



# APORTES TÉCNICOS DEL SISTEMA DE MONITOREO DE BOSQUES Y CARBONO A LA PROPUESTA DE PREPARACIÓN DE COLOMBIA PARA REDD+

## DATOS DE ACTIVIDAD Y FACTORES DE EMISIÓN



MINAMBIENTE



TODOS POR UN  
NUEVO PAÍS  
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN



Instituto de Hidrología,  
Meteorología y  
Estudios Ambientales

GORDON AND BETTY  
**MOORE**  
FOUNDATION

patrimonio natural  
Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas



*A Roberto Franco y Daniel Matapi,  
maestros y amigos*

**JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN**  
Presidente de la República de Colombia

**GABRIEL VALLEJO LÓPEZ**  
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**PABLO ABBA VIEIRA SAMPER**  
Viceministro de Ambiente

**OMAR FRANCO TORRES**  
Director General - IDEAM  
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

**MARÍA SARALUX VALBUENA LÓPEZ**  
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental – IDEAM

**EDITORES**  
Edersson Cabrera Montenegro  
Adriana Paola Barbosa Herrera  
Juan Fernando Phillips Bernal  
Natalia Esperanza Córdoba Camacho  
Lina María Carreño Correa

**DISEÑO DE LA CARÁTULA**  
Juan Fernando Phillips Bernal  
Grupo de Comunicaciones – IDEAM

**DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN**  
Editorial Scripto S.A.S.  
Calle 76 Bis N° 20C – 19  
Teléfono: (57-1) 7562003  
<http://www.scripto.com.co>

**ARCHIVO FOTOGRÁFICO**  
Sebastián Ramírez Echeverry

**CÍTESE DENTRO DE UN TEXTO COMO:**

Phillips *et al.* IDEAM 2014

**CÍTESE COMO:**

Phillips, J.F., Duque, A.J., Scott, C., Peña, M.A., Franco, C.A., Galindo, G., Cabrera, E., Álvarez, E. & Cárdenas, D. 2014. Aportes técnicos del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono a la propuesta de preparación de Colombia para REDD+: datos de actividad y factores de emisión. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C., Colombia. 70 pp.

Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, octubre de 2014, Bogotá D.C., Colombia.

ISBN: 978-958-8067-67-4 - Distribución Gratuita

2014, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Este trabajo fue financiado por la Fundación Gordon y Betty Moore, proyecto "Consolidación de un Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC), como soporte a la Política Ambiental y de Manejo en Colombia", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Patrimonio Natural.

**MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM**

**OMAR FRANCO TORRES**  
Director General – IDEAM

**CLEMENTINA DEL PILAR GONZÁLEZ PULIDO**  
Secretaria General – IDEAM

**CONSEJO DIRECTIVO**

**GABRIEL VALLEJO LÓPEZ**  
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**NATALIA ABELLO VIVES**  
Ministra de Transporte

**SIMÓN GAVIRIA MUÑOZ**  
Director General  
Departamento Nacional  
de Planeación- DNP

**MAURICIO PERFETTI DEL CORRAL**  
Director General  
Departamento Nacional  
de Estadísticas-DANE

**JUAN PABLO RUIZ SOTO**  
Delegado de la Presidencia  
de la República

**RAMÓN LEAL LEAL**  
Director Ejecutivo  
Asociación de Corporaciones Autónomas  
Regionales y de Desarrollo Sostenible – ASOCARS

**YANETH GIHA TOVAR**  
Directora General  
Departamento Administrativo de Ciencia,  
Tecnología e Innovación –COLCIENCIAS

**CLEMENTINA DEL PILAR GONZÁLEZ PULIDO**  
Secretaria Técnica del Consejo

**DIRECTIVAS**

**MARÍA SARALUX VALBUENA LÓPEZ**  
Subdirectora de Ecosistemas  
e Información Ambiental

**MAX ALBERTO TORO BUSTILLO**  
Subdirector (E) de Estudios Ambientales

**NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ**  
Subdirector de Hidrología

**MARÍA TERESA MARTÍNEZ GÓMEZ**  
Subdirectora de Meteorología

**CHRISTIAN FELIPE EUSCÁTEGUI COLLAZOS**  
Jefe Oficina Pronósticos y Alertas

**JAIRO CÉSAR FÚQUENE RAMOS**  
Jefe Oficina Asesora de Planeación

**BIBIANA LISSETTE SANDOVAL BÁEZ**  
Jefe (E) Grupo de Comunicaciones

**LEONARDO CÁRDENAS CHITIVA**  
Jefe Oficina de Informática

**ADRIANA PORTILLO TRUJILLO**  
Jefe Oficina Asesora Jurídica

**MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO**  
Jefe Oficina Control Interno

## **AUTORES**

Juan Fernando Phillips Bernal  
Álvaro Javier Duque Montoya  
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín  
Charles "Chip" Scott  
Servicio Forestal de los Estados Unidos  
Miguel Ángel Peña Hernández  
Carol Andrea Franco Aguilera  
Gustavo Galindo García  
Edersson Cabrera Montenegro  
Esteban Álvarez Dávila  
Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe  
Dairon Cárdenas López  
Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI

## **COORDINACIÓN Y SUPERVISIÓN**

**Edersson Cabrera Montenegro**  
Coordinador General

**Natalia Esperanza Córdoba Camacho**  
Asistente de Coordinación

**Lina María Carreño Correa**  
Apoyo Equipo Coordinación

**Carlos Alberto Noguera Cruz**  
Asistente Administrativo y Financiero

**Juan Fernando Phillips Bernal**  
Líder Temático Componente Carbono

**María Saralux Valbuena López**  
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

**Adriana Paola Barbosa Herrera**  
Coordinadora Grupo de Bosques  
Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental

## **GRUPO DE BOSQUES**

Adriana Paola Barbosa Herrera  
Claudia Patricia Olarte Villanueva  
Luis Mario Moreno Amado  
Carolina Rozo Mora

## **COLABORADORES**

Kenneth Roy Cabrera Torres  
Edwin Iván Granados Vega  
Sebastián Ramírez Echeverry  
María Liseth Rodríguez Montenegro

## **AGRADECIMIENTOS**

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), agradece de manera especial a la Fundación Gordon y Betty Moore, a Patrimonio Natural Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas y a las siguientes entidades que contribuyeron al logro de esta publicación, por el apoyo e información:

### **INSTITUCIONES**

- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)
- Área Natural Única Los Estoraques
- Center for Tropical Forest Science (CTFS)
- Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Global (CARBONO & BOSQUES)
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ)
- Conservación Internacional - Colombia (CI - Colombia)
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACA)
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS)
- Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR)
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)
- Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR)
- Corporación Autónoma Regional de la Guajira (CORPOGUAJIRA)
- Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía (CORPORINOQUIA)
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE)
- Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS)
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO)
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER)
- Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS)
- Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE)
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM)
- Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA)
- Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE)
- Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC)
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA)
- Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)
- Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO)
- Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG)
- Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ)
- Corporación Autónoma Regional del río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA)
- Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB)
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA)
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)

- Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó (CODECHOCO)
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB)
- Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y El San Jorge (CORPOMONAJA)
- Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (CORPOURABA)
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORLINA)
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial de la Macarena (CORMACARENA)
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA)
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía (CORPOAMAZONÍA)
- Dirección Territorial Amazonía (DTAM)
- Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS)
- Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF - Colombia)
- Fundación Puerto Rastrojo
- Fundación Tropenbos
- Herbario Amazónico Colombiano (COAH)
- Herbario Universidad de Antioquia (HUA)
- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH)
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neuman (IIAP)
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis (INVEMAR)
- ISAGEN S.A. E.S.P.
- Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe (JAU)
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC)
- Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN)
- Parque Nacional Natural Amacayacu
- Parque Nacional Natural Chingaza
- Parque Nacional Natural Farallones de Cali
- Proyecto Expedición Antioquia 2013, Sub-proyecto Diversidad, Dinámica y Productividad de los Bosques de Antioquia
- Santuario de Fauna y Flora Iguaque
- Santuario de Flora Orito Ingi Ande
- The Nature Conservancy (TNC - Colombia)
- Universidad de Los Andes - Departamento de Ciencias Biológicas
- Universidad del Tolima - Departamento de Ciencias Forestales
- Universidad Distrital - Pregrado en Ingeniería Forestal
- Universidad Nacional de Colombia - Departamento de Ciencias Forestales
- Universidad Nacional de Colombia - Instituto de Ciencias Naturales (ICN)

## **PERSONAS**

- María Saralux Valbuena, IDEAM
- Adriana Paola Barbosa, IDEAM
- María Claudia García, MADS
- Joost F. Duivenvoorden PhD., Universiteit van Amsterdam
- Pablo Roberto Stevenson PhD., Universidad de Los Andes
- Patricio von Hildebrand, Fundación Puerto Rastrojo
- Helene Muller-Landau PhD., Smithsonian Tropical Research Institute
- María Cristina Peñuela PhD., Universidad Nacional de Colombia
- Juan Guillermo Saldarriaga PhD., Consultor
- Craig Wayson PhD., Programa SilvaCarbon

Proyecto "Consolidación de un Sistema de Monitoreo  
de Bosques y Carbono (SMBYC), como soporte a la Política Ambiental  
y de Manejo en Colombia"

**COMITÉ TÉCNICO**

**Rodrigo Suárez Castaño**

Director de Cambio Climático  
Ministerio de Ambiente y Desarrollo  
Sostenible

**María Claudia García Dávila**

Dirección de Bosques, Biodiversidad  
y Servicios Ecosistémicos  
Ministerio de Ambiente y Desarrollo  
Sostenible

**María Saralux Valbuena López**

Subdirectora Ecosistemas e Información  
Ambiental Instituto de Hidrología,  
Meteorología y Estudios Ambientales  
IDEAM

**Max Albeto Toro Bustillo**

Subdirector (E) de Estudios Ambientales  
Instituto de Hidrología, Meteorología  
y Estudios Ambientales – IDEAM

**Paulina Arroyo**

Oficial Program Andes Amazon Initiative  
Fundación Gordon y Betty Moore

**Francisco Alberto Galán Sarmiento**

Director Ejecutivo  
Patrimonio Natural Fondo para la  
Biodiversidad y Áreas Protegidas

**Coordinación General**

Edersson Cabrera Montenegro  
Natalia Córdoba Camacho  
Lina María Carreño Correa  
Carlos Alberto Noguera Cruz

**Equipo Técnico Carbono**

Juan Fernando Phillips Bernal  
Miguel Ángel Peña Hernández

**Equipo Técnico Procesamiento**

**Digital de Imágenes**

Gustavo Galindo García  
Óscar Javier Espejo  
Juan Carlos Rubiano Rubiano  
Adriana Palacios Manrique  
Kattia Vargas Jurado  
Rosa Helena Lozano Cuevas  
Santiago Palacios Noguera  
Cristian Fabián Forero  
César Augusto Valbuena Calderón  
Juan Pablo Ramírez  
Carol Franco Aguilera  
Edwin Iván Granados  
Sonia Mireya Ortiz Camargo

**Equipo Técnico Componente  
Tecnológico**

María Liseth Rodríguez Montenegro  
Xavier Corredor Llano  
Emilio José Barrios Cárdenas  
Nelly Novoa Castro

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

<b>≥:</b>	Mayor o igual que
<b>BA:</b>	Biomasa aérea
<b>DA:</b>	Datos de actividad
<b>°C:</b>	Grados centígrados
<b>ca.:</b>	Alrededor, cerca de; del latín <i>circa</i>
<b>CAR:</b>	Corporación Autónoma Regional
<b>cm:</b>	Centímetro
<b>CMNUCC:</b>	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
<b>CO<sub>2</sub>:</b>	Dióxido de Carbono
<b>CO<sub>2</sub>e:</b>	Dióxido de Carbono equivalente
<b>COP:</b>	Conferencia de las Partes de la CMNUCC
<b>ρ:</b>	Densidad básica de la madera
<b>D:</b>	Diámetro normal medido a 1,30 cm del suelo
<b>DEM:</b>	Modelo de elevación digital
<b>e.g.:</b>	Por ejemplo; del latín <i>exempli gratia</i>
<b>ECDBC:</b>	Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono
<b>ENOS:</b>	Oscilación del sur "El Niño"
<b>ENREDD+:</b>	Estrategia Nacional para la Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradoación Forestal
<b>et al.:</b>	Y colaboradores; del latín <i>et allí</i>
<b>ETM+:</b>	Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus
<b>exp:</b>	Función exponencial
<b>FE:</b>	Factores de emisión
<b>GEI:</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>ha:</b>	Hectárea
<b>I.C.:</b>	Intervalo de confianza
<b>i.e.:</b>	Esto es; del latín <i>id est</i>
<b>IDEAM:</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>IDW:</b>	Interpolación inverso de la distancia
<b>IFN:</b>	Inventario Forestal Nacional
<b>INGEI:</b>	Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero
<b>IPCC:</b>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
<b>kg:</b>	Kilogramo
<b>ln:</b>	Logaritmo neperiano
<b>MADS:</b>	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
<b>Mg:</b>	Megagramo
<b>mm:</b>	Milímetro
<b>MO:</b>	Jardín Botánico de Missouri
<b>MRV:</b>	Monitoreo, Reporte y Verificación
<b>m:</b>	Metro
<b>m.s.n.m.:</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>PDI:</b>	Procesamiento digital de imágenes
<b>Pg:</b>	Petagramo
<b>REDD+:</b>	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradoación de bosques
<b>REL:</b>	Niveles de Referencia de Emisiones
<b>RL:</b>	Niveles de Referencia de Bosques
<b>R-PP:</b>	Propuesta de Preparación para REDD+ de Colombia
<b>SMBYC:</b>	Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono
<b>TM:</b>	Landsat Thematic Mapper
<b>USDA:</b>	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
<b>ZCIT:</b>	Zona de confluencia intertropical

# **CONTENIDO**

<b>PRESENTACIÓN .....</b>	15
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	19
<b>OBJETIVOS .....</b>	23
Objetivo general .....	23
Objetivos específicos .....	23
<b>MÉTODOS .....</b>	25
Área de estudio .....	25
Extensión del bosque y deforestación histórica .....	25
Estratificación del bosque .....	26
Compilación de los datos de campo .....	29
Preparación de los datos .....	29
Estimación de la biomasa aérea por tipo de bosque .....	31
Estimación de la biomasa total de los bosques .....	33
Emisiones netas de Dióxido de Carbono .....	34
<b>RESULTADOS .....</b>	35
Tipos de bosques y distribución de la biomasa aérea .....	35
Cambios en la cobertura boscosa .....	37
Reservas y emisiones netas .....	38
<b>CONCLUSIONES.....</b>	41
<b>NOTAS Y REFERENCIAS.....</b>	43
<b>ANEXOS.....</b>	59



## PRESENTACIÓN

Existe un creciente consenso que el aumento gradual de la temperatura global, además de ser un fenómeno climático cíclico, es el resultado del incremento de la concentración de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1] en la atmósfera, debido en gran parte a acciones antrópicas. A medida que pasan los años, crece el número de naciones, entre ellas Colombia, que buscan implementar políticas encaminadas hacia la reducción de emisiones de GEI, en especial, aquellas asociadas con el sector forestal [2]. Estas iniciativas, en comparación con otras medidas de mitigación, parecen ser los mejores mecanismos desde un punto de vista costo-efectivo para alcanzar dicho objetivo, proporcionando de manera adicional, cobeneficios relacionados con el mantenimiento de servicios ecosistémicos y la conservación de la biodiversidad [3].

En la decimoprimer Conferencia de las Partes (COP) [4], la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) reconoció la reducción de emisiones de GEI relacionadas con la deforestación y degradación de bosques (REDD), como un mecanismo válido para apoyar los esfuerzos de mitigación contra el calentamiento global y el cambio climático. A partir de la COP 15 [5], el concepto de REDD se amplió para incluir, además de la reducción de emisiones asociadas con estos procesos, la conservación, el manejo sostenible de los bosques y el incremento de las existencias forestales de Carbono (REDD+). La implementación de este mecanismo contempla la creación de un sistema económico, todavía no definido, mediante el cual las Partes (i.e. países) que no están incluidas en el Anexo I de la CMNUCC [6], podrán recibir beneficios económicos por actuaciones verificables en donde se demuestre una reducción de las emisiones y un incremento de los contenidos de Carbono en tierras de vocación forestal. De esta manera, se busca premiar a las personas, comunidades y naciones, dependiendo de los niveles de implementación y de los escenarios de anidamiento, que reduzcan las emisiones de GEI, en especial de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), asociadas con la deforestación y degradación de los bosques e incentiven, a la vez, la implementación de medidas que permitan el incremento de las reservas de Carbono forestal. Es por esto que se considera que REDD+ tiene el potencial de reducir significativamente las emisiones a un bajo costo, dentro de un lapso corto de tiempo y, al mismo tiempo, contribuir a la reducción de la pobreza y al desarrollo sostenible [7].

Dentro de este contexto, la CMNUCC solicita a las Partes que deseen implementar REDD+, la generación de los llamados Niveles de Referencia de Emisiones (REL) y/o de Bosques (RL), que sirven como puntos de referencia para evaluar los logros alcanzados con REDD+ [8]. Aunque la diferencia entre REL y RL no siempre es clara [9], el REL se aplica, en general, a las actividades que conducen a la generación de emisiones, es decir, la deforestación y la degradación de tierras forestales (bajo REDD), mientras los RL incluyen estos procesos, así como las actividades plus (e.g. conservación y aumento de reservas, gestión sostenible), que pueden dar lugar a remociones de Carbono adicionales [10]. La CMNUCC planteó que su construcción puede realizarse empleando un enfoque por pasos (step-wise approach, en inglés), en donde los REL/RL propuestos de manera inicial pueden ser modificados (o ajustados) a medida que se incorporen datos con menor incertidumbre, se cuente con información más detallada o se incluyan otros compartimientos adicionales, entre otros [11]. No obstante, es claro que en todos los casos se debe contar con una estimación precisa de las emisiones y remociones de CO<sub>2</sub> (i.e. factores de emisión, FE) asociadas con la deforestación, la regeneración y la degradación de la cubierta forestal (i.e. datos de actividad, DA) [7].

En el marco de la elaboración de la Propuesta de Preparación para REDD+ (R-PP) de Colombia [12], el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) identificó una serie de necesidades, vacíos y preguntas que condicionan la implementación del mecanismo. En relación con la creación de los REL/RL, algunos de los retos identificados se asocian, de manera particular, con la generación de FE específicos para el país, la definición, validación e implementación de un protocolo de teledetección que permita monitorear los cambios en la extensión del bosque en el tiempo, la caracterización de los motores y agentes de deforestación y degradación, entre otros. En este sentido, el proyecto “Consolidación de un Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC), como soporte a la Política Ambiental y de Manejo en Colombia” busca contribuir al R-PP generando un conjunto de FE y DA necesarios para estimar las reservas de Carbono y las emisiones de CO<sub>2</sub>, a partir de la identificación de un método de análisis que reduzca la incertidumbre que rodea este tipo de ejercicios y que tenga en cuenta las características de la información disponible para realizarla. A su vez, busca sentar las bases técnicas y científicas que permitan fortalecer la capacidad institucional del país para apoyar proyectos REDD+, que sean auditables por organismos internacionales, útiles en las negociaciones que se deriven en los acuerdos internacionales (e.g. post Kioto) y que sigan las recomendaciones realizadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

El trabajo “Aportes técnicos del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono a la propuesta de preparación para REDD+ de Colombia: datos de actividad y factores de emisión”, incorpora las recomendaciones de la Orientación de las Buenas Prácticas del IPCC [13, 14] y del Sourcebook de REDD [15], y fue elaborado a partir de análisis estadísticos empleando información suministrada por instituciones gubernamentales y no gubernamentales, e investigadores nacionales e internacionales.

El ejercicio plantea la necesidad de generar una metodología estandarizada que permita obtener estimaciones comparables con otros estudios, nacionales e internacionales, que sirvan de referencia para avanzar en la construcción del R-PP. Asimismo la información que se genere será de especial utilidad en la implementación del mecanismo REDD+ en Colombia, la Estrategia Nacional para la Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradoación Forestal (ENREDD+), la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) y el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI).

De esta manera se espera que el trabajo:

- i) Ayude a reducir la incertidumbre técnica y científica que rodea las estimaciones de Carbono, al proponer métodos estandarizados para su estimación a escala nacional,
- ii) Suministre las bases técnicas y científicas que puedan ser replicables en varios proyectos auditables por organismos internacionales, y
- iii) Permita obtener estimaciones nacionales con niveles más detallados, conforme con lo establecido por el IPCC en su Orientación de las Buenas Prácticas.



## INTRODUCCIÓN

El incremento de la temperatura global se ha atribuido al aumento de las emisiones de GEI, en especial de CO<sub>2</sub> [3, 16, 17]. Los bosques tropicales ofrecen grandes oportunidades de mitigación, ya que al actuar como sumideros pueden disminuir la concentración de GEI en la atmósfera [18-22]. La deforestación y la degradación en el trópico contribuyen con una tercera parte de las emisiones globales de GEI [23-26], representando la segunda fuente más importante de GEI después de la combustión de combustibles fósiles [27]. Por tanto, la implementación de mecanismos que propendan por la conservación, aumento y gestión sostenible de las reservas de Carbono almacenadas en ellos (e.g. REDD, REDD+), se considera como una opción costo-efectiva para mitigar el calentamiento global y el cambio climático [3, 28-31]. La implementación de estas medidas de mitigación hace necesario cuantificar la distribución del Carbono almacenado en los bosques y conocer su variación en el espacio y a lo largo del tiempo [3, 32]. Sin embargo, la información disponible para hacerlo aún es limitada [14, 33-37]. Esto, sumado a la necesidad de contar con métodos fiables y prácticos que permitan su Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), se ha convertido en uno de los puntos críticos para la implementación de estrategias de reducción de GEI en países en vías de desarrollo [38, 39]. Es por esto que una mejor comprensión de dichos cambios y las variables subyacentes que los determinan, es vital con el fin de generar estimaciones fiables en el contexto de iniciativas de secuestro de Carbono y mitigación del cambio climático [40, 41].

En los bosques, el Carbono se encuentra almacenado en la biomasa (áerea y subterránea), la necromasa, la hojarasca y en el suelo [3, 15]. En proyectos REDD+ es imperativo contar con una estimación de las reservas contenidas en la biomasa aérea (BA) [3], aunque es recomendable realizar la estimación en los cuatro compartimientos restantes, si se cuenta con los recursos económicos, técnicos y logísticos para ello [15, 38, 42, 43]. La BA puede cuantificarse en campo por medio de la cosecha directa de especímenes; éste método genera cálculos con baja incertidumbre, pero acarrea una alta demanda logística y grandes inversiones económicas. También puede ser estimada a partir de modelos alométricos que utilicen variables dendrométricas (e.g. diámetro, altura) medidas en campo [3]. No obstante estos dos métodos presentan limitaciones con el fin de generar información en áreas geográficas extensas y remotas. Por este motivo, se recomienda mapear su distribución integrando datos obtenidos en campo e información derivada de sensores

remotos [15, 44-46]. Los mapas generados pueden ser utilizados para monitorear y evaluar los cambios de las reservas de Carbono debidas a la deforestación y degradación de los bosques, así como los efectos de las actividades plus [47-49]. Es por esto que su utilidad ha sido ampliamente reconocida en el ámbito académico [24, 50-55] y por órganos internacionales relacionados con el cambio climático (e.g. CMNUCC, IPCC). Sin embargo, esta aproximación aún genera controversias, debido a la falta de datos confiables que permitan calibrar y verificar los resultados obtenidos y a las discrepancias que surgen al comparar los datos generados en campo con las predicciones que arrojan los modelos desarrollados a partir de información satelital [56-58]. De ahí que sea necesario realizar mejoras sustanciales a las metodologías existentes antes de utilizarlas de forma rutinaria a escala regional, nacional o continental [59, 60]. Esta tarea es compleja si se tiene en cuenta que la distribución de la BA no es homogénea en el espacio, en particular en los bosques tropicales [61-63].

En este sentido, se ha propuesto utilizar métodos convencionales para estimar las reservas de Carbono almacenadas en este compartimiento [64], empleando datos provenientes de Inventarios Forestales Nacionales (IFN). No obstante, en países que no han implementado este tipo de iniciativas (e.g. Colombia), se hace necesario integrar información derivada de inventarios forestales, caracterizaciones vegetales o estudios florísticos que abarquen una amplia gama de condiciones (e.g. paisajes, tipos de bosque, etc.) [65]. Sin importar la procedencia de los datos, dichos métodos plantean la necesidad de estimar la BA de los individuos (i.e. árboles) utilizando ecuaciones alométricas, escalar los resultados a nivel de la unidad de análisis (i.e. parcela) y, de manera posterior, utilizar esta información para estimar la BA del estrato o tipo de bosque en el cual se realizó el muestreo [13, 14]. Por tanto, se requiere en primera instancia, elegir un conjunto de ecuaciones alométricas, entre el amplio espectro disponible para el pantrópico [66], que permita estimar la BA de manera precisa para el área de estudio. Una vez se defina lo anterior, es necesario estratificar los bosques siguiendo una clasificación (i.e. leyenda) que genere estimados confiables, minimice la incertidumbre y faculte escalar las existencias de Carbono estimadas para un conjunto de parcelas determinado, al tipo de bosque en donde estaban ubicadas [13, 14]. A grandes rasgos, la estratificación se refiere a la división de cualquier paisaje heterogéneo en distintos estratos con base en algún factor de agrupación común [15]. Para el caso particular de las iniciativas REDD+, se recomienda emplear estratificaciones que utilicen variables diagnósticas (e.g. régimen de precipitación, temperatura, tipo de suelo, topografía, etc.) que se relacionen con las existencias de Carbono y sus variaciones en escalas locales y regionales [15, 18, 67-72]. Sin embargo, la comprensión del papel que juegan estas variables a nivel nacional aún es insipiente, especialmente en países como Colombia, en donde existe una gran variedad de condiciones (e.g. climáticas, edáficas, etc.) y de tipos de vegetación [73-79]. Esta situación es un inconveniente serio para la implementación de REDD+, puesto que la CMNUCC exige a las Partes la construcción de REL/RL en dicha escala de trabajo [8]. Además de los retos antes mencionados, el caso particular de Colombia plantea un desafío adicional, dado que los datos disponibles

para conducir la estimación no provienen de estudios realizados bajo un protocolo estandarizado de muestreo (e.g. las parcelas varían en tamaño). En este sentido, es crucial definir cómo integrarlos de manera apropiada, identificando un método de análisis que considere las particularidades de la información empleada y reduzca la incertidumbre asociada con la estimación.

En este contexto, el presente trabajo tiene como propósito generar un conjunto de FE y DA necesarios para estimar las reservas de Carbono para el año 2013 y las emisiones netas de CO<sub>2</sub> ocurridas durante el periodo 1990-2013, examinando el efecto que tiene el método de integración de los datos, las ecuaciones alométricas y la estratificación ambiental o definición de los tipos de bosque, sobre la estimación de la BA para los bosques del país. Con esto el SMBYC busca proveer información que permita avanzar en la comprensión de su funcionamiento, brindando a su vez información al R-PP, ENREDD+, ECDBC y el INGEI de Colombia.



## OBJETIVOS

### Objetivo general

Generar un conjunto de FE y DA que sirvan de referencia para avanzar en la construcción del R-PP y en la implementación del mecanismo REDD+ en Colombia, las estrategias ENREDD+ y ECDBC, y el INGEI, empleando herramientas técnicas, metodológicas y estándares que puedan ser replicables en un futuro en el marco de proyectos REDD y que sirvan de referencia para avanzar en la construcción del R-PP.

### Objetivos específicos

- i) Desarrollar un método analítico que tenga en cuenta las características de la información disponible para realizar la estimación de las reservas de Carbono almacenadas en la BA y las emisiones netas de CO<sub>2</sub> en Colombia.
- ii) Identificar un método analítico que permita integrar información generada bajo diferentes protocolos de muestreo, que considere las particularidades de la información y reduzca la incertidumbre asociada con la estimación.
- iii) Definir la leyenda de estratificación que se empleará para realizar la estimación de las reservas de Carbono a escala nacional, de manera que permita obtener resultados confiables y con una baja incertidumbre asociada.
- iv) Seleccionar los modelos alométricos que permitan estimar la BA de manera apropiada y que responda al tipo de información que se dispone para estimar las reservas de Carbono almacenadas en los bosques del país.
- v) Estimar las reservas de Carbono almacenadas en la BA en los bosques de Colombia en el año 2013 y las emisiones netas de CO<sub>2</sub> durante ocurridas durante el periodo 1990-2013.



## MÉTODOS

### Área de estudio

Colombia se encuentra ubicada en la esquina noroeste de Suramérica, entre las latitudes 12° norte y 4° sur y entre los 67° y 79° de longitud oeste, con costas sobre el mar Caribe y el océano Pacífico. El país tiene una superficie total soberana de 207.040.800 ha, de las cuales 55% corresponde a su porción continental y 45% a sus dominios marítimos [80]. Comparte fronteras con Panamá, Venezuela, Brasil, Perú y Ecuador, y límites marítimos con Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Jamaica, República Dominicana y Haití. Los bosques se extienden sobre 52% de su territorio continental y representan aproximadamente 6% de las coberturas boscosas de Suramérica [81]. Los paisajes dominantes en el país son colinas (35%), montañas (26%), los valles y llanuras (20%); el restante 19% está representado por piedemontes, mesetas y superficies aplanamiento [82]. Las condiciones climáticas son diversas. De acuerdo con IDEAM [83], 91% de Colombia presenta un clima cálido ( $> 24^{\circ}\text{C}$ ), 5% un clima templado (18-24°C) y 2% clima frío (12-18°C). El restante 4%, tiene un clima muy frío (6-12°C), extremadamente frío (1,5-6°C) o se encuentra bajo condiciones glaciales ( $< 1,5^{\circ}\text{C}$ ). La distribución de la precipitación no es homogénea y fluctúa gracias a la topografía accidentada del país u otros meso y macro-factores (e.g. ZCIT, dipolos, ENOS, etc.). No obstante, se observa que, en general, tanto la parte norte del país como en los Andes el régimen de precipitación es bimodal, mientras que al este de los Andes el régimen es monomodal y al oeste no existe una estacionalidad marcada, con ligeras diferencias entre la precipitación a nivel mensual [83].

### Extensión del bosque y deforestación histórica

En las últimas cinco décadas, y especialmente desde el lanzamiento del primer satélite del programa Landsat, se han desarrollado múltiples opciones de productos de sensores remotos aplicados en general a la observación de la Tierra y en particular al monitoreo de las áreas boscosas [84-96]. Asimismo, los avances informáticos han conducido a la generación de nuevas herramientas tecnológicas (software y hardware), llevado a una amplia diseminación en el uso de imágenes de sensores remotos para dicho propósito, especialmente a nivel nacional. En este contexto, el

SMBYC del IDEAM desarrolló un protocolo para la generación información sobre la distribución, extensión y cambios en la cobertura boscosa en Colombia [97], a partir del procesamiento digital de imágenes (PDI) Landsat (TM y ETM+), con una resolución espacial de 30 m, conforme a una escala espacial 1:100.000, empleando procesos altamente automatizados y técnicas tradicionales de PDI. El protocolo incluye, en términos generales, la selección, adquisición y descarga de las imágenes [98], su corrección geométrica, radiométrica y atmosférica, su almacenamiento e integración para generar, de manera posterior, un compuesto (i.e. mosaico) nacional lo más libre de nubes posible para el año de referencia. A partir de la aplicación de dicho protocolo se obtuvo el mapa de cobertura boscosa para el año 2013 y los mapas de cambios de esta cobertura en el territorio continental del país para los períodos 1990-2000, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2012 y 2012-2013. La tasa de deforestación ( $R$ ) se calculó utilizando la siguiente expresión reportada en Puyravaud [99]:

$$R = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{A_2}{A_1} \quad (\text{Eq.1})$$

En donde,  $t_1$  y  $t_2$  representan el año inicial y final del periodo de referencia,  $A_1$  y  $A_2$  el área de bosque inicial y final (expresada en ha), respectivamente.

## Estratificación del bosque

A la fecha, una de las leyendas de estratificación más utilizadas para estimar la BA en bosques tropicales emplea la precipitación como única variable diagnóstica. Ésta leyenda, propuesta por Chave et al. [36], se basa en el número de meses secos por año, siendo un mes seco en el cual la evapotranspiración total excede la precipitación. Siguiendo esta clasificación los principales tipos de bosques definidos son: i) seco (S): bosques que experimentan cinco o más meses al año con déficit hídrico; en el trópico, por lo general, lo anterior ocurre en lugares donde la precipitación anual total es inferior a 1.500 mm; ii) húmedos (H): representados por bosques estacionales que tienen un déficit de agua entre uno y cuatro meses consecutivos al año; por lo general esta condición se produce en lugares donde la precipitación anual total varía entre 1.500 mm y 3.500 mm; y iii) pluviales (P): bosques no estacionales que tienen un déficit máximo de un mes al año; por lo general se produce en lugares en donde la precipitación total anual excede 3.500 mm. No obstante, un considerable número de trabajos [100-107] han examinado la distribución de la BA y su relación con parámetros meteorológicos que covarian con la altitud (e.g. temperatura, radiación solar, presión atmosférica, radiación UV-B) y otros factores climáticos (e.g. humedad, precipitación, estacionalidad) que responden a variaciones regionales o locales (e.g. orografía, vientos) [108-110]. Éstos proponen que la reducción de la temperatura del aire, sumado a alteraciones en la disponibilidad de nutrientes y la composición química del suelo, puede afectar las tasas de crecimiento de los árboles y la estructura de la vegetación [110, 111], conduciendo a una disminución en la BA. Es por esto que se espera que la inclusión de dichas variables diagnósticas, en conjunto con la

precipitación, permita estimar de manera más apropiada la BA y las reservas de Carbono almacenadas en los bosques.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente estudio se consideraron tres leyendas adicionales para estratificar los bosques de Colombia. La primera sigue la clasificación bioclimática de Holdridge et al. [112], en la cual la vegetación se estratifica utilizando como variable diagnóstica la evapotranspiración potencial, expresada en función del equilibrio entre la precipitación y la temperatura anual (Tabla 1). En la segunda, de acuerdo con lo planteado en la clasificación de Caldas-Lang [113, 114], la vegetación se estratifica en relación con la temperatura media anual y el cociente (i.e. factor Lang) resultante de dividir la precipitación total anual por la temperatura media anual (Tabla 2). La última, propuesta por Emmanuel de Martonne [115], se conduce empleando un índice de aridez [116] que se calcula a partir de la precipitación total y temperatura media anual, la precipitación del mes más seco del año y la temperatura registrada en dicho mes (Tabla 3). Las últimas tres leyendas, adaptadas para Colombia por IDEAM [83], se seleccionaron dado que son ampliamente utilizadas en estudios florísticos, silviculturales y en evaluaciones ambientales a nivel nacional e internacional. Los mapas de estratificación se generaron a partir de los promedios climatológicos de la normal climatológica 1981-2010 reportada por IDEAM [117] y el modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de la NASA (misión SRTM). En la construcción de las salidas cartográficas para la temperatura media mensual y anual se siguió a Díaz-Almanza [118], mientras que la precipitación mensual y anual para se utilizó una interpolación utilizando método del inverso de la distancia (IDW) siguiendo a IDEAM [83].

**Tabla 1. Estratificación de los bosques siguiendo la clasificación bioclimática propuesta por Holdridge et al. (1971), adaptada para Colombia por IDEAM (2005), en la cual la vegetación se estratifica utilizando como variable diagnóstica la evapotranspiración potencial, expresada en función del equilibrio entre la precipitación total y la temperatura media anual.**

Tipo de bosque	Temperatura (°C)	Precipitación (mm/año)
Muy seco tropical (ms-T)	>24,0	501-1.000
Seco tropical (s-T)	>24,0	1.001-2.000
Húmedo tropical (h-T)	>24,0	2.001-4.000
Muy húmedo tropical (mh-T)	>24,0	4.001-8.000
Pluvial tropical (p-T)	>24,0	>8.001
Seco premontano (s-PM)	18,0-24,0	501-1.000
Húmedo premontano (h-PM)	18,0-24,0	1.001-2.000
Muy húmedo premontano (mh-PM)	18,0-24,0	2.001-4.000
Pluvial premontano (p-PM)	18,0-24,0	>4.001
Seco montano bajo (s-Mb)	12,0-18,0	501-1.000
Húmedo montano bajo (h-MB)	12,0-18,0	1.001-2.000
Muy húmedo montano bajo (mh-MB)	12,0-18,0	2.001-4.000
Pluvial montano bajo (p-MB)	12,0-18,0	>4.001
Húmedo montano (h-M)	6,0-12,0	501-1.000
Muy húmedo montano (mh-M)	6,0-12,0	1.001-2.000
Pluvial montano (p-M)	6,0-12,0	>2.001

Tabla 2. Estratificación de los bosques siguiendo la clasificación bioclimática de Caldas-Lang adaptada para Colombia por IDEAM (2005), en la cual la vegetación se estratifica en relación con la temperatura media anual y el cociente resultante de dividir la precipitación total anual por la temperatura media anual. Aunque la clasificación no lo considera, se observa que el bosque puede extenderse en las franjas de páramo, en particular en lugares en donde la temperatura es mayor a 6°C.

Vegetación potencial	Temperatura (°C)	Factor Lang (P/T)
Bosque cálido desértico (CD)	>24,0	0,0-20,0
Bosque cálido árido (CA)	>24,0	20,1-40,0
Bosque cálido semiárido (Csa)	>24,0	40,1-60,0
Bosque cálido semihúmedo (CsH)	>24,0	60,1-100,0
Bosque cálido húmedo (CH)	>24,0	100,1-160,0
Bosque cálido superhúmedo (CSH)	>24,0	>160,0
Bosque templado árido (TA)	17,5-23,9	20,1-40,0
Bosque templado semiárido (Tsa)	17,5-23,9	40,1-60,0
Bosque templado semihúmedo (Tsh)	17,5-23,9	60,1-100,0
Bosque templado húmedo (TH)	17,5-23,9	100,1-160,0
Bosque templado superhúmedo (TSH)	17,5-23,9	>160,0
Bosque frío árido (FA)	12,0-17,4	20,1-40,0
Bosque frío semiárido (Fsa)	12,0-17,4	40,1-60,0
Bosque frío semihúmedo (Fsh)	12,0-17,4	60,1-100,0
Bosque frío húmedo (FH)	12,0-17,4	100,1-160,0
Bosque frío superhúmedo (FSH)	12,0-17,4	>160,0
Páramo bajo semiárido (Pbsa)	7,0-11,9	40,1-60,0
Páramo bajo semihúmedo (PBsh)	7,0-11,9	60,1-100,0
Páramo bajo húmedo (PBH)	7,0-11,9	100,1-160,0
Páramo bajo superhúmedo (PBSH)	7,0-11,9	>160,0
Páramo alto húmedo (PAH)	1,5-6,9	100,1-160,0
Páramo alto superhúmedo (PASH)	1,5-6,9	>160,0

Tabla 3. Estratificación de los bosques siguiendo la clasificación bioclimática propuesta por Martonne (1923), adaptada para Colombia por IDEAM (2005), en la cual la vegetación se estratifica empleando un índice de aridez que se calcula a partir de la precipitación total y temperatura media anual, la precipitación del mes más seco del año y la temperatura registrada en dicho mes.

Tipo de bosque	Índice aridez
Árido (F)	0,0-5,0
Semiárido (E)	5,1-10,0
Subhúmedo (D)	10,1-20,0
Húmedo (C)	20,1-35,0
Lluvioso estacional (B)	35,1-100,0
Lluvioso (A)	>100,0

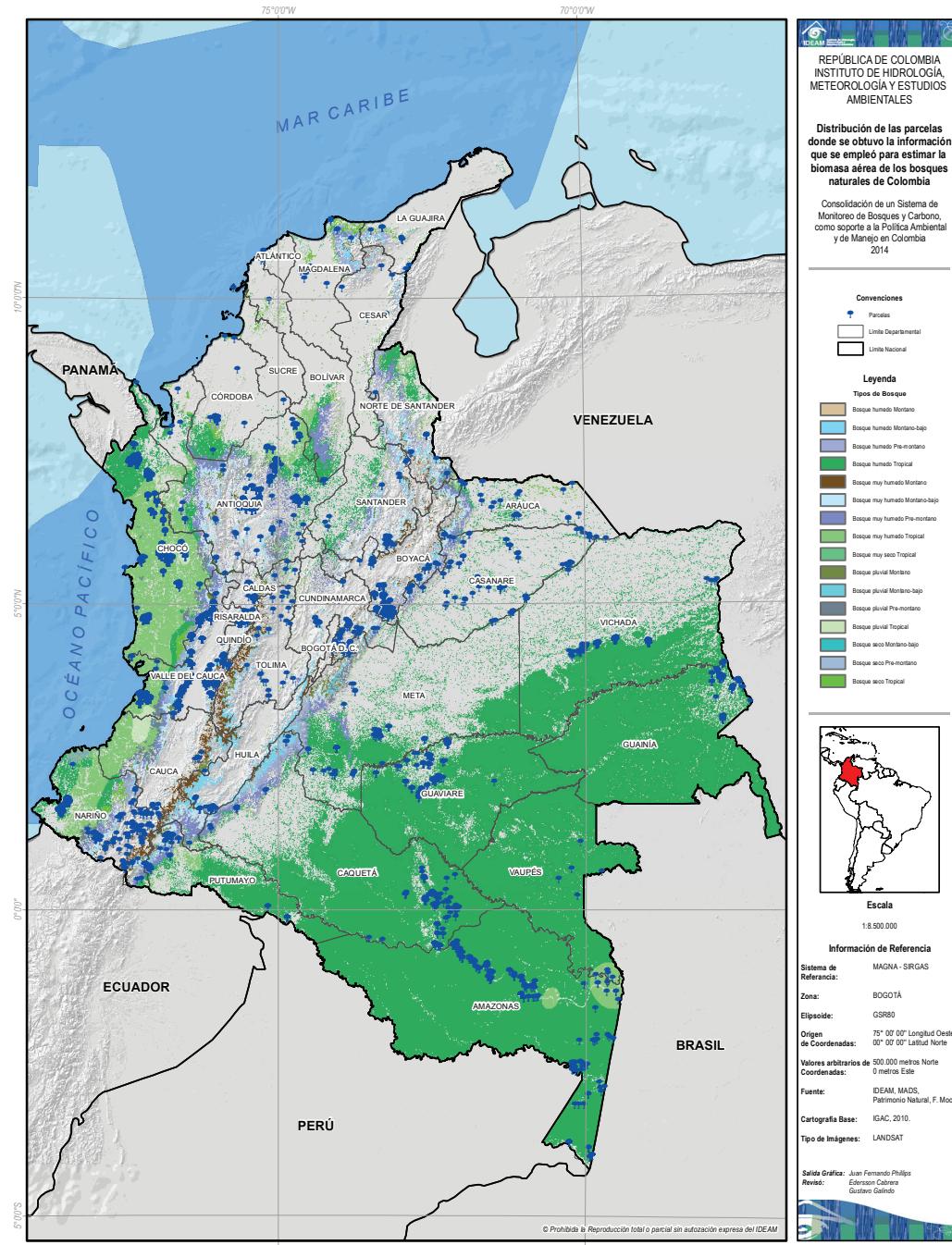
## Compilación de los datos de campo

Los datos empleados para estimar las reservas de Carbono almacenadas en la BA, provinieron del establecimiento de 4.981 parcelas en bosques de Colombia entre 1990 y 2014 (Figura 1). El tamaño de las parcela varió entre 0,02 ha y 1,50 ha. El área total muestreada fue ca. 1.190 ha. Aunque la información utilizada en el presente estudio se generó utilizando diferentes protocolos de muestreo, corresponde al conjunto más grande y representativo disponible en la actualidad para estimar la BA de los bosques del país. Los datos fueron compilados en el repositorio del SMBYC del IDEAM, en donde se almacenaron en tablas separadas los atributos propios de las parcelas y los individuos. Se utilizó la aplicación en línea i Plant Collaborative [119] para realizar la estandarización de la nomenclatura taxonómica [120]. Dicha herramienta permite la verificación simultánea de hasta 5.000 nombres científicos, bajo el sistema de clasificación APG III (APG 2009), utilizando datos de referencia provenientes del Jardín Botánico de Missouri (MO), del Global Compositae Checklist y del catálogo de plantas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El repositorio incluye 583.612 registros de individuos con diámetro normal (D) mayor o igual a 10 cm, 4.065 especies, 990 géneros y 183 familias de plantas. A cada registro se le asignó la densidad básica de la madera ( $\rho$ ) de la especie a la que pertenece, a partir de datos disponibles en la literatura científica [121, 122]. En los casos en los cuales no fue posible aplicar el procedimiento anterior, se utilizó la  $\rho$  del género o familia. A los individuos sin identificación botánica se les asignó el promedio de la  $\rho$  de todas las especies registradas en la parcela.

## Preparación de los datos

Se estimó la BA de cada árbol (expresada en kg) utilizando tres conjuntos de ecuaciones alométricas (Tabla 4) en donde la BA se expresa en función del D y la  $\rho$  [123]. Éstos fueron desarrollados por Chave et al. [36] (en adelante Chave I), Álvarez et al. [124] (en adelante Álvarez) y Chave et al. [125] (en adelante Chave II). Los modelos Chave I fueron construidos a partir de datos de 2.410 árboles ( $D \geq 5$  cm) cosechados en bosques tropicales alrededor del mundo (no incluye datos provenientes de Colombia), mientras que los de Álvarez se generaron con información de 631 árboles ( $D \geq 10$  cm) cosechados en Colombia. Éstos últimos permiten estimar de manera más exacta la BA en bosques del país, que cuando se emplean los modelos pantropicales comúnmente utilizados en este tipo de estudios [124]. El modelo Chave II emplea datos de 4.004 árboles ( $D \geq 5$  cm) cosechados en 58 sitios de estudio (África, el sudeste de Asia, Australia y América Latina, entre ellos Colombia) e incluye un parámetro relacionado con el estrés climático (E), que varía en función de la temperatura, el déficit hídrico y la estacionalidad de precipitación. Las ecuaciones se asignaron en función del tipo de bosque (i.e. estrato) en el cual está ubicada la parcela; lo anterior se realizó por medio de una interpolación con los mapas de estratificación generados en el presente estudio. Cuando no se contó

**APORTES TÉCNICOS DEL SISTEMA DE MONITOREO  
DE BOSQUES Y CARBONO A LA PROPUESTA  
DE PREPARACIÓN DE COLOMBIA PARA REDD+**



**Figura 1. Mapa distribución de las parcelas.**

con un modelo alométrico específico para un tipo de bosque dado, la asignación se llevó a cabo de acuerdo con lo propuesto por Yepes et al. [126]. La BA de cada parcela se obtuvo de la sumatoria de la BA de los individuos registrados en ella, excluyendo palmas, lianas y helechos (i.e. hábitos no-arbóreos). El valor se escaló a megagramos por hectárea (Mg/ha). Al excluir de la estimación los individuos no-arbóreos, se encontró que la BA de 180 parcelas (correspondientes a ca. 27 ha muestreadas) disminuyó significativamente ( $\geq 20\%$ ). Se analizó la distribución diamétrica de los individuos registrados en cada parcela y se halló que de ellas, 167 (ca. 14 ha) presentan distribuciones anómalas al compararlas con otras ubicadas en el mismo tipo de bosque. En estos lugares, por lo general, no se registraron individuos en categorías inferiores (i.e. 10-30 cm), mientras que en otros están ausentes en clases intermedias (i.e. 30-60 cm). Es posible que el aprovechamiento prolongado del bosque conduzca a la aparición de este tipo de distribuciones truncadas o discontinuas [127-131]. No obstante, es posible que también puedan deberse a errores en la toma de datos. Por último, se encontró que en 398 parcelas (ca. 67 ha) la diferencia absoluta entre la altitud reportada y la interpolada era mayor o igual a 100 m.s.n.m. Por principio de precaución, se excluyó la información proveniente de estas 687 parcelas en la estimación de la BA para los bosques en los cuales estaban ubicadas. Por tanto, los análisis se realizaron con datos generados a partir del establecimiento de un total de 4.294 parcelas, que representan 1.089 ha muestreadas.

## Estimación de la biomasa aérea por tipo de bosque

Las variaciones en el tamaño de la parcela y el tamaño de la muestra pueden conducir a diferentes niveles de incertidumbre en la estimación de la biomasa [132, 133]. Por tanto, en el presente estudio la BA para cada tipo de bosque se estimó empleando tres aproximaciones diferentes. En la primera, la BA se estimó como la media aritmética de las parcelas establecidas en el tipo de bosque  $h$ . En la segunda, se empleó un ponderador por el inverso de la varianza [134], en donde la BA para el bosque  $h$  ( $\bar{y}_h$ ) se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{y}_h = \frac{\sum w_i \bar{y}_i}{w_h} \quad (\text{Eq.2})$$

En donde,  $w_i = 1 / \text{var}(\bar{y}_i)$ ,  $\text{var}(\bar{y}_i) = \frac{(\sum y_{ij}^2) - n_i \bar{y}_i^2}{n_i(n_i - 1)}$ , y  $w_h = \sum w_i$ . La varianza asociada a  $\bar{y}_h$  se obtuvo así:

$$\text{var}(\bar{y}_h) = \frac{1}{w_h} \left[ 1 + \frac{4}{w_h^2} \sum \frac{1}{n_i} (w_i \{w_h - w_i\}) \right] \quad (\text{Eq.3})$$

En donde,  $n_i$  es el número de parcelas de tamaño  $i$  establecidas en el bosque  $h$ . En todos los casos se requirió un mínimo de tres parcelas de tamaño  $i$  y diez parcelas

**Tabla 4.** Ecuaciones alométricas desarrolladas por Chave et al. (2005), Álvarez et al. (2012) y Chave et al. (2014), que fueron utilizadas para estimar la biomasa aérea para los bosques de Colombia. En los modelos la biomasa aérea (BA) se expresa en función del diámetro normal (D) de los individuos y la densidad básica de la madera ( $\rho$ ).

Autor	Tipo de bosque	Ecuación alométrica
Chave et al. 2005	Seco	$BA = \rho \exp \left( -0.657 + (1.784 \ln(D)) + (0.207 (\ln(D))^2) - (0.028 (\ln(D))^3) \right)$
	Húmedo	$BA = \rho \exp \left( -1.499 + (2.148 \ln(D)) + (0.207 (\ln(D))^2) - (0.028 (\ln(D))^3) \right)$
	Pluvial	$BA = \rho \exp \left( -1.239 + (1.980 \ln(D)) + (0.207 (\ln(D))^2) - (0.028 (\ln(D))^3) \right)$
Álvarez et al. 2012	Seco tropical	$BA = \exp \left( 3.652 - (1.697 \ln(D)) + (1.169 (\ln(D))^2) - (0.122 (\ln(D))^3) + (1.285 \ln(\rho)) \right)$
	Húmedo tropical	$BA = \exp \left( 2.406 - (1.289 \ln(D)) + (1.169 (\ln(D))^2) - (0.122 (\ln(D))^3) + (0.445 \ln(\rho)) \right)$
	Pluvial tropical	$BA = \exp \left( 1.662 - (1.114 \ln(D)) + (1.169 (\ln(D))^2) - (0.122 (\ln(D))^3) + (0.331 \ln(\rho)) \right)$
	Húmedo premontano	$BA = \exp \left( 1.960 - (1.098 \ln(D)) + (1.169 (\ln(D))^2) - (0.122 (\ln(D))^3) + (1.061 \ln(\rho)) \right)$
	Pluvial montano bajo	$BA = \exp \left( 1.836 - (1.255 \ln(D)) + (1.169 (\ln(D))^2) - (0.122 (\ln(D))^3) - (0.222 \ln(\rho)) \right)$
	Pluvial montano	$BA = \exp \left( 3.130 - (1.536 \ln(D)) + (1.169 (\ln(D))^2) - (0.122 (\ln(D))^3) + (1.767 \ln(\rho)) \right)$
Chave et al. 2014	Todos los tipos	$BA = \exp \left( -1.802 - (0.976_E) + (0.976 \ln(\rho)) + (2.673 \ln(D)) - (0.029 (\ln(D))^2) \right)$

por tipo de bosque para calcular la varianza [135]. El intervalo de confianza ( $IC_{\bar{y}_h}$ ) de la media ponderada se calculó como sigue:

$$IC_{\bar{y}_h} = \bar{y}_h \pm \sqrt{var(\bar{y}_h)} t_{0,05, n_h-1} \quad (\text{Eq.4})$$

En donde,  $n_h$  es el número de parcelas establecido en el bosque  $h$ . El error de muestreo ( $SE_h$ ) se obtuvo de la siguiente manera:

$$SE_h = 100 \frac{\sqrt{var(\bar{y}_h)}}{\bar{y}_h} \quad (\text{Eq.5})$$

Se empleó esta ponderación dentro de cada tipo de bosque  $h$ , para penalizar los valores promedios asociados a un tamaño de parcela determinado que mostraran una alta incertidumbre independiente del tamaño de la muestra.

En la tercera, se empleó un estimador de razón (sampled area ratio, en inglés) [136] en el cual el peso asignado a  $\bar{y}_f$  depende directamente del área muestreada con el tamaño de parcela en relación con el área total de la muestra en el bosque  $h$ , penalizando de esta manera los valores promedios resultantes de bajas intensidades de muestreo. En esta aproximación  $\bar{y}_h$  se calculó así:

$$\bar{y}_h = \sum \frac{a_i \bar{y}_i}{a_h} \quad (\text{Eq.6})$$

En donde  $a_i$  es el área (expresada en ha) muestreada con las parcelas de tamaño  $i$ , y  $a_h$  es el área total muestreada en el bosque  $h$ . La varianza asociada al promedio ponderado se obtuvo así:

$$var(\bar{y}_h) = \sum \left( \frac{a_i}{a_h} \right)^2 var(\bar{y}_i) \quad (\text{Eq.7})$$

$IC_{\bar{y}_h}$  y  $SE_h$  y se calcularon empleando las ecuaciones Eq.4 y Eq.5, respectivamente.

## Estimación de la biomasa total de los bosques

La BA promedio para los bosques de Colombia se estimó de la siguiente manera:

$$\bar{y}_f = \sum \frac{A_h \bar{y}_h}{A_f} \quad (\text{Eq.8})$$

En donde  $A_h$  es el área que ocupa el bosque en el país (expresada en ha), y  $A_f$  es la extensión total del bosque para el año 2013. La varianza asociada a  $\bar{y}_f$ , el intervalo de confianza y el error de muestreo se calcularon así:

$$var(\bar{y}_f) = \sum \left( \frac{A_h}{A_f} \right)^2 var(\bar{y}_h) \quad (\text{Eq.9})$$

$$IC_{\bar{y}_f} = \bar{y}_f \pm \sqrt{\frac{var(\bar{y}_f)}{(h-1)}} t_{0,05, h-2} \quad (\text{Eq.10})$$

$$SE_f = 100 \sqrt{\frac{var(\bar{y}_f)}{(h-1)}} \frac{\bar{y}_h}{\bar{y}_f} \quad (\text{Eq.11})$$

Finalmente, la BA total potencial de los bosques del país se estimó como sigue:

$$\hat{y}_f = A_f \bar{y}_f = \sum A_h \bar{y}_h \quad (\text{Eq.12})$$

Mientras que la varianza y el intervalo de confianza se calcularon de la siguiente forma:

$$var(\hat{y}_f) = A_f^2 var(\bar{y}_f) \quad (\text{Eq.13})$$

$$IC_{\hat{y}_f} = \hat{y}_f \pm \sqrt{\frac{var(\hat{y}_f)}{(h-1)}} t_{0,05, h-2} \quad (\text{Eq.14})$$

Para calcular los contenidos de Carbono almacenados en los bosques de Colombia, se utilizó el factor de 0,47 con relación a la BA, mientras que para evaluar la cantidad de CO<sub>2</sub>e almacenado en la BA, se multiplicó la cantidad de Carbono por un factor de 3,67 [13, 14].

## Emisiones netas de Dióxido de Carbono

Las emisiones netas de CO<sub>2</sub>e en Colombia durante los períodos de referencia, corresponden a la diferencia (i.e. resta) entre las emisiones brutas de CO<sub>2</sub>e relacionadas con la deforestación y las remociones de CO<sub>2</sub>e asociadas con la regeneración del bosque [137]. Éstas a su vez, se obtuvieron al multiplicar el área que cambió en cada estrato durante el periodo de análisis, resultado de la pérdida o la recuperación de las coberturas boscosas, por el promedio ponderado de CO<sub>2</sub>e estimado para el respectivo tipo de bosque. Se asignó el promedio ponderado nacional a aquellos boques para los cuales no se contaba con un valor de referencia. Debido a la falta de información, no se incluyó en los cálculos la fracción de biomasa oxidada, descompuesta y quemada. Los FE generados en el presente estudio, no consideran el CO<sub>2</sub>e potencialmente almacenado en los tipos de cobertura del suelo (i.e. coberturas no-boscosas) a los cuales cambió el bosque o de los cuales éste se regeneró.

## RESULTADOS

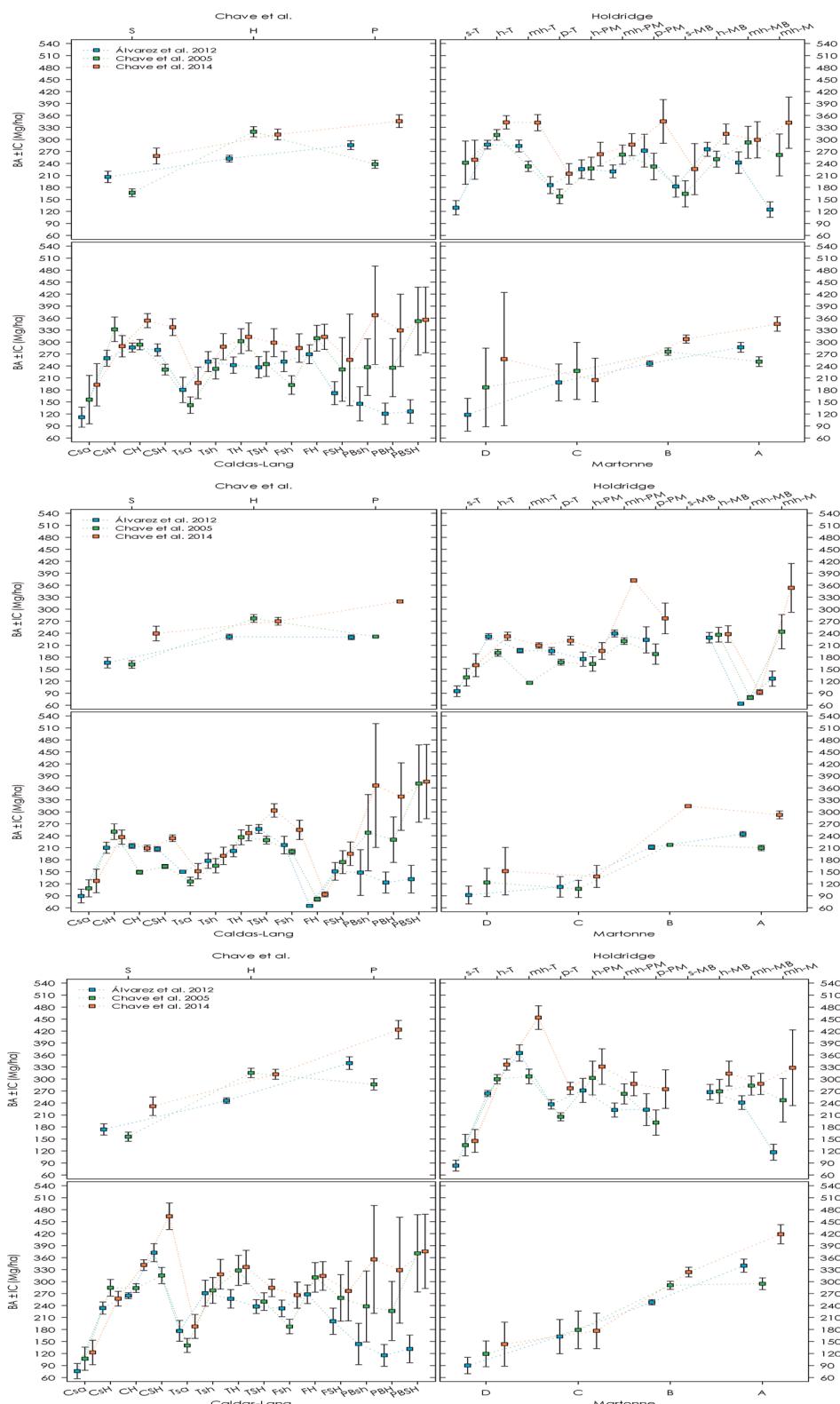
### Tipos de bosques y distribución de la biomasa aérea

La BA de los tipos de bosque varía de acuerdo con las ecuaciones alométricas que se utilicen para realizar la estimación (ver Anexos). En general, se observa que el uso de los modelos pantropicales Chave I y Chave II acarrea una sobreestimación de la BA de los bosques de Colombia y conduce, en adición, a un aumento de la incertidumbre (i.e. intervalo de confianza), cosa nada deseable en este tipo de ejercicios. Algo similar también se evidenció cuando se evaluó el efecto que tiene el método de integración de los datos en la estimación. En este sentido, los resultados muestran que la BA de los bosques tiende a ser menor cuando se utiliza la ponderación por el inverso de la varianza, que al emplear las dos aproximaciones restantes. Asimismo, su uso conlleva a una marcada disminución de la incertidumbre frente a lo que se obtiene al utilizar el promedio aritmético (sin ponderación).

No obstante, las diferencias son sutiles respecto a los resultados que se desprenden al usar el estimador de razón. Los errores de muestreo en todos casos son bajos (<20%), en particular al utilizar las ponderaciones. En cuanto a la distribución de la BA, los patrones obtenidos son relativamente similares bajo las tres aproximaciones utilizadas para calcular el promedio por tipo de bosque, aunque se evidencian cambios en el comportamiento y en la magnitud en algunos de los estratos considerados (Figura 2). Se observa que al estratificar los bosques siguiendo la propuesta de Chave et al. [36] y Martonne [115], la BA tiende a aumentar de manera concorrente con la precipitación, lo cual concuerda con lo reportado en otros estudios realizados en bosques tropicales [100-111]. Aun así, al considerar las leyendas de Holdridge et al. [112] y Caldas-Lang [113, 114] la BA se distribuye de manera bimodal, lo que puede responder a variaciones climáticas a lo largo del gradiente altitudinal, que pueden limitar la fotosíntesis, la transpiración, la absorción de nutrientes, y otros procesos funcionales de los bosques, que determinan su arquitectura y estructura [138, 139].

Asimismo, es posible que dicho patrón también esté relacionado con la dominancia de especies que alcanzan grandes tamaños y que poseen a su vez altas densidades de madera. La dominancia del roble de tierra fría (*Quercus humboldtii*), familias

APORTES TÉCNICOS DEL SISTEMA DE MONITOREO  
DE BOSQUES Y CARBONO A LA PROPUESTA  
DE PREPARACIÓN DE COLOMBIA PARA REDD+



**Figura 2.** Distribución de la biomasa aérea empleando diferentes leyendas de estratificación, aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas. Se muestra lo obtenido bajo la aproximación de la media aritmética (izquierda), el inverso de la varianza (centro) y el estimador de razón (derecha).

como las Lauráceas, algunas Lecythidáceas del género *Eschweilera*, Podocarpáceas, Magnoliáceas y Juglandáceas (e.g. *Juglans neotropica*), entre otros, permitirían explicar los valores de BA registrados en los bosques de montaña [140]. Por esta razón, es necesario continuar con investigaciones posteriores, que permitan comprender con mayor precisión cómo inciden los factores climáticos (e.g. temperatura y precipitación) y edáficos en el comportamiento y la distribución espacial de la BA en Colombia.

## Cambios en la cobertura boscosa

La aplicación del protocolo de PDI muestra que en 2013 el bosque se extendía sobre ca. 59.134.663 ha, cubriendo 51,8% del territorio continental de Colombia, distribuido principalmente (86%) en zonas bajas (< 800 m.s.n.m.) en donde la temperatura media anual supera los 24°C. Asimismo permitió establecer que entre 1990-2013 se perdieron en el país ca. 6.095.312 ha de bosque (Figura 3), que representan una deforestación anual de 265.014 ha/año, con un periodo (2000-2005) de alta deforestación (315.597 ha/año), dos (1990-2000 y 2005-2010) en donde permaneció estable (265.441 ha/año y 281.969 ha/año, respectivamente) y dos períodos (2010-2012 y 2013-2013) en donde la pérdida de coberturas boscosas decreció apreciablemente (166.070 ha/año y 120.934 ha/año, respectivamente). La tasa de deforestación registrada entre 1990-2013 (= 0,40%) evidencia que Colombia no puede considerarse como un país con baja deforestación, ya que supera el umbral propuesto en el mecanismo REDD [141].

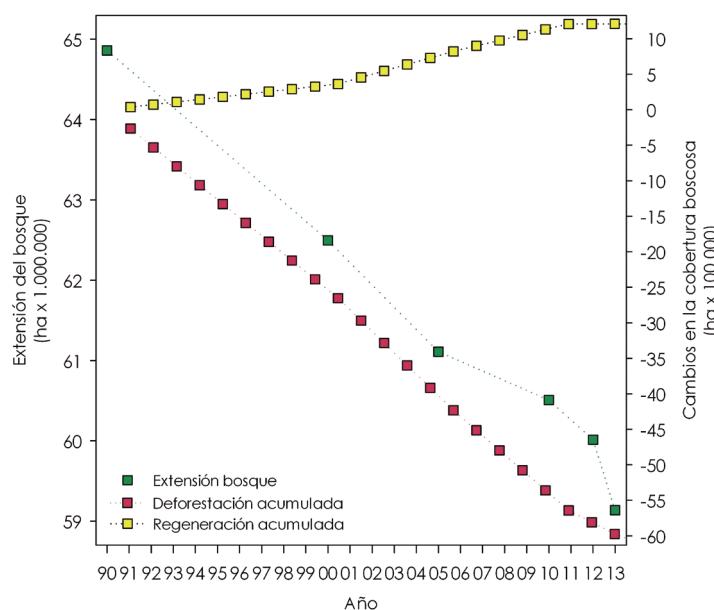


Figura 3. Extensión del bosque en Colombia y cambios acumulados ocurridos durante el periodo 1990-2013.

De igual manera, se observa que durante los 23 años de análisis se regeneraron en Colombia ca. 1.209.079 ha (52.569 ha/año) de bosque, de las cuales 30% se recuperaron entre 1990-2000 (36.310 ha/año), 38% entre 2000-2005 (91.541 ha/año) y 32% entre 2005-2010 (77.371 ha/año). En el periodo 2010-2012 se regeneraron 1.202 ha (601 ha/año) y 213 ha entre 2012-2013. El cambio neto (pérdida neta) entre 1990-2013 ascendió a 4.886.233 ha (212.445 ha/año).

## Reservas y emisiones netas

El promedio nacional de Carbono almacenado en la BA de los bosques en Colombia varió entre 79,1 Mg C/ha y 168,9 Mg C/ha. Los resultados obtenidos muestran que las reservas de Carbono oscilan entre 4,7 Pg C y 10,0 Pg C, que representan un potencial que varía entre 17,1 Pg CO<sub>2</sub>e y 36,6 Pg CO<sub>2</sub>e que no han sido emitidos a la atmósfera. Los valores generados en el presente estudio se encuentran dentro del rango reportado por Gibbs et al. [38] y son similares a los estimados por Cardona et al. [142] y Anaya et al. [143] para bosques de Colombia.

Por otra parte, se observa que las emisiones brutas entre 1990-2013 variaron entre 1,9 Pg CO<sub>2</sub>e y 3,5 Pg CO<sub>2</sub>e, mientras que por efectos de la regeneración natural se removieron entre 0,4 Pg CO<sub>2</sub>e y 0,7 Pg CO<sub>2</sub>e, lo cual conduce a que las emisiones netas oscilen entre 1,5 Pg CO<sub>2</sub>e y 2,8 Pg CO<sub>2</sub>e (Anexo 5). Como se observa en la (Figura 4), al emplear la leyenda de Chave et al. [36] se generan estimados para el promedio nacional, las reservas actuales, las emisiones brutas y netas con una alta incertidumbre asociada, sin importar el conjunto de ecuaciones alométricas empleadas para estimar la BA o el método de integración de los datos. En el caso de la clasificación de Martonne [115] los resultados muestran que la incertidumbre asociada al promedio nacional y las reservas actuales varía de acuerdo con la aproximación utilizada para integrar los datos, siendo baja cuando se utiliza la aproximación de la media aritmética, moderada al emplear la ponderación por el inverso de la varianza y alta al usar el estimador de razón. Con las estratificaciones de Holdridge et al. [112] y Caldas-Lang [113, 114] se obtiene una alta certidumbre para las estimaciones realizadas, aunque solo con la ponderación por el inverso de la varianza los valores obtenidos son menores y por ende más conservadores.

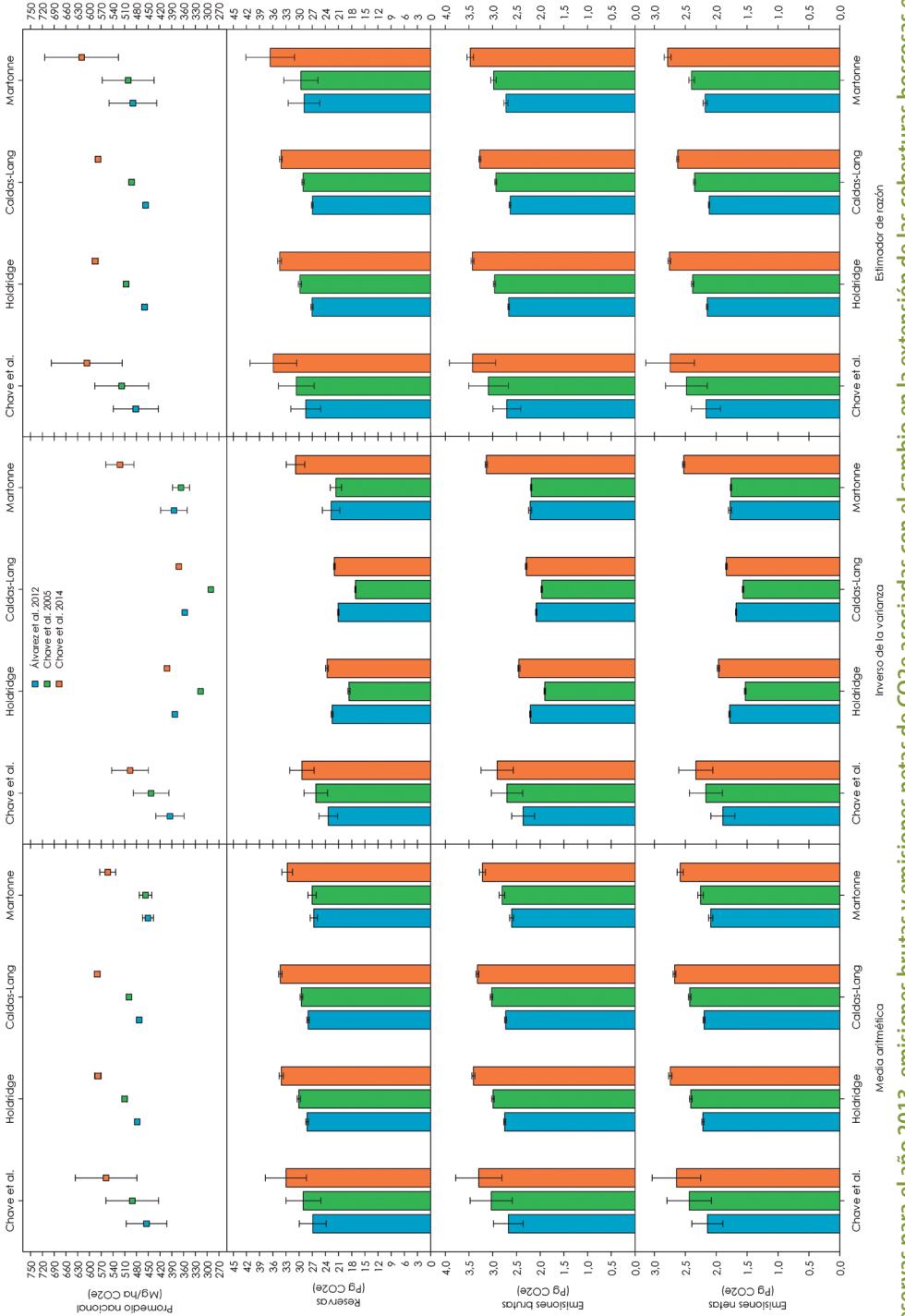


Figura 4. Reservas para el año 2013, emisiones brutas y emisiones netas de CO<sub>2</sub> asociadas con el cambio en la extensión de las coberturas boscosas en Colombia durante el período 1990-2013, estimadas a partir de diferentes leyendas de estratificación, aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas.



## CONCLUSIONES

El IPCC ha sido enfático en señalar la importancia de determinar una línea base sobre las reservas y emisiones de Carbono que cumpla con dos requisitos principales, que sea conservadora y que tenga una baja incertidumbre asociada. Lo anterior es relevante cuando se quiere acceder a beneficios económicos que se desprendan de la implementación del mecanismo REDD. No obstante, hay que recordar que lo anterior es una recomendación, ya que los REL/RL que adopten las naciones responderán a decisiones políticas internas, la cuales posiblemente buscarán aumentar la remuneración que se obtenga por las acciones verificables que conduzcan a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio para los diferentes tipos de bosque y para el bosque a escala nacional, ponen de manifiesto la bondad de emplear las ponderaciones para estimar la BA y las emisiones, ya que conduce a una disminución de la incertidumbre. Sin embargo, al comparar las dos aproximaciones, queda claro que el inverso de la varianza es un método que genera estimaciones mucho más conservadoras, puesto que da mayor peso y credibilidad a los conjuntos de datos que presenten menor variabilidad. En general, se observa que la variabilidad aumenta con el uso de datos generados a partir del establecimiento de parcelas pequeñas. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Yepes et al. (en prep.), en donde a partir de modelaciones se encontró que la media e incertidumbre asociada con las estimaciones tiende a disminuir a medida que aumenta el tamaño de la parcela.

No obstante, es importante tener en cuenta que aunque este patrón podría variar según las características espaciales de la distribución de los lugares de muestreo, en el presente estudio fue el patrón determinante teórica y empíricamente. En cuanto a las estratificaciones, se observa que los resultados más consistentes se obtuvieron al utilizar las leyendas de Holdridge et al. [112] y Caldas-Lang [113, 114]. Sin embargo, teniendo en cuenta que la primera es una clasificación ampliamente utilizada en estudios nacionales e internacionales, puede ser favorable su adopción para conducir la estimación de la BA y las emisiones en Colombia, dado que la metodología que se utilice debe facilitar la interpretación y entendimiento de los resultados cuando estos sean auditados por terceros. A su vez, al emplear esta clasificación es posible que los

resultados obtenidos para Colombia puedan en un futuro servir de valores de referencia para las estimaciones Tier 1 que realicen otros países tropicales.

Finalmente, frente a uso de los diferentes conjuntos de ecuaciones alométricas, es claro que los modelos de Álvarez son los más apropiados para realizar la estimación de la BA, no solo porque generan estimaciones conservadoras, con baja incertidumbre asociada, sino también porque fueron desarrollados con árboles cosechados únicamente en Colombia. Esto último es importante, ya que los modelos pantropicales de Chave incluyen información proveniente de África, el sudeste de Asia y Australia, cosa favorable en estimaciones globales, pero que puede inducir a errores de estimación y distorsionar los patrones de distribución de la BA en escalas regionales o nacionales. En síntesis, se observa que la adopción de un método de estimación que utilice la ponderación por el inverso de la varianza, la estratificación de Holdridge et al. [112] y los modelos de Álvarez satisface los requerimientos propuestos por el IPCC [14] y pueden servir para generar un conjunto de FE que sirvan de referencia para avanzar en la construcción del R-PP y en la implementación del mecanismo REDD+ en Colombia, las estrategias ENREDD+ y ECDBC, y el INGEI. Aún así, es claro que la decisión sobre cuál de las aproximaciones adoptará el país, hasta que pueda actualizar su REL/RL con datos provenientes de la puesta en marcha del IFN, provendrá del ámbito político y responderá a las posiciones adoptadas en negociaciones bilaterales y otros aspectos que escapan del contorno técnico del SMBYC.

## NOTAS Y REFERENCIAS

[1] Entre éstos, el Dióxido de Carbono, el Metano y el Óxido Nitroso, son los que influyen de manera determinante en el calentamiento se la superficie terrestre. En adición, son los gases que interactúan con la biosfera terrestre, que pueden tener en ella su fuente o sumidero. La expresión sumidero se refiere a la existencia de un flujo neto desde la atmósfera al sistema terrestre, mientras que la expresión fuente significa un flujo desde el sistema hacia la atmósfera.

[2] Las emisiones de GEI del sector forestal no provienen únicamente de actividades relacionadas con el aprovechamiento forestal, sino que en buena medida se deben a procesos asociados con la transformación de tierras con vocación forestal (i.e. deforestación) hacia otros tipos de usos del suelo, destinados, en gran parte, al desarrollo de actividades extractivas (e.g. minería), de actividades agropecuarias o de proyectos de infraestructura.

[3] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2007. Climate change: the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1075 pp.

[4] Montreal (Canadá), 2005.

[5] Copenhague (Dinamarca), 2009.

[6] Las Partes que están en el Anexo I se consideran países industrializados. Éstos acceden a reducir sus emisiones por debajo de las realizadas en 1990. Si no pueden llevarlo a cabo, deben comprar créditos de emisión o invertir en medidas de conservación en otros países.

[7] MERIDIAN INSTITUTE. 2011. Guidelines for REDD+ Reference Levels. Principles and Recommendations. Meridian Institute.

[8] CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (CMNUCC). 2011. Draft decision on guidance on systems for providing information on how safeguards are addressed and respected and modalities relating to forest

reference emission levels and forest reference levels as referred to in decision 1/CP.16, appendix I COP 17 decisions.

[9] PLUGGE, D. 2012. Capabilities and deficiencies of terrestrial forest inventory systems in the assessment of forest degradation in the scope of REDD+. PhD. dissertation. Universität Hamburg. 104 pp.

[10] CONRAD, K. 2009. PNG Views on Reference Emission Levels and Reference Levels, Bonn. Expert Meeting on Methodological Issues relating to Reference Emission Levels and Reference Levels.

[11] HEROLD, M., VERCHOT, L., ANGELSEN, A., MANIATIS, D. & BAUCH, S. 2012. A step-wise framework for setting REDD+ forest reference emission levels and forest reference levels. InfoBrief (CIFOR) 52: 1-8.

[12] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). 2013. Propuesta de Preparación para REDD+ (R-PP) de Colombia, versión 8.0. 30 de Septiembre de 2013. Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF), Programa de Colaboración de las Naciones Unidas para Reducir las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación Forestal en los Países en Desarrollo (ONU-REDD). 242 pp. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co>.

[13] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Published by the Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan.

[14] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.

[15] GOFC-GOLD. 2009. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting, GOFC-GOLD Report version COP14-2, 48. GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.

[16] KIRSCHBAUM, M.U.F. 2000. Forest growth and species distribution in a changing climate. Tree Physiology 20: 309-322.

[17] KIRSCHBAUM, M.U.F. 2003. Can trees buy time? An assessment of the role of vegetation sinks as part of the global carbon cycle. Climatic Change 58: 47-71.

[18] DIXON, R.K., BROWN, S., HOUGHTON, R.A., SOLOMON, A.M., TREXLER, M.C. & WISNIEWSKI, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science 263: 185-190.

[19] PENG, C.H. & APPS, M.J. 1999. Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes. *Ecological Modelling* 122(3): 175-193.

[20] SCHOLES, R.J. & NOBLE, I.R. 2001. Storing carbon on land. *Science* 294: 1012-1013.

[21] ZHAO, M.S., HEINSCH, F.A., NEMANI, R.R. & RUNNING, S.W. 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment* 95(2): 164-176.

[22] LU, X.-T., YIN, J.-X., JEPSEN, M.R. & TANG, J.W. 2010. Ecosystem carbon storage and partitioning in a tropical seasonal forest in Southwestern China. *Forest Ecology and Management* 260(10): 1798-1803.

[23] FEARNSIDE, P.M. & LAURANCE, W.F. 2004. Tropical deforestation and greenhouse gas emissions. *Ecological Applications* 14: 982-986.

[24] HOUGHTON, R.A. 2005. Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions. En: Moutinho, P. & Schwartzman, S. (Eds.), *Tropical Deforestation and Climate Change*. Belem, IPAM. pp. 13-21.

[25] ACHARD, F., DEFRIES, R., EVA, H., HANSEN, M., MAYAUX, P. & STIBIG, H.J. 2007. Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environmental Research Letters* 2: 045022.

[26] OLANDER, L.P., GIBBS, H.K., STEININGER, M., SWENSON, J.J. & MURRAY, B.C. 2008. Reference scenarios for deforestation and forest degradation in support of REDD: a review of data and methods. *Environmental Research Letters* 3: 025011.

[27] DENMAN, K.L., BRASSEUR, G., CHIDTHAISONG, A., CIAIS, P., COX, P.M., DICKINSON, R.E., HAUGLUSTAINE, D., HEINZE, C., HOLLAND, E., JACOB, D., LOHMANN, U., RAMACHANDRAN, S., DA SILVA DIAS, P.L., WOFSY, S.C. & ZHANG, X. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. En: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 499-587.

[28] DEFRIES, R., HANSEN, M., TOWNSHEND, J.R.G., JANETOS, A.C. & LOVELAND, T.R. 2000. A new global 1-km data set of percent tree cover derived from remote sensing. *Global Change Biology* 6: 247-254.

[29] ZHANG, X.-Q. & XU, D. 2003. Potential carbon sequestration in China's forest. *Environmental Science and Policy* 6(5): 421-432.

- [30] KINDERMANN, G., OBERSTEINER, M., SOHNGEN, B., SATHAYE, J., ANDRASKO, K., RAMETSTEINER, E., SCHLAMADINGER, B., WUNDER, S. & BEACH, R. 2008. Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 10302-10307.
- [31] MURRAY, B.C., LUBOWSKI, R. & SOHNGEN, B. 2009. Including International Forest Carbon Incentives in a United States Climate Policy: Understanding the Economics. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University.
- [32] BROWN, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134, Rome, Italy.
- [33] CLARK, D.A., BROWN, S., KICKLIGHTER, D.W., CHAMBERS, J.Q., THOMLINSON, J.R., NI, J. & HOLLAND, E.A. 2001. Net primary production in tropical forest: an evaluation and synthesis of existing data. *Ecological Applications* 11: 371-384.
- [34] CLARK, D.A. 2004. Sources or sinks? The response of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 359: 477-491.
- [35] MALHI, Y. & PHILLIPS, O.L. 2004. Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 359: 549-555.
- [36] CHAVE, J., ANDALO, C., BROWN, S., CAIRNS, A., CHAMBERS, J.Q., FOLSTER, H., FROMARD, F., HIGUCHI, N., KIRA, T., LESCURE, J.P., NELSON, B.W., OGAWA, H., PUIG, H., RIERA, B. & YAMAKURA, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87-9.
- [37] DJOMO, A.N., KNOHL, A. & GRAVENHORST, G. 2011. Estimation of total ecosystem carbon pools distribution and carbon biomass current annual increment of moist tropical forest. *Forest Ecology and Management* 261: 1448-1459.
- [38] GIBBS, H.K., BROWN, B., NILES, J.O. & FOLEY, J.A. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2: 045023.
- [39] GOETZ, S., ACHARD, F., JOOSTEN, H., KANAMARU, H., LEHTONEN, A., MENTON, M., PETROKOFSKY, G., PULLIN, A.S. & WATTENBACH, M. 2010. Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. *Collaboration for Environmental Evidence protocol 09-016 (SR77)*.

[40] CLARK, D.A. 2002. Are tropical forests an important carbon sink? Reanalysis of the long-term plot data. *Ecological Applications* 12: 3-7.

[41] PHILLIPS, O.L., MALHI, Y., VINCETI, B., BAKER, T., LEWIS, S.L., HIGUCHI, N., LAURANCE, W.F., NÚÑEZ, V.P., VÁSQUEZ, M.R., LAURANCE, S.G., FERREIRA, L.V., STERN, M.M., BROWN, S. & GRACE, J. 2002. Changes in the biomass of tropical forests: evaluating potential biases. *Ecological Applications* 12: 576-587.

[42] BIOCARBON. 2008. Methodology for Estimating Reductions of GHG Emissions from Mosaic Deforestation. RED-NM-001, Version 01. 111 pp.

[43] INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO AMAZONAS (IDESAM). 2008. Methodology for Estimating Reductions of Greenhouse Gases Emissions from Frontier Deforestation (Mod). RED-NM-002, Version 01. 127 pp.

[44] HOUGHTON, R., LAWRENCE, K., HACKLER, J. & BROWN, S. 2001. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: A comparison of estimates. *Global Change Biology* 7: 731-746.

[45] PATENAUXE G.L., MILNE, R. & DAWSON, T.P. 2005. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: Reporting to the Kyoto Protocol, *Environmental Science & Policy* 8: 161-178.

[46] LU, D. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1297-1328.

[47] CAMPBELL, B. 2009. Beyond Copenhagen: REDD plus, agriculture, adaptation strategies and poverty. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 19: 397-399.

[48] LUCAS, R., ARMSTON, J., FAIRFAX, R., FENSHAM, R., ACCAD, A. & CARREIRAS, J. 2010. An evaluation of the ALOS PALSAR L-band backscatter-above ground biomass relationship Queensland, Australia: Impacts of surface moisture condition and vegetation structure. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 3(4): 576-593.

[49] SAATCHI, S.S., HARRIS, N.L., BROWN, S.S., LEFSKYD, M., MITCHARD, E.T.A., SALASF, W., ZUTTA, B.R., BUERMANN, W., LEWIS, S.L., HAGEN, S., PETROVAC, S., WHITEH, L., SILMANI, M. & MOREL, A. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 9899-9904.

- [50] FALKOWSKI, P., SCHOLES, R., BOYLE, E., CANADELL, J., CANFIELD, D. & ELSER, J. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290(5490): 291-296.
- [51] SCHIMEL, D., HOUSE, J., HIBBARD, K., BOUSQUET, P., CIAIS, P. & PEYLIN, P. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414(6860): 169-172.
- [52] SCHULZE, E. 2006. Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences* 3(2): 147-166.
- [53] HEIMANN, M. & REICHSTEIN, M. 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451: 289-292.
- [54] LE QUERE, C., RAUPACH, M., CANADELL, J., MARLAND, G., BOPP, L. & CIAIS, P. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2: 831-836.
- [55] LOARIE, S., ASNER, G. & FIELD, C. 2009. Boosted carbon emissions from Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters* 36:L14810, doi: 10.1029/2009GL037526.
- [56] HOUGHTON, R.A., HALL, F. & GOETZ, S.J. 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research* 114: G00E03.
- [57] MITCHARD, E.T.A., SAATCHI, S.S., LEWIS, S.L., FELDPAUSCH, T.R., GERARD, F.F., WOODHOUSE, I.H. & MEIR, P. 2011. Comment on A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environmental Research Letters* 6.
- [58] MITCHARD, T.R.F. BRIENEN, R.J.W., LOPEZ-GONZALEZ, G., MONTEAGUDO, A., BAKER, T.R., LEWIS, S.L., LLOYD, J., QUESADA, C.A., GLOOR, M., TER STEEGE, H., MEIR, P., ALVAREZ, E., ARAUJO-MURAKAMI, A., ARAGÃO, L.E.O.C., ARROYO, L., AYMARD, G., BANKI, O., BONAL, D., BROWN, S., BROWN, F.I., CERÓN, C.E., MOSCOSO, V.C., CHAVE, J., COMISKEY, J.A., CORNEJO, F., CORRALES MEDINA, M., DA COSTA, L., COSTA, F.R.C., et al. 2014. Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Global Ecology and Biogeography*, doi: 10.1111/geb.12168.
- [59] BACCINI, A., FRIEDL, A.M.A., WOODCOCK, C.E. & WARBINGTON, R. 2004. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophysical Research Letter* 31: L10501.
- [60] DEFRIES, R., ACHARD, F., BROWN, S., HEROLD, M., MURDIYARSO, D., SCHLAMM-DINGER, B. & DE SOUZA JR., C. 2007. Earth observations for estimating greenhouse

gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental Science & Policy* 10: 385-394.

[61] ACHARD, F., DEFRIES, R., EVA, H., HANSEN, M., MAYAUX, P. & STIBIG, H.J. 2007. Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environmental Research Letters* 2: 045022.

[62] ASNER, G.P., POWELL, G.V.N., MASCARO, J., KNAPP, D.E., CLARK, J.K., JACOBSON, J., KENNEDY-BOWDOIN, T., BALAJI, A., PAEZ-ACOSTA, G., VICTORIA, E., SECADA, L., VALQUI, M. & HUGHES, R.F. 2010. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 16738-16742.

[63] MELACK, J.M. & HESS, L.L. 2010. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. En: Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Schöngart, J. & Parolin, P. (Eds.), *Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management*. Springer, Berlin. pp. 43-60.

[64] QURESHI, A., PARIVA, R.B. & HUSSAIN, S.A. 2012. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. *Environmental Science & Policy* 16: 81-89.

[65] FANG, J.Y., WANG, G.G., LIU, G.H. & XU, S.L. 1998. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass–volume relationships. *Ecological Applications* 8(4): 1084-1091.

[66] NAVAR, J. 2009. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science* 66: 208, doi:10.1051/forest/2009001.

[67] CLARK, D.B. & CLARK, D.A. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management* 137: 185-198.

[68] BAKER, T.R., PHILLIPS, O.L., MALHI, Y., ALMEIDA, S., ARROYO, L., DI FIORE, A., ERWIN, T., KILLEEN, T.J., LAURANCE, S.G., LAURANCE, W.F., LEWIS, S.L., LLOYD, J., MONTEAGUDO, A., NEILL, D.A., PATINO, S., PITMAN, N.C.A., SILVA, M. & VASQUEZ-MARTINEZ, R. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10: 545-562.

[69] DEWALT, S.J. & CHAVE, J. 2004. Structure and biomass of four lowland Neotropical forests. *Biotropica* 36: 7-19.

[70] VIEIRA, S.A., CAMARGO, P.B., SELHORST, D., SILVA, R., HUTYRA, L., CHAMBERS, J.Q., BROWN, I.F., HIGUCHI, N., SANTOS, J., WOFSY, S.C., TRUMBORE, S.E. & MARTINELLI, L.A. 2004. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. *Oecologia* 140: 468-479.

- [71] PIAO, S.L., FANG, J.Y., ZHU, B. & TAN, K. 2005. Forest biomass carbon stocks in China over the past 2 decades, estimation based on integrated inventory and satellite data. *Journal of Geophysical Research* 110: G01006, doi: 10.1029/2005JG000014.
- [72] YANG, Y.H., MOHAMMAT, A., FENG, J.M., ZHOU, R. & FANG, J.Y. 2007. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry* 84: 131-141.
- [73] CUATRECASAS, J. 1958. Aspectos de la Vegetación Natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 10(40): 221-264.
- [74] CLEEF, A.M. 1981. The vegetation of the Páramos of the Colombian Cordillera Oriental. En: Cramer, J. (Ed.), *Dissertationes Botanicae* 61. 320 pp.
- [75] MONASTERIO, M & SARMIENTO, L. 1991. Adaptive radiation of Espeletia in the cold Andean tropics. *Trends in Ecology and Evolution* 6: 387-391.
- [76] HERNÁNDEZ-CAMACHO, I. & SÁNCHEZ-PÁEZ, H. 1992a. Biomas terrestres de Colombia. En: Halffter, G. (Ed.), *La Diversidad Biológica de Iberoamérica I. Acta Zoológica Mexicana, Volumen especial*. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México. pp. 153-174.
- [77] HERNÁNDEZ-CAMACHO, I., HURTADO-GUERRA, A., ORTIZ-QUIJANO, R. & WALSCHBURGER, T. 1992b. Unidades biogeográficas de Colombia. En: Halffter, G. (Ed.), *La Diversidad Biológica de Iberoamérica I. Acta Zoológica Mexicana, Volumen especial*. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México. pp. 105-152.
- [78] VAN DER HAMMEN, T. & RANGEL, O. 1997. El estudio de la vegetación en Colombia. En: Rangel, J.O., Lowy, C., Petter, D., Aguilar-Puentes, M. (Eds.), *Colombia diversidad biótica II: tipos de vegetación en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. pp. 17-57.
- [79] MALAGÓN, D. & PULIDO, C. 2000. Suelos del Páramo Colombiano. En: Rangel, O. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica III. La Región de Vida Paramuna*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá, Colombia. pp. 37-84.
- [80] DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). 2010. *Colombia estadística 2000-2009. Tomo 3*. Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 2012 pp.
- [81] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 2009. *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000 y 2004*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM),

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Scripto Ltda. Bogotá D.C., Colombia. 342 pp.

[82] MALAGÓN-CASTRO, D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos: Énfasis en génesis y aspectos ambientales. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 27 (104): 319-341.

[83] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 2005. Distribución espacio-temporal de las variables del clima. En: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Eds.), Atlas climatológico de Colombia. Bogotá D.C. 218 pp.

[84] LE TOAN, T., BEAUDOIN, A., RIOM, J., & GUYON, D. 1992. Relating forest biomass to SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 30(2): 403-411.

[85] DOBSON, M., ULABY, F., PIERCE, I., SHARIK, T., BERGEN, K. & KELLNDORFER, J. 1995. Estimation of forest biophysical characteristics in Northern Michigan with SIR-C/XSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33(4): 877-895.

[86] IMHOFF, M. 1995. Radar backscatter and biomass saturation-ramifications for global biomass inventory. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33(2): 511-518.

[87] LUCKMAN, A., BAKER, J., KUPLICH, T., YANASSE, C. & FRERY, A. 1997. A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. Remote Sensing of Environment 60(1): 1-13.

[88] FRANSSON, J. & ISRAELSSON, H. 1999. Estimation of stem volume in boreal forests using ERS-1 C- and JERS-1 L-band SAR data. International Journal of Remote Sensing 20(1): 123-137.

[89] SANTOS, J., LACRUZ, M., ARAUJO, L. & KEIL, M. 2002. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. International Journal of Remote Sensing 23(7): 1217-1229.

[90] FOODY, G.M., BOYD, D.S. & CUTLER, M.E.J. 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. Remote Sensing of Environment 85: 463-474.

[91] HALL, R.J., SKAKUN, R.S., ARSENAULT, E.J. & CASE, B.S. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of

aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management* 225: 378-390.

[92] SAATCHI, S.S., HOUGHTON, R.A., DOS SANTOS ALVALÁ, R.C., SOARES, J.V. & YU, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology* 13: 816-837.

[93] BACCINI, A., FRIEDL, A.M.A., WOODCOCK, C.E. & WARBINGTON, R. 2004. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophysical Research Letter* 31: L10501.

[94] MIETTINEN, J. & LIEW, S.C. 2009. Estimation of biomass distribution in Peninsular Malaysia and in the islands of Sumatra, Java and Borneo based on multi-resolution remote sensing land cover analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14: 357-373.

[95] GASPARRI, N.I., PARMUCHI, M.G., BONO, J., KARSZENBAUM, H. & MONTENEGRO, C.L. 2010. Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forests of Argentina. *Journal of Arid Environments*, doi: 10.1016.

[96] MORTON, D.C., DEFRIES, R.S., NAGOL, J., SOUZA JR., C.M., KASISCHKE, E.S., HURTT, G.C. & DUBAYAH, R. 2011. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 115: 1706-1720.

[97] CABRERA, E., GALINDO, G. & VARGAS, D.M. 2011. Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escala Gruesa y Fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C., Colombia. 44 pp.

[98] La adquisición y descarga de las imágenes de satélite Landsat se realizó en [www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov).

[99] PUYRAVAUD, J.P. 2003. Standardizing the calculations of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177: 593-596.

[100] GRUBB, P.J., LLOYD, J.R., PENNINGTON, T.D. & WHITMORE, T.C. 1963. A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador. The forest structure, physiognomy and floristics. *Journal of Ecology* 51: 567-601.

[101] KITAYAMA, K. & MUELLER-DOMBOIS, D. 1994. An altitudinal transect analysis of the windward vegetation on Haleakala, a Hawaiian island mountain. *Phytocoenologia* 24: 135-154.

[102] LIEBERMAN, D., LIEBERMAN, M., PERALTA, R. & HARTSHORN, G.S. 1996. Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica. *Journal of Ecology* 84: 137-152.

[103] AIBA, S. & KITAYAMA, K. 1999. Structure, composition and species diversity in an altitude-substrate matrix of rain forest tree communities on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology* 140: 139-157.

[104] KITAYAMA, K. & AIBA, S. 2002. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Ecology* 90: 37-51.

[105] SCHAUER, M., GLATZEL, S. & GEROLD, G. 2007. Soil development along an altitudinal transect in a Bolivian tropical montane rainforest: Podzolization vs. hydro-morphy. *Catena* 69: 83-90.

[106] MOSER, G., RODERSTEIN, M., SOETHE, N., HERTEL, D. & LEUSCHNER, CH. 2008. Altitudinal changes in stand structure and biomass allocation of tropical mountain forests in relation to microclimate and soil chemistry. En: Beck, E., Bendix, J., Kottke, I., Makeschin, F. & Mosandl, R. (Eds.), *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*. Springer, Berlin, Ecological Studies, 198. pp. 229-242.

[107] GIRARDIN, C.A.J., MALHI, Y., ARAGÃO, L.E.O.C., MAMANI, M., HUARACA HUASCO, W., DURAND, L., FEELEY, K.J., RAPP, J., SILVA-ESPEJO, J.E., SILMAN, M., SALINAS, N. & WHITTAKER, R.J. 2010. Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology* 16: 3176-3192.

[108] KÖRNER, C. 1998. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115: 445-459.

[109] KÖRNER, C. 2006. Plant CO<sub>2</sub> responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytologist* 172: 393-411.

[110] KÖRNER, C. 2007. The use of 'altitude' in ecological research. *TRENDS in Ecology and Evolution* 22(11): 569-574.

[111] COOMES, D.A. & ALLEN, R.B. 2007. Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology* 95: 1084-1097.

[112] HOLDRIDGE, L.R., GRENKE, W., HATHEWAY, W.H., LIANG, T. & TOSI, J.A. 1971. *Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study*. Pergamon Press, Oxford.

[113] LANG, R. 1915. Versucheinerexakten Klassifikation der Böden in klimatischer und geologischer Hinsicht. Internationale Mitteilungenfuer Bodenkunde 5: 312–346.

[114] LANG, R. 1920. Verwitterung und Bodenbildungals Einführung in die Bodenkunde. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart.

[115] DE MARTONNE, E. 1923. Ariditéet indices d’aridité. Académie des Sciences. Comptes Rendus 182(23): 1935-1938.

[116] El índice de aridez ( $I_M$ ) es igual a  $\left(\frac{P}{2 \times (T + 10)}\right) + \left(\frac{12 \times P_s}{T + 10}\right)$ , en donde  $P$  es la precipitación total anual (en mm),  $T$  la temperatura media anual (en °C),  $P_s$  la precipitación del mes más seco del año y  $T_s$  la temperatura registrada en dicho mes.

[117] Los promedios climatológicos de la normal 1981-2010 se pueden descargar en <http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile15803&downloadname=Promedios%2081-10.xlsx>. El vínculo fue consultado por última vez el 14 de Septiembre de 2014.

[118] DÍAZ-ALMANZA, E. 2013. Informe de avance - Contrato PC-CPS-013/2013. Junio 2013. Patrimonio Natural Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas. Bogotá D.C. 24 pp.

[119] BOYLE, B., HOPKINS, N., LU, Z., RAYGOZA-GARAY, J.A., MOZZHERIN, D., REES, T., MATASCI, N., NARRO, M.L., PIEL, W.H., MCKAY, S.J., LOWRY, S., FREELAND, C., PEET, R.K. & ENQUIST, B.J. 2013. The taxonomic name resolution service: an online tool for automated standardization of plant names. BMC Bioinformatics 14: 16.

[120] Durante las últimas dos décadas ha surgido un gran número de bases de datos que proporcionan acceso a millones de registros de especies de plantas a lo largo del mundo. Entre estas se destacan aquellas que compilan información depositada en museos (e.g. GBIF, Tropicos, REMIB, OBIS, VertNet, MaNIS), o con datos resultantes de inventarios florísticos, proyectos de monitoreo a largo plazo y caracterizaciones ecológicas (e.g. SALVIAS, CTFS, Selva, GIVD, USFS-FIA, Rainfor, VegBank), o de estudios en paleobotánica (e.g. Paleobiology Database), rasgos funcionales (e.g. TraitNet, TRY), secuenciación molecular (e.g. GenBank) y filogenia (e.g. TreeBase). A pesar de los avances realizados en torno a la generación de repositorios de libre acceso, existen aún desafíos que hay que sortear, en particular, aquellos relacionados con la corrección y estandarización de la nomenclatura taxonómica. Se observa que usualmente las bases contienen nombres incorrectos o ambiguos, cosa que dificulta el desarrollo de estudios comparativos que requieren una coincidencia de las entidades taxonómicas entre conjuntos de datos de diferente procedencia. La falta de estandarización puede dar lugar a observaciones equívocas y medidas exageradas (e.g. diversidad), que conduzcan a conclusiones erró-

neas, o dificulten la generación de modelos o predicciones fiables a través del espacio y el tiempo. La compilación de conjuntos de datos generados por diferentes fuentes, requiere una cuidadosa estandarización de cientos o miles de nombres de taxones. Gran parte de los problemas relacionados con la heterogeneidad semántica en la nomenclatura hacen referencia a faltas de ortografía, variantes léxicas, sinonimias homotípicas, sinonimias heterotípicas, y homonimias. En adición, existen otros tantos que involucran el uso de diferentes conceptos taxonómicos o sistemas de clasificación.

[121] CHAVE, J., MULLER-LANDAU, H.C., BAKER, T.R., EASDALE, T.A., TER STEEGE, H. & WEBB, C.O. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species. *Ecological Applications* 16(6): 2356-2367.

[122] ZANNE, A.E., LÓPEZ-GONZÁLEZ, G., COOMES, D.A., ILIC, J., JANSEN, S., LEWIS, S.L., MILLER, R.B., SWENSON, N.G., WIEMANN, M.C. & CHAVE, J. 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository, doi:10.5061/dryad.234.

[123] En la literatura científica abundan las ecuaciones alométricas destinados para dicho fin (Brown et al. 1989, Brown 1997, West et al. 1999, Baker et al. 2004, Chave et al. 2004, 2005; Sierra et al. 2007, Zianis 2008, Navar 2009). Los modelos más simples y prácticos se basan en el diámetro a la altura del pecho (Sierra et al. 2007, Litton & Kauffman 2008, Basuki et al. 2009). Sin embargo, no se recomienda utilizarlos para realizar estimaciones a nivel regional, nacional o global, ya que pueden acarrear una alta incertidumbre, respeto a los resultados que se obtienen con ecuaciones más complejas (West et al. 1999, Zianis 2008). Diversos estudios muestran que la estimación puede ser optimizada mediante la inclusión de densidad de la madera (Brown et al. 1989, Baker et al. 2004, Chave et al. 2006, Ter Steege et al. 2006, Patiño et al. 2009) en los modelos. Los resultados obtenidos por Álvarez et al. (2012) sustentan esta afirmación. Por esta razón IDEAM (Phillips et al. 2011) optó por utilizar ecuaciones que incluyen como variables explicativas al diámetro y a la densidad de la madera, para realizar la estimación de la biomasa aérea en bosques naturales del país. Sin embargo, la medición de esta última variable es compleja y requiere trabajo adicional, cosa que conduce a incrementos en los costos y el tiempo necesario para la obtener dicha información. Es por esto que se recomienda utilizar valores por defecto que hayan sido publicados en estudios nacionales o internacionales (IPCC 2007).

[124] ÁLVAREZ, E., DUQUE, A., SALDARRIAGA, J., CABRERA, K., DE LAS SALAS, G., DEL VALLE, I., LEMA, A., MORENO, F., ORREGO, S. & RODRÍGUEZ, L. 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management* 267: 297-308.

[125] CHAVE, J., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BÚRQUEZ, A., CHIDUMAYO, E., COLGAN, M.S., DELITTI, W.B.C., DUQUE, A., EID, T., FEARNSIDE, P.M., GOODMAN, R.C., HENRY, M., MARTÍNEZ-YRÍZAR, A., MUGASHA, W.A., MULLER-LANDAU, H.C., MENCUCCINI, M.,

- NELSON, B.W., NGOMANDA, A., NOGUEIRA, E.M., ORTIZ-MALAVASSI, E., PÉLISSIER, R., PLOTON, P., RYAN, C.M., SALDARRIAGA, J.G. & VIEILLENDENT, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20(10): 3177-3190.
- [126] YEPES, A.P., NAVARRETE, D.A., DUQUE, A.J., PHILLIPS, J.F., CABRERA, K.R., ÁLVAREZ, E., GARCÍA, M.C. & ORDOÑEZ, M.F. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-Carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá D.C., Colombia. 162 pp.
- [127] DANCÉ, J. & KOMETTER, R. 1984. Algunas características dasonómicas en los diferentes estadios del bosque secundario. *Revista Forestal del Perú* 12(1-2): 1-15.
- [128] LÓPEZ, J.L. & TAMARIT, J.C. 2005. Caracterización y dinámica de la estructura diamétrica de un bosque tropical secundario en Campeche, México. *Revista Ciencia Forestal en México* 30(98): 51-71.
- [129] VÍLCHEZ, B. & ROCHA, O. 2006. Estructura de una población del árbol Peltophyne purpurea (Cesalpinaeae) en un bosque intervenido de la Península de Osa, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 54(3): 1019-1029.
- [130] AYMA-ROMAY, A.I., PADILLA-BARROSO, E. & CALANI, E. 2007. Estructura, composición y regeneración de un bosque de neblina. *Revista Boliviana de Ecología y conservación ambiental* 21: 27-42.
- [131] MORALES-SALAZAR, M., VÍLCHEZ-ALVARADO, B., CHAZDON, R.L., ORTEGA-GUTIÉRREZ, M., ORTIZ-MALAVASSI, E. & GUEVARA-BONILLA, M. 2012. Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana* 9(23): 19-28.
- [132] CHAMBERS, J.Q., DOS SANTOS, J., RIBEIRO, R.J. & HIGUCHI, N. 2001. Tree damage, allometric relationships, and aboveground net primary production in a central Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 152: 73-84.
- [133] CHAVE, J., CONDIT, R., AGUILAR, S., HERNANDEZ, A., LAO, S. & PEREZ, R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions Royal Society B* 359: 409-420.
- [134] THOMAS, C.E. & RENNIE, J.C. 1987. Combining Inventory Data for Improved Estimates of Forest Resources. *Southern Journal of Applied Forestry* 11(3): 168-171.
- [135] WESTFALL, J.A., PATTERSON, P.L. & COULSTON, J.W. 2011. Post-stratified estimation: within-strata and total sample size recommendations. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 1130-1139.

[136] BECHTOLD, W.A. & PATTERSON, P.L. (Eds.). 2005. The Enhanced Forest Inventory and Analysis Program – National Sampling Design and Estimation Procedures. General Technical Report SRS-80. United States Department of Agriculture, US Forest Service, Southern Research Station. 98 pp.

[137] Se entiende por “bosque” la cobertura de la Tierra ocupada principalmente por árboles que puede contener arbustos, palmas, guaduas, hierbas y lianas, en la que predomina la cobertura arbórea con una densidad mínima del dosel de 30%, una altura mínima del dosel (*in situ*) de 5 m al momento de su identificación, y un área mínima de 1,0 ha. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales (coníferas y/o latifoliadas), cultivos de palma, y árboles sembrados para la producción agropecuaria. Esta definición es consecuente con los criterios definidos por la CMNUCC en su decisión 11/COP.7, con la definición adoptada por Colombia ante el Protocolo de Kioto, así como con la definición de la cobertura de bosque natural incluida en la adaptación para Colombia de la leyenda de la metodología CORINE Land Cover (CLC Colombia).

[138] BRUIJNZEEL, L.A. & VENEKLAAS, E.J. 1998. Climatic conditions and tropical Montane forest productivity: the fog has not lifted yet. *Ecology* 79: 3-9.

[139] RAICH, J.W., RUSSELL, A.E., KITAYAMA, K., PARTON, W.J. & VITOUSEK, P.M. 2006. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology* 87: 76-87.

[140] ALVES, L.F., VIEIRA, S.A., SCARANELLO, M.A., CAMARGO, P.B., SANTOS, F.A.M., JOLY, C.A. & MARTINELLI, L.A. 2010. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). *Forest Ecology and Management* 260: 679-691.

[141] Se propone que naciones en vías de desarrollo se pueden catalogar como HFLD (high forest cover-low deforestation, en inglés) cuando la cobertura boscosa se extiende sobre más de la mitad del área de la nación y la tasa de deforestación es menor a 0,22%. Fuente: The REDD desk, <http://therredddesk.org/encyclopaedia/high-forest-cover-low-deforestation-hfld>.

[142] CARDONA, M.C., ALARCÓN, J.C., ANZOLA, A. & CAJAMARCA, J. 2001. Metodología para la estimación de la biomasa aérea y contenido de carbono en bosques. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM.

[143] ANAYA, J.A., CHUVIECO, E. & PALACIOS-ORUETA, A. 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management* 257: 1237-1246.



## ANEXOS

---

**Anexo 1**  
**60**

Biomasa aérea de los bosques de Colombia empleando la leyenda de estratificación de Chave et al. (2005), estimada a partir del uso de diferentes aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas. La biomasa aérea y el intervalo de confianza se presentan en unidades Mg/ha, mientras que el error de muestreo se expresa en porcentaje.

Bosque	Modelo	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón	
		$\bar{Y}_h$	$IC_{\bar{Y}_h}$	$SE_h$	$\bar{Y}_h$	$IC_{\bar{Y}_h}$	$SE_h$	$\bar{Y}_h$	$IC_{\bar{Y}_h}$
Seco	Chave I	166,6	9,7	3,0	161,8	9,4	3,0	155,7	11,5
	Álvarez	206,3	14,2	3,5	166,2	13,1	4,0	173,8	14,0
Húmedo	Chave II	258,7	19,9	3,9	239,3	18,2	3,9	232,0	23,2
	Chave I	319,3	12,7	2,0	277,0	9,6	1,8	315,2	11,5
Pluvial	Álvarez	252,2	8,4	1,7	231,0	6,6	1,5	245,9	7,2
	Chave II	312,3	13,3	2,2	270,0	9,7	1,8	311,9	12,5
	Chave I	238,1	10,3	2,2	231,5	0,9	0,2	286,6	14,1
	Álvarez	285,9	11,2	2,0	229,9	6,0	1,3	339,9	15,7
	Chave II	345,7	16,0	2,4	319,6	3,6	0,6	423,6	23,0

## Anexo 2

Biomasa aérea de los bosques de Colombia empleando la leyenda de estratificación de Holdridge, estimada a partir del uso de diferentes aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas. La biomasa aérea y el intervalo de confianza se presentan en unidades Mg/ha, mientras que el error de muestreo se expresa en porcentaje.

Bosque	Modelo	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$
		$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$	$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$			
Seco tropical	Chave I	241,9	54,2	11,3	129,7	22,0	8,5	134,7	27,0	10,1
	Álvarez	129,3	17,9	7,0	95,1	13,3	7,0	83,6	13,8	8,3
Húmedo tropical	Chave II	249,3	48,9	9,9	160,1	28,7	9,0	145,1	28,7	10,0
	Chave I	311,4	13,3	2,2	190,8	8,4	2,2	299,6	11,4	1,9
Muy húmedo tropical	Álvarez	287,0	10,9	1,9	231,7	7,2	1,6	263,6	7,8	1,5
	Chave II	342,9	16,6	2,5	232,3	10,2	2,2	336,2	14,1	2,1
Pluvial tropical	Chave I	232,7	12,9	2,8	115,9	2,4	1,0	306,5	18,2	3,0
	Álvarez	283,8	14,7	2,6	196,5	5,5	1,4	365,0	20,3	2,8
Húmedo premontano	Chave II	342,0	20,2	3,0	209,2	6,9	1,7	453,7	29,7	3,3
	Chave I	157,5	18,2	5,8	167,5	7,2	2,2	205,6	10,1	2,5
Seco montano bajo	Álvarez	185,7	21,1	5,7	195,4	8,9	2,3	236,8	11,7	2,5
	Chave II	214,2	25,6	6,0	221,3	10,5	2,4	276,8	15,2	2,8
Muy húmedo premontano	Chave I	227,4	28,3	6,3	163,1	18,2	5,7	302,5	42,3	7,1
	Álvarez	225,8	23,3	5,2	175,3	17,8	5,1	271,5	30,1	5,6
Pluvial premontano	Chave II	263,4	29,8	5,7	195,6	21,1	5,5	331,1	44,4	6,8
	Chave I	262,1	23,9	4,6	220,3	8,2	1,9	263,0	25,3	4,9
Seco montano alto	Álvarez	220,1	16,1	3,7	239,5	8,9	1,9	222,5	17,6	4,0
	Chave II	286,9	27,5	4,9	372,3	4,1	0,6	287,8	29,7	5,2
Seco montano medio	Chave I	232,3	33,4	7,1	187,9	25,4	6,6	191,0	31,7	8,1
	Álvarez	272,1	41,0	7,5	223,3	32,6	7,1	223,3	39,8	8,7
Seco montano alto	Chave II	345,2	54,7	7,8	277,2	38,5	6,8	274,6	48,4	8,6
	Chave I	164,1	32,8	8,8	-	-	-	-	-	-
Seco montano muy alto	Álvarez	182,4	26,7	6,5	-	-	-	-	-	-
	Chave II	225,9	63,9	12,5	-	-	-	-	-	-

**Anexo (Continuación)**

### Anexo 3

Biomasa aérea de los bosques de Colombia empleando la leyenda de estratificación de Caldas-Lang, estimada a partir del uso de diferentes aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas. La biomasa aérea y el intervalo de confianza se presentan en unidades Mg/ha, mientras que el error de muestreo se expresa en porcentaje.

Bosque	Modelo	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$
		$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$	$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$			
Cálido semiárido	Chave I	155,9	60,4	19,2	108,5	21,3	9,7	107,0	29,0	13,4
	Álvarez	112,0	25,0	11,1	89,3	17,0	9,5	76,0	19,0	12,4
Cálido semihúmedo	Chave II	193,0	52,9	13,6	126,9	29,4	11,5	122,8	30,6	12,4
	Chave I	331,8	30,8	4,7	250,4	19,4	3,9	284,5	20,8	3,7
Cálido húmedo	Álvarez	259,5	20,1	3,9	210,2	13,9	3,4	233,8	15,3	3,3
	Chave II	289,5	26,7	4,7	236,6	17,7	3,8	257,3	18,5	3,7
Cálido superhúmedo	Chave I	293,4	12,7	2,2	149,0	4,9	1,7	283,8	10,8	1,9
	Álvarez	286,3	11,2	2,0	214,4	6,1	1,4	264,8	7,6	1,5
Templado semiárido	Chave II	353,6	17,5	2,5	208,8	7,7	1,9	341,4	13,7	2,0
	Chave I	231,0	13,5	3,0	163,4	5,2	1,6	315,2	20,2	3,3
Templado semihúmedo	Álvarez	280,1	15,4	2,8	206,9	6,0	1,5	372,4	22,6	3,1
	Chave II	337,2	21,1	3,2	233,8	8,3	1,8	463,5	33,1	3,6
Templado húmedo	Chave I	142,0	20,4	7,2	125,7	10,7	4,3	140,2	17,5	6,3
	Álvarez	180,3	31,6	8,8	150,0	3,2	1,1	176,6	26,2	7,4
Templado superhúmedo	Chave II	197,7	39,5	10,0	151,4	19,2	6,4	187,9	30,0	8,0
	Chave I	233,0	25,5	5,5	165,0	17,7	5,4	277,9	32,3	5,9
Templado húmedo	Álvarez	250,9	25,1	5,1	177,4	18,8	5,4	271,0	32,7	6,1
	Chave II	288,3	32,7	5,7	189,9	21,6	5,8	318,3	37,4	6,0
Templado superhúmedo	Chave I	302,2	31,1	5,2	236,3	19,0	4,1	327,9	37,4	5,8
	Álvarez	242,1	20,3	4,3	202,0	14,4	3,6	256,9	23,3	4,6
Templado húmedo	Chave II	312,9	34,7	5,6	246,8	19,2	4,0	336,4	41,9	6,3
	Chave I	244,9	31,1	6,4	229,1	9,5	2,1	250,1	22,1	4,5
Templado superhúmedo	Álvarez	236,9	26,7	5,7	257,1	11,0	2,2	237,4	17,3	3,7
	Chave II	298,5	35,0	6,0	303,4	16,9	2,8	284,4	22,0	3,9

## Anexo 3 (Continuación)

Bosque	Modelo	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón		
		$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$	$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$	$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_h$
Frío semihúmedo	Chave I	192,4	23,2	6,1	200,2	6,3	1,6	187,5	18,0	4,9
	Álvarez	251,0	25,3	5,1	216,8	21,7	5,1	233,0	20,8	4,5
Frío húmedo	Chave II	284,8	35,6	6,3	254,8	24,1	4,8	266,1	32,7	6,2
	Chave I	309,5	32,3	5,3	81,3	4,9	3,1	310,4	37,0	6,1
Frío superhúmedo	Álvarez	269,3	23,5	4,4	64,7	1,4	1,1	268,2	23,2	4,4
	Chave II	312,9	31,6	5,1	93,4	6,3	3,4	314,1	35,9	5,8
Páramo bajo semihúmedo	Chave I	231,6	79,6	17,3	174,2	28,5	8,2	259,1	58,0	11,3
	Álvarez	172,1	28,7	8,4	151,0	22,1	7,4	200,8	32,7	8,2
Páramo bajo superhúmedo	Chave II	255,3	114,3	22,5	195,0	29,4	7,6	276,5	74,7	13,6
	Chave I	237,3	71,0	13,8	247,8	95,4	17,5	237,9	89,0	17,0
Páramo bajo húmedo	Álvarez	145,5	42,7	13,6	148,0	57,1	17,5	144,0	51,8	16,3
	Chave II	367,0	123,1	15,5	365,8	154,8	19,2	355,5	134,8	17,2
Páramo bajo superhúmedo	Chave I	235,8	72,5	15,3	230,2	56,9	12,3	226,5	73,9	16,2
	Álvarez	120,8	26,4	10,9	123,1	26,1	10,5	115,5	27,3	11,7
Páramo bajo superhúmedo	Chave II	329,1	90,5	13,7	338,0	84,4	12,4	328,6	132,4	20,0
	Chave I	352,2	84,9	11,3	370,7	96,7	12,0	370,7	96,7	12,0

## Anexo 4

Biomasa aérea de los bosques de Colombia empleando la leyenda de estratificación de Martonne, estimada a partir del uso de diferentes aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas. La biomasa aérea y el intervalo de confianza se presentan en unidades Mg/ha, mientras que el error de muestreo se expresa en porcentaje.

Bosque	Modelo	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_{\bar{y}_h}$	$\bar{y}_h$
		$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_{\bar{y}_h}$	$\bar{y}_h$	$IC_{\bar{y}_h}$	$SE_{\bar{y}_h}$				
Subhúmedo	Chave I	186,5	98,0	23,6	-	-	-	-	-	-	-
	Álvarez	118,0	40,9	15,5	-	-	-	-	-	-	-
Húmedo	Chave II	257,2	166,6	29,1	-	-	-	-	-	-	-
	Chave I	227,8	71,5	15,8	107,1	21,5	10,1	179,1	47,1	13,2	13,2
Lluvioso estacional	Álvarez	198,9	46,1	11,7	112,1	25,7	11,5	162,5	42,7	13,2	13,2
	Chave II	204,9	54,7	13,4	138,1	27,7	10,1	176,8	44,3	12,6	12,6
Lluvioso	Chave I	275,9	9,2	1,7	217,3	0,9	0,2	290,8	10,1	1,8	1,8
	Álvarez	246,1	6,7	1,4	211,4	5,7	1,4	248,3	6,8	1,4	1,4
	Chave II	307,5	10,1	1,7	314,3	3,6	0,6	323,7	12,1	1,9	1,9
	Chave I	250,8	12,1	2,5	209,5	6,7	1,6	294,6	14,7	2,5	2,5
	Álvarez	286,8	12,3	2,2	244,3	6,7	1,4	339,9	16,4	2,5	2,5
	Chave II	345,1	17,9	2,6	292,3	9,9	1,7	418,5	23,9	2,9	2,9

## 66 Anexo 5

Biomasa aérea, reservas actuales, emisiones brutas y emisiones netas de CO<sub>2</sub>e asociadas con el cambio en la extensión de las coberturas boscosas en Colombia durante el periodo 1990-2013, estimadas a partir de diferentes leyendas de estratificación, aproximaciones para calcular los promedios y ecuaciones alométricas.

Leyenda	Parámetro	Media aritmética				Inverso varianza				Estimador razón
		Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	
	$\bar{Y}_f$ (Mg/ha)	284,57	263,52	323,33	256,72	228,79	287,71	300,04	279,12	351,60
	$IC_{\hat{y}_f}$ (Mg/ha)	38,95	30,06	45,69	26,39	20,94	27,24	39,76	33,47	52,38
	$SE_f$ (%)	1,08	0,90	1,11	0,81	0,72	0,75	1,04	0,94	1,17
	$\hat{Y}_f$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	29,03	26,88	32,98	26,19	23,34	29,35	30,60	28,47	35,86
Provincias	$IC_{\hat{y}_f}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	3,97	3,07	4,66	2,69	2,14	2,78	4,06	3,41	5,34
	$\hat{Y}_{def}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	3,03	2,67	3,30	2,70	2,36	2,91	3,09	2,70	3,43
	$IC_{\hat{y}_{def}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,45	0,31	0,49	0,33	0,24	0,34	0,42	0,29	0,49
	$\hat{Y}_{reg}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,60	0,53	0,65	0,53	0,47	0,58	0,61	0,54	0,68
	$IC_{\hat{y}_{reg}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,09	0,06	0,09	0,06	0,05	0,07	0,08	0,06	0,10
	$\hat{Y}_{net}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	2,44	2,14	2,64	2,17	1,89	2,33	2,48	2,17	2,74
	$IC_{\hat{y}_{net}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,36	0,25	0,39	0,27	0,19	0,28	0,34	0,24	0,39

## Anexo 5 (Continuación)

Leyenda	Parámetro	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón		
		Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	Chave II
$\bar{Y}$ (Mg/ha)	295,91	277,35	335,34	183,52	221,38	233,01	293,59	266,38	339,35	
$IC_{\hat{y}_f}$ (Mg/ha)	3,80	3,12	4,75	2,55	2,18	3,11	3,57	2,50	4,43	
$SE_f$ (%)	0,57	0,50	0,63	0,60	0,43	0,58	0,53	0,41	0,57	
$\hat{Y}_f$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	30,04	28,15	34,04	18,62	22,46	23,64	29,78	27,02	34,42	
$IC_{\hat{y}_f}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,39	0,32	0,48	0,26	0,22	0,32	0,36	0,25	0,45	
Holdridge	$\hat{Y}_{def}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	2,99	2,75	3,41	1,90	2,21	2,45	2,96	2,66	3,43
	$IC_{\hat{y}_{def}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
	$\hat{Y}_{reg}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,58	0,53	0,67	0,37	0,42	0,48	0,58	0,52	0,67
	$IC_{\hat{y}_{reg}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	$\hat{Y}_{net}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	2,41	2,22	2,74	1,53	1,78	1,96	2,38	2,14	2,76
	$IC_{\hat{y}_{net}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02

## 68 Anexo 5 (Continuación)

Leyenda	Parámetro	Media aritmética			Inverso varianza			Estimador razón		
		Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	Chave II
	$\bar{y}$ (Mg/ha)	289,41	274,39	336,52	168,26	206,81	215,53	285,47	264,86	335,13
	$IC_{\bar{y}}$ (Mg/ha)	2,94	2,46	3,82	1,30	1,38	1,76	2,47	1,78	3,06
	$SE_f$ (%)	0,47	0,41	0,52	0,35	0,31	0,38	0,40	0,31	0,42
	$\hat{y}_f$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	29,47	27,94	34,26	17,13	21,06	21,94	29,07	26,97	34,12
Caldas-Lang	$IC_{\hat{y}_f}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,30	0,25	0,39	0,13	0,14	0,18	0,25	0,18	0,31
	$\hat{y}_{def}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	3,02	2,73	3,32	1,97	2,08	2,29	2,93	2,63	3,27
	$IC_{\hat{y}_{def}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
	$\hat{y}_{reg}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,60	0,53	0,65	0,40	0,41	0,46	0,58	0,52	0,65
	$IC_{\hat{y}_{reg}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\hat{y}_{net}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	2,43	2,20	2,67	1,57	1,68	1,83	2,35	2,11	2,62
	$IC_{\hat{y}_{net}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02

## Anexo 5 (Continuación)

Leyenda	Parámetro	Media aritmética				Inverso varianza				Estimador razón			
		Chave I	Álvarez	Chave II	Chave I	Chave II	Álvarez	Chave II	Chave I	Álvarez	Chave I	Chave II	
	$\bar{Y}$ (Mg/ha)	264,91	261,34	320,74	212,38	222,94	302,66	290,51	283,57	359,28			
	$IC_{\hat{y}_f}$ (Mg/ha)	9,27	8,01	11,82	12,68	19,62	20,64	38,34	35,29	54,46			
	$SE_f$ (%)	0,81	0,71	0,86	0,47	0,69	0,54	1,04	0,98	1,19			
	$\hat{Y}_f$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	27,01	26,65	32,71	21,61	22,69	30,80	29,56	28,86	36,56			
Martonne	$IC_{\hat{y}_f}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,94	0,82	1,20	1,29	2,00	2,10	3,90	3,59	5,54			
	$\hat{Y}_{def}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	2,80	2,60	3,22	2,19	2,21	3,14	2,98	2,72	3,47			
	$IC_{\hat{y}_{def}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,06	0,04	0,06	0,01	0,03	0,02	0,06	0,04	0,07			
	$\hat{Y}_{reg}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,55	0,51	0,63	0,43	0,44	0,61	0,59	0,54	0,69			
	$IC_{\hat{y}_{reg}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
	$\hat{Y}_{net}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	2,25	2,09	2,58	1,76	1,78	2,52	2,40	2,18	2,79			
	$IC_{\hat{y}_{net}}$ (Pg CO <sub>2</sub> e)	0,05	0,03	0,05	0,01	0,03	0,02	0,05	0,03	0,06			





