios
Edgar Bámaca	NEPcon	Guatemala
José H. Chaves	Servicio Forestal Brasileño	Brasil
Sara Crabbe	SBB	Surinam
Verginia Wortel	CELOS	Surinam
Ramón Díaz	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales	República Dominicana
Nery Solís	WCS	Guatemala
Especialistas trazabilidad		
Guillermo Navarro	Especialista FAO FLEGT	Latinoamérica
Bruno Arias	Especialista Instituto Nacional de Bosques (INAB)	Guatemala
Yadira Molina	Especialista Madera Verde	Honduras
Miguel Pacheco	Especialista WWF	Latinoamérica, énfasis Colombia
Marcos Bauch	IBAMA	Brasil
Especialistas carbono		
Karla Ramírez	Especialista FAO	Latinoamérica, con énfasis en Centroamérica
Miguel Cifuentes	Especialista CATIE	Latinoamérica
Bastiaan Louman	Especialista TROPENBOS	Latinoamérica
Frederic Gay	Especialista CIRAD	Costa Rica, Finlandia

Anexo 3.

Iniciativas de monitoreo forestal identificadas en los países tropicales de Latinoamérica y el Caribe

País	Número de iniciativas	Nombre de la iniciativa	
México, Centroamérica y el Caribe			
México	8	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema nacional de monitoreo forestal de México - Sistema nacional de información forestal - Sitios de monitoreo intensivo de carbono forestal - Sistema operativo de sensores remotos 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional forestal y de suelo - Monitoreo satelital anual de la cobertura forestal - Sistema de alerta de incendios - Inventario nacional de gases de efecto invernadero
Belice	3	<ul style="list-style-type: none"> - Red de monitoreo forestal de Belice - Cambio en la cobertura forestal de Belice 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional de gases de efecto invernadero
Guatemala	6	<ul style="list-style-type: none"> - Grupo interinstitucional de monitoreo de bosques y uso de la tierra (Gimbut) - Sistema de monitoreo forestal - Inventario nacional de gases de efecto invernadero 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de información forestal de Guatemala - Inventario forestal nacional - Parcelas permanentes de medición forestal en plantaciones
Honduras	8	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo en zonas prioritarias - Anuario estadístico forestal - Evaluación nacional forestal: resultados del inventario de bosques y árboles 2005-2006 - Sistema nacional de monitoreo de bosques 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional de gases de efecto invernadero - Sistema nacional de información forestal - Monitoreo de plagas - Monitoreo, reporte y verificación
El Salvador	3	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de la deforestación con sensores remotos - Inventario forestal nacional 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional de gases de efecto invernadero
Nicaragua	3	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo forestal independiente en Nicaragua - Inventario forestal nacional 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional de gases de efecto invernadero
Costa Rica	7	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de información de los recursos forestales de Costa Rica - Inventario nacional de gases de efecto invernadero - Establecimiento de PPM en el transepto continental del bosque nuboso de Monteverde 	<ul style="list-style-type: none"> - Red de monitoreo de ecosistemas forestales de Costa Rica - Proyecto monitoreo de la cobertura forestal - Inventario forestal nacional - Sistema nacional de vigilancia forestal
Panamá	6	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema nacional de monitoreo forestal - Inventario nacional forestal y de carbono - Sistema satelital de monitoreo de la tierra 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de gases de efecto invernadero - Sistema de información estadística forestal - Monitoreo comunitario de bosque en zonas indígenas de Panamá
Cuba	3	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario forestal nacional - Sistema informatizado para el inventario forestal 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de gases de efecto invernadero
República Dominicana	3	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional forestal multipropósito - Sistema nacional de monitoreo forestal 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de gases de efecto invernadero

País	Número de iniciativas	Nombre de la iniciativa	
Suramérica			
Colombia	6	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de monitoreo de bosques y carbono - Programa nacional para el monitoreo y seguimiento a los bosques y áreas de aptitud forestal - Inventario nacional de gases de efecto invernadero 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario forestal nacional - Sistema de monitoreo de deforestación y contenidos de carbono en los bosques naturales de Colombia - Sistema nacional de información forestal
Guyana	3	<ul style="list-style-type: none"> - Forest carbon monitoring system - Inventario forestal nacional 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de gases de efecto invernadero
Perú	8	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema nacional de información forestal y de fauna silvestre - Sistema nacional de monitoreo de la cobertura de bosques - Sistema de alerta temprana de deforestación - Inventario de gases de efecto invernadero 	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de la cobertura forestal en la región amazónica-Perú - Deforestación y degradación forestal - Inventario de la flora y la vegetación - Inventario forestal nacional
Paraguay	3	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de monitoreo de bosques de Paraguay - Inventario forestal nacional - Monitoreo satelital de la deforestación 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional de gases de efecto invernadero
Brasil	6	<ul style="list-style-type: none"> - Proyecto de monitoreo satelital de la deforestación en los biomas brasileños - Proyecto de monitoreo satelital de la deforestación en la Amazonia legal 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de estimaciones de gases de efecto invernadero - Sistema de alerta de deforestación - Detección de deforestación en tiempo real - Inventario forestal nacional
Venezuela	3	<ul style="list-style-type: none"> - Actualización del sistema nacional de información estadística forestal - Inventario forestal nacional 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario nacional de gases de efecto invernadero
Ecuador	5	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema nacional de monitoreo del patrimonio natural - Evaluación forestal nacional - Sistema de monitoreo para la deforestación 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de administración forestal - Sistema nacional de inventario de gases de efecto invernadero
Bolivia	5	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema nacional de información y monitoreo de bosques de Bolivia - Inventario forestal nacional y programa de control de los recursos forestales de Bolivia - Sistema de identificación y sanción de quemas 	<ul style="list-style-type: none"> - Parcelas permanentes del proyecto de investigación silvicultural a largo plazo - Inventario nacional de gases efecto invernadero

Fuente: Argotty *et al.* (2019)

Anexo 4.

Tipos de tecnologías y procesos metodológicos utilizados en el monitoreo satelital en Latinoamérica y el Caribe

País	Sensores utilizados	Softwares utilizados	Datos auxiliares para el procesamiento de imágenes	Análisis de cobertura	Análisis de cambios de cobertura
Bolivia	Landsat	ARCGIS, Desarrollo en Python, ERDAS, ENVI, CLASlite		Clasificación supervisada basada en objetos, Clasificación no supervisada, clasificación manual-visual, algoritmos de clasificación	Algoritmo mezclas de firmas espectrales-TerraAmazon, detección manual-visual de cambios
Brasil	Landsat, CCD-CEBERS, DMC, LISS-3	TerraAmazon		Clasificación supervisada basada en objetos, algoritmos de clasificación, segmentadores	Algoritmo mezclas de firmas espectrales-TerraAmazon
Colombia	Landsat	ARCGIS,		Algoritmos de clasificación	CLASlite
Costa Rica	Landsat	Desarrollo en Python, ERDAS, R-software, QuantumGIS	Mapas de cobertura existentes en el país, shuttle radar topography mission, ortofotos, imágenes de alta resolución, RapidEye	Clasificación supervisada basada en objetos, algoritmos de clasificación	Superposición de mapas de cobertura
Ecuador	Landsat, STER	ARCGIS,	Mapas de precipitación, temperatura, topográficos, geología, vegetación potencial, etc.	Clasificación no supervisada, clasificación manual-visual	Superposición de mapas de cobertura
El Salvador	Landsat, RapidEye, LiDAR	ARCGIS, ERDAS	Mapas de cobertura existentes en el país, Información de campo	Clasificación supervisada basada en objetos, algoritmos de clasificación	Superposición de mapas de cobertura
Guatemala	Landsat, RapidEye	ARCGIS, Desarrollo en Python, CLASlite	Ortofotos, imágenes de alta resolución, RapidEye	Clasificación supervisada basada en objetos, clasificación supervisada basada en píxeles, algoritmos de clasificación	Superposición de mapas de cobertura
Honduras	Landsat, RapidEye	ARCGIS	Mapas de cobertura existentes en el país	Clasificación supervisada basada en objetos, algoritmos de clasificación	Google Earth Engine, CLASlite
México	Landsat, RapidEye	Desarrollo en Python	Mapas de cobertura existentes en el país, modelo de elevación digital generado en el país, inventario forestal nacional	Clasificación supervisada basada en objetos, clasificación manual-visual, análisis de escenas individuales, algoritmos de clasificación, segmentadores	iMAD-MAF, detección manual-visual de cambios

País	Sensores utilizados	Softwares utilizados	Datos auxiliares para el procesamiento de imágenes	Análisis de cobertura	Análisis de cambios de cobertura
Nicaragua	Landsat, RapidEye		Inventario forestal nacional		
Panamá	Landsat	Google Earth Engine	Ortofotos, imágenes de alta resolución, RapidEye	Google Earth Engine	Google Earth Engine, algoritmo de Universidad de Maryland
Perú	Landsat, MODIS (Terra-I, Aqua)	ARCGIS, ENVI, PCI, E-cognition	Shuttle radar topography mission, imágenes MODIS	Algoritmos de clasificación	Algoritmo de Universidad de Maryland
República Dominicana	Landsat, RapidEye	ARCGIS, desarrollo en Python, ERDAS, ENVI	Mapas de cobertura existentes en el país	Clasificación supervisada basada en objetos, clasificación no supervisada, algoritmos de clasificación	Superposición de mapas de cobertura
Surinam	Landsat, CCD-CEBERS, Alos Palsar, DMC,	ARCGIS, TerraAmazon		Clasificación supervisada basada en objetos, segmentadores	Algoritmo Mezclas de firmas espectrales-TerraAmazon

Fuente: Argotty et al. (2019)

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

ISBN: 978-9977-57-713-5

