



## **GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE CARBONO EN LA RESERVA FORESTAL IMATACA**

---



FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL  
INVERTIMOS EN NUESTRO PLANETA

### Agradecimientos

### Abreviaturas, acrónimos y siglas

### Prólogo

### Introducción

#### Parte A: marco teórico

- 1.1. Cambio climático
- 1.2. Compromisos mundiales contra el cambio climático
- 1.3. IPCC: Resultados y estrategias para abordar el Cambio Climático
- 1.4. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI y los reportes en el sector AFOLU
- 1.6. Categorías de uso de la tierra utilizadas en GPG-LULUCF
- 1.7. Importancia de los bosques en el Cambio Climático
- 1.8. Métodos de inventarios de Gases de Efecto Invernaderos para el sector AFOLU

#### Parte B: requerimientos para la estimación de carbono y las emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub>

- 2.1. Información descriptiva
- 2.2. Datos Cartográficos
- 2.3. Datos de campo

#### Parte C: directrices metodológicas para los datos de actividad (DA)

- 3.1. Criterios conceptuales y cartográficos
- 3.2. Análisis de los datos satelitales
- 3.3. Estratificación del bosque
- 3.4. Interpretación de la degradación forestal producto del aprovechamiento forestal selectivo

#### Parte D: directrices metodológicas para los factores de emisión (FE)

- 4.2. Definición de los depósitos terrestre de C
- 4.2. Cálculo del C almacenado en la biomasa aérea (AGB)
- 4.3. Cálculo del C biomasa subterránea
- 4.4. Cálculo del C madera muerta
- 4.5. Cálculo del C detritus (hojarasca)
- 4.6. Cálculo del Carbono Orgánico en el Suelo (COS) del suelo

#### Parte E: directrices metodológicas para la evaluación de la incertidumbre y las estimaciones de carbono y las emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub>

- 5.1. Evaluación de la incertidumbre
- 5.2. Incertidumbre de los cambios del área
- 5.3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono
- 5.4. Combinación de incertidumbres

5.5. Estimación de reservas de carbono almacenado

5.6. Estimación de emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>

## Referencias

## Agradecimientos

La **Guía metodológica para la estimación de carbono en la RFI**, fue elaborada por un equipo multidisciplinario del proyecto “Ordenación Forestal Sustentable y Conservación de Bosques en la Perspectiva Ecosocial”, bajo la dirección de Jesús A. Cegarra, Coordinador técnico del proyecto.

La orientación general estuvo a cargo de Edward Ara Asistente técnico del componente 1 (Sistema Nacional Integrado de Información Forestal (SINIIF)), Yveht Cabello Asistente técnico del componente 2 (Fortalecimiento de capacidades e instrumentos innovadores para el Manejo Forestal Sostenible) y Ernesto Arends Asistente técnico del componente 3 (Restauración, conservación y MFS/MST de bosques en zonas afectadas por procesos de degradación).

Contenido originado por: Carlos Pacheco, especialista, estudioso del área forestal y las estimaciones de carbono y emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub>.

## Abreviaturas, acrónimos y siglas

GEI	Inventarios de gases de efecto invernadero
CC	Cambio Climático
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
AFOLU	Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra
FRA	Evaluación de los Recursos Forestales
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
RFI	Reserva Forestal Imataca
AGB	Biomasa aérea
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza
C	Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
MINEC	Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo
GEF	Fondo Mundial para el Medio Ambiente
MVR	Monitoreo, Verificación y Reporte
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
Ar	Argón
Ne	Neón
He	Helio
H <sub>2</sub>	Hidrógeno
Xe	Xenón
H <sub>2</sub> O	Vapor de agua
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
O <sub>3</sub>	Ozono
CFC	Clorofluorocarbonos
UN	Naciones Unidas
PORU	El Plan de Ordenación y Reglamento de Uso
IGVSB	Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar
DGPF	Dirección General de Patrimonio Forestal
ENFORESTAL	Empresa Nacional Forestal S.A.
FCFA	Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
FE	Factores de Emisión
OBP	Orientaciones de Buenas Prácticas
UTCUTS	Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura
SIGOT	Sistema de Información para la Gestión y Ordenación del Territorio
MARNOT	Manejo de los Recursos Naturales y Ordenamiento de Tierras
GEE	Google Earth Engine
MDT	Modelos de Elevación del Terreno

MDS	Modelo Digital de Superficie
DA	Datos de Actividad
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
COS	Carbono orgánico en el suelo
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
UMI	Unidad mínima de interpretación
UTM	Universal Transversal Mercator
MARNR	Ministerio del Ambiente de los Recursos Naturales Renovables
Kg	Kilogramos
TS	Temperatura estacional
CWD	Déficit de clima de agua
MO	Materia orgánica
Da	Densidad aparente
MA	Micorrizas Arbusculatera
MDE	Modelo digital de elevación
FEB	Factores de expansión de la biomasa
TMAD	Tasa media anual de deforestación

## Prólogo

Actualmente e históricamente en los bosques tropicales, se han generado cambios de cobertura y uso de la tierra que han producido procesos de deforestación y degradación del bosque, y con ellos grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub>. Conocer con precisión estas emisiones es un tema de mucho interés ya que estos bosques son uno de los mayores sumideros de los gases de efecto invernadero (GEI) y los países que los contienen deben poseer sus inventarios con las menores incertidumbres posibles para realizar las negociaciones del Cambio Climático (CC).

Las metodologías para dichas estimaciones han evolucionado con el transcurso de los años, con la disposición de dominio público de datos de sensores remotos, productos globales de alta resolución, herramientas de procesamiento digital en la nube y datos de red de parcelas, así como el mejoramiento de las directrices, orientaciones de buenas prácticas y el refinamiento del del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) para los inventarios nacionales de los GEI.

En el caso particular de la República Bolivariana de Venezuela, se han realizado dos comunicaciones del cambio climáticos, no obstante, en el sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU), sector donde se reportan estas estimaciones, no se han abordado con el uso de las tecnologías de la información geográfica, con la finalidad de aumentar el nivel de sus reportes.

En tal sentido, la guía metodológica para la estimación de carbono en la RFI, es una iniciativa que se encuentra enmarcada en el proyecto "Ordenación Forestal Sustentable y Conservación de Bosque en la Perspectiva Ecosocial" (GCP/VEN/011/ GFF), con la finalidad de estimar los valores de C en sus diferentes depósitos (biomasa viva, biomasa muerta y carbono orgánico en el suelo), así como en los diferentes tipos de bosque en la RFI.

Esta guía metodológica es una adaptación basada en las directrices del 2006, las orientaciones de buenas prácticas del 2003 y el refinamiento del 2019 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que emplea las tecnologías de la información geográfica, la misma cual podrá ser utilizada en el país y en cualquier región del cinturón tropical para realizar los inventarios de GEI en el sector AFOLU.

## Introducción

Según la Evaluación de los Recursos Forestales (FRA) de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Venezuela tiene alrededor del 50.45% de la cobertura de bosque (462.309 Km<sup>2</sup>), de las cuales el 83% pertenece a la Amazonia venezolana (FAO, 2020). Esta área está conformada geográficamente por los estados de Amazonas, Bolívar y Delta Amacuro y representa alrededor del 6.2% de la cuenca del Amazonas (Eva y Huber, 2005; RAISG, 2015, 2009).

Los bosques de la Amazonía venezolana han sido manejados a través de diversas denominaciones de protección legal, que van desde áreas estrictamente protegidas como parques nacionales y otras figuras como reservas forestales, lotes forestales y áreas boscosas bajo protección (Torres, 2008; Vilanova *et al.*, 2012), todos con objetivos orientados a la madera según la legislación nacional (Vilanova, 2020). Una de las más importantes de estas reservas es la Reserva Forestal Imataca (RFI), que alberga importantes niveles de biodiversidad (Berroterán, 2003). Diferentes estudios han estimado que la región contiene uno de los bosques más ricos en carbono de Venezuela con un promedio de 205 ± 15 Mg ha<sup>-1</sup> en biomasa aérea (AGB) (Avitabile *et al.*, 2016; Delaney *et al.*, 1997).

A pesar de que actualmente, de los cerca de 4 millones de ha que cubre la RFI, aproximadamente el 96,69% está cubierto por bosques (Hansen *et al.*, 2013), la RFI se considera un área hot spot de deforestación (Pacheco *et al.*, 2014) y recientemente uno de los frentes de deforestación del cinturón tropical según el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) (Pacheco *et al.*, 2021). Las causas principales de este proceso es la actividad minera, la ganadería y la expansión agrícola (Pacheco-Angulo, 2018), además de estos impulsores de la deforestación, un factor importante de perturbación antropogénica que causa la degradación forestal proviene del aprovechamiento forestal selectivo que comenzó en la década de 1980, principalmente de manera legal, convencional no planificada y planificada (Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).

Esto evidencia la necesidad de realizar una estimación del stock de carbono (C) en los diferentes depósitos y tipos de bosques dentro de la RFI, así como de las emisiones, absorciones y los flujos netos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (directas-indirectas) originadas por los procesos de deforestación y degradación forestal producto del cambio de uso de la tierra. Por estas razones el gobierno nacional, a través del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo (MINEC), en conjunto con la FAO, presentaron el proyecto "Ordenación

Forestal Sustentable y Conservación de Bosque en la Perspectiva Ecosocial (GCP/VEN/011/GFF)", el cual fue aprobado y está siendo financiado actualmente por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF).

El proyecto prevé como resultado de su implementación, emisiones evitadas directas de 1.136.759,35 tCO<sub>2</sub>eq para los 5 años del proyecto en 25.000 ha de bosques y emisiones evitadas indirectas de 18.188.149,06 tCO<sub>2</sub>eq para los 5 años del proyecto (teniendo como línea de base una pérdida estimada de 453.135,81 ton/año CO<sub>2</sub>eq por uso de técnicas forestales convencionales para un área de aprovechamiento de 5.000 ha/año); del mismo modo, prevé el secuestro de 512.985,68 tCO<sub>2</sub>eq en 1.440 ha sometidas a restauración.

Estas metas, han sido planteadas en los resultados 2.1 y 3.2 de los componentes 2 y 3 del proyecto, respectivamente, como soporte a los requerimientos planteados por el GEF; así mismo, en el marco del Resultado 1.1 del componente 1, se prevé el estudio de los flujos y stock de carbono en bosques representativos de la RFI, tales que permitan la identificación de áreas críticas de carbono en la Unidad N-5 y la mejora de los estándares de Monitoreo, Verificación y Reporte (MVR) a nivel nacional.

Para cumplir con dichos resultados se planteó entre otras estrategias, la elaboración de la presente guía metodología, con la finalidad de determinar los valores de C en sus diferentes depósitos (biomasa viva, biomasa muerta y carbono orgánico en el suelo), así como en los diferentes tipos de bosque, basados en información de sensores remotos y datos de levantamientos de parcelas ejecutados en la RFI.

Esta guía metodológica es una adaptación basada en las directrices del 2006, las orientaciones de buenas prácticas del 2003 y el refinamiento del 2019 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), así como en el uso de las tecnologías de la información geográfica, base de datos mundiales de imágenes satelitales, herramientas de procesamiento digital en la nube, datos de campos, datos de estudios científicos y datos establecidos por el IPCC. La finalidad de la misma fue como se mencionó anteriormente fue estimar las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> (directas-indirectas) en la RFI, no obstante, la misma podrá ser utilizada en otras regiones del país u otros países para cumplir con compromisos nacionales e internacionales relacionados al Cambio Climático.



## Parte A: marco teórico

### 1.1. Cambio climático

Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) define el Cambio Climático como *"cualquier cambio en el clima con el tiempo debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas"*; mientras que desde el punto de vista meteorológico representa *"la alteración de las condiciones predominantes"* (IDEAM, 2014).

Estas se basan en dos aspectos la variabilidad natural de la atmósfera y las actividades humanas; por lo cual es importante aclarar que la atmósfera de la tierra está compuesta por gases permanentes: Nitrógeno ( $N_2$ ), Oxígeno ( $O_2$ ), Argón (Ar), Neón (Ne), Helio (He), Hidrógeno ( $H_2$ ) y Xenón (Xe); y gases variables: Vapor de agua ( $H_2O$ ), Dióxido de carbono ( $CO_2$ ), Metano ( $CH_4$ ), Óxido nitroso ( $N_2O$ ), Ozono ( $O_3$ ), Partículas (Polvos, etc. ) y Clorofluorocarbonos (CFC); cuyas concentraciones varían en algunas zonas de la superficie terrestre, aunque muchos de ellos se encuentran distribuidos de forma uniforme, tal es el caso de  $CO_2$  (Camilloni y Vera, 2007).

Gran parte de los gases que conforman la atmósfera son considerados Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales son componentes de origen tanto natural como antrópico que absorben y emiten radiación en diferentes longitudes de onda del espectro infrarrojo desde la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes; éstos compuestos gaseosos pueden categorizarse en GEI directos e indirectos; los primeros son gases que fomentan el efecto invernadero y no son alterados químicamente por otros compuestos en la atmósfera ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ , Compuestos halogenados), mientras que los indirectos afectan la concentración de ozono troposférico, contaminan la atmósfera y sufren transformaciones químicas que los convierte en gases de efecto invernadero directos (Óxidos de Nitrógeno, Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y el monóxido de carbono) (Benavides y León, 2007). Los GEI, más importantes de acuerdo a sus efectos sobre el calentamiento del planeta son el Vapor de Agua, Dióxido de Carbono, Metano, Óxido nitroso, Clorofluorocarbonos y el Ozono.

Las emisiones y por ende las concentraciones de los GEI en la atmósfera han variado en relación a la dinámica de sus fuentes, respecto a las de  $CO_2$  se puede indicar que la concentración se incrementó desde 280 ppm en la época preindustrial hasta 379 en el año 2005, estando representada por una variación de 6,4 a 7,2 GtC/año asociadas a las emisiones de combustibles fósiles y producción de cemento, y de 0,5 a 2,7 GtC/año por el cambio de uso del suelo, en el período 2000-2005; la concentración de metano se incrementó en el mismo período desde 715 ppb (partes por billón) hasta 1774 ppb, como consecuencia de la agricultura y el uso de combustibles fósiles. El Óxido nitroso mantiene la misma tendencia del  $CO_2$  y del  $CH_4$  con un crecimiento constante y una concentración

que se incrementó de 270 ppb hasta 319 ppb originado por las actividades humanas, principalmente a la agricultura (Benavides y León, 2007).

Más recientemente, el boletín la Organización Meteorológica Mundial (OMM) señaló que la concentración de CO<sub>2</sub> alcanzó 407,8 partes por millón (ppm) en 2018 a una tasa de incremento de 1,78 pp/año, lo que ubica como el principal gas de efecto invernadero seguido del CH<sub>4</sub> con 1869 ppb y en tercer lugar las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) con 331,1 ppb. Los efectos del cambio climático varían por regiones continentales, sin embargo, entre sus consecuencias se pueden mencionar: el incremento de la temperatura que conlleva al aumento del nivel del mar, fusión de las placas de hielo, cambios en el régimen de precipitación y la frecuencia de tormentas, huracanes, fenómenos del Niño y la Niña; estas variaciones en el ambiente tienen impactos de diferentes magnitudes en los recursos hídricos, los ecosistemas, la salud humana y la agricultura (Benavides y León, 2007; Olivo y Soto, 2010, OMM, 2019; ONU, En línea).

Resulta fundamental analizar el comportamiento de cada uno de los gases en la atmósfera y las actividades que los generan, debido que la mayoría de ellos no tienen sumideros naturales, que permitan extraerlos de la atmósfera y almacenarlos, por lo que los esfuerzos en este sentido han estado enfocados en la disminución y control de las emisiones; con excepción del Dióxido de Carbono, en donde además de promover el control de las emisiones parte de los esfuerzos han estado vinculados a conservar los sumideros, los cuales están conformados por los ecosistemas vegetales, en donde las plantas mediante el proceso de fotosíntesis son capaces de absorber CO<sub>2</sub> del aire (Benavides y León, 2007).

## 1.2. Compromisos mundiales contra el cambio climático

Se han desarrollado mecanismos para la disminución de los GEI en el planeta, el primero de ellos fue la consolidación el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el año 1988, con el objetivo de aportar información científica sobre el cambio climático, su origen, consecuencias y alternativas para contrarrestarlo, a partir de entonces las Naciones Unidas (UN) han generado instrumentos jurídicos para promover la cooperación internacional y de esta forma hacer frente al cambio climático, entre los cuales destaca el Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) desarrollada en 1992 con la participación de 197 países y cuyo objetivo de acuerdo a su artículo 2 es "*... es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.*" (NU, 1992).

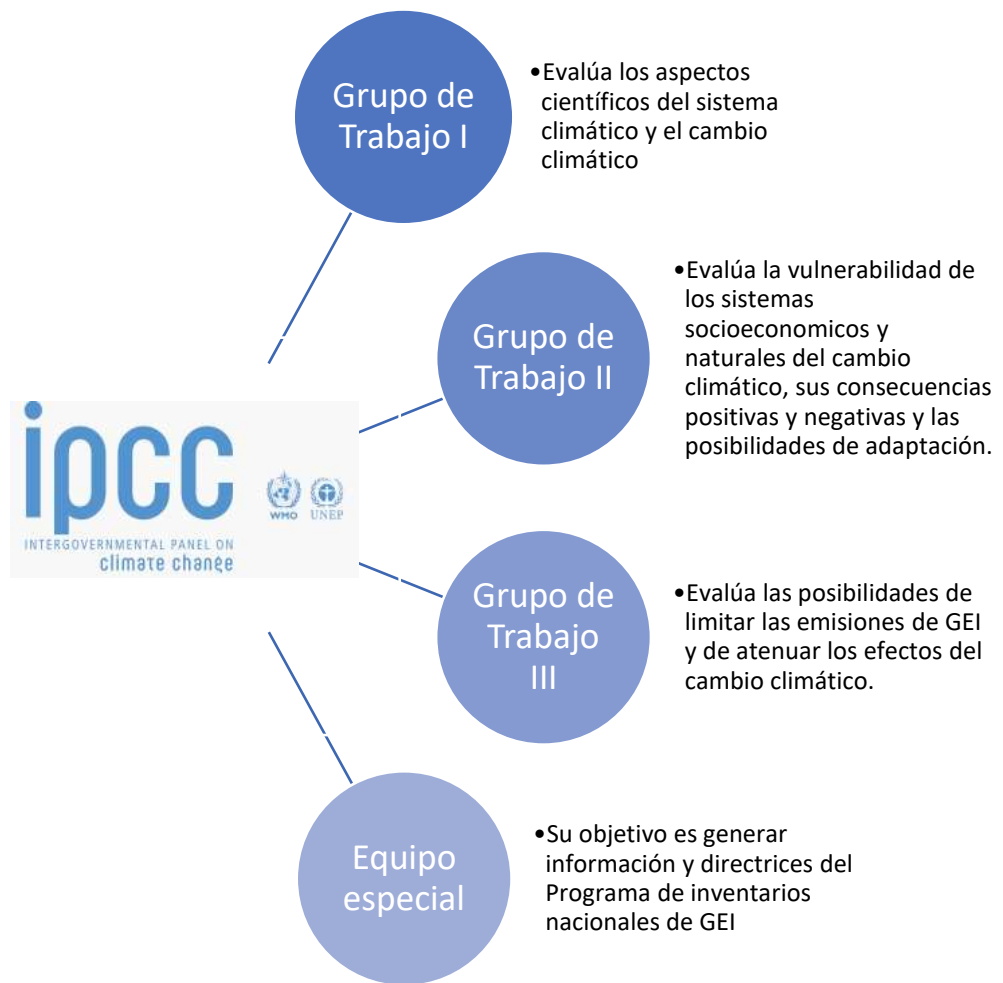
En 1995 fue creado el Protocolo de Kyoto y ratificado en 1997, con la participación de 83 países miembros, los cuales se comprometen a limitar y reducir las emisiones de los GEI, y adicionalmente a aplicar y elaborar políticas que:

- Fomenten la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional,
- Protejan y mejoren los sumideros y depósitos de los gases de efecto invernadero,
- Incentiven el desarrollo de modalidades agrícolas sostenibles a la luz de las consideraciones del cambio climático,
- Investiguen, promocionen, desarrollen y aumenten el uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales, entre otros (NU, 1998).

Este instrumento ha sido base para el desarrollo de estrategias y programas que se ejecutan con el fin de minimizar los efectos del cambio climático y de la presencia en el ambiente de los gases que los generan; este protocolo fue ejecutado en un primer período comprendido entre 2008 y 2012 con la participación de 192 países y un segundo período entre 2013 y 2020; en paralelo a su desarrollo y ejecución, se firmó el Acuerdo de París (2015) en donde todos los países del mundo, por primera vez en la historia se comprometen a trabajar por reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático *"manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 °C."* Recientemente, se realizó la Cumbre sobre la Acción Climática 2019, como un esfuerzo adicional de reunir a los países para acelerar los procesos de disminución de las emisiones haciendo énfasis en la industria pesada, soluciones ecológicas, ciudades, energía, resiliencia e inversiones necesarias para frenar el cambio climático, en la misma se publicó información que sugiere que las acciones realizadas no han sido suficiente para mejorar las condiciones del cambio climático sino que por el contrario es una condición irreversible sobre todo por la concentración de CO<sub>2</sub> y otros GEI (ONU, En línea).

### **1.3. IPCC: Resultados y estrategias para abordar el Cambio Climático**

Como se mencionó anteriormente, el IPCC, es un grupo de expertos de cambio climático que analiza información científica, técnica y socioeconómica, con el objetivo de entender y dar a conocer a través de informes especiales, documentos técnicos, metodologías y otros productos, los elementos científicos del riesgo que genera el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus consecuencias y las posibles adaptaciones ante el mismo; información diseñada para su utilización por los responsables de las políticas, científicos y otros expertos, que consideran además que ha sido la mejor fuente de datos del cambio climático, ésta es generada a partir del trabajo de tres grupos y un equipo especial, encargados de analizar diferentes temas, todos relacionados con el cambio climático, los cuales se mencionan en la Figura 1.



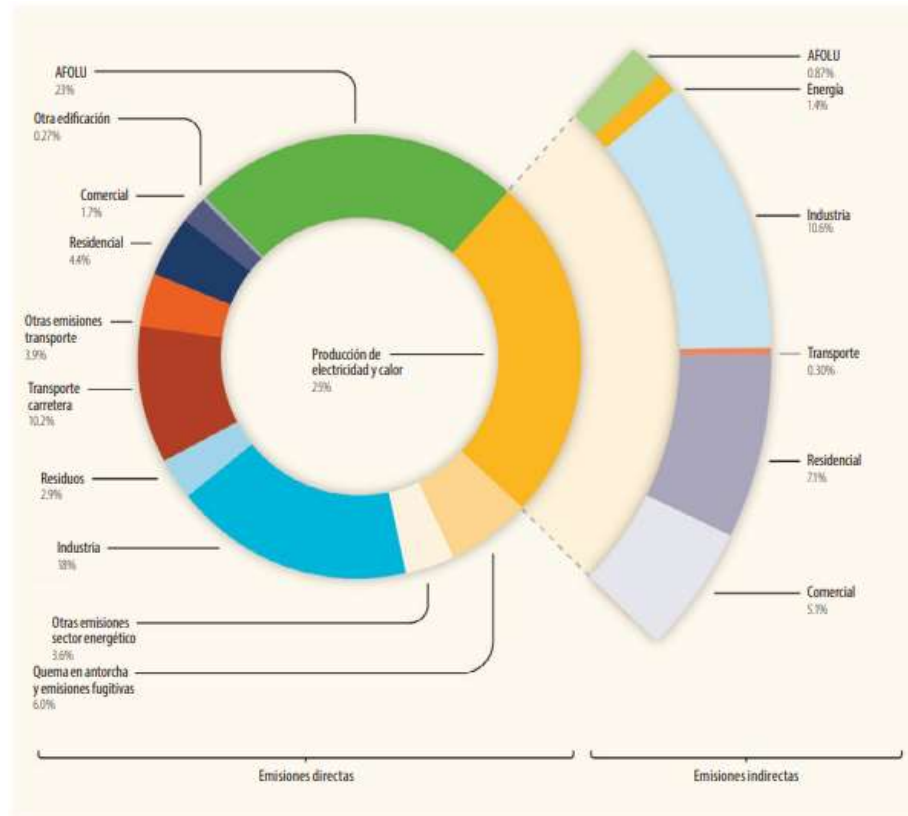
**Figura 1.** Grupos de trabajo y equipo del IPCC. Fuente: Benavides y León, 2007

Desde su consolidación en 1988 el IPCC ha desarrollado cinco informes de evaluación en los cuales los grupos de antes mencionados han aportado información valiosa y actualizada sobre toda la temática relacionada al cambio climático, cada uno desde su rango de evaluación, en la tabla 1 se pueden observar la línea de tiempo de las publicaciones realizadas por los grupos, así como los aspectos relevantes de los mismos.

En el quinto informe de evaluación del IPCC, se determinó el estado de las emisiones de GEI para cada uno de los continentes desde 1750 hasta 2010, y determinó que las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera representan el 76% del total, seguida del metano con el 16% y NO<sub>2</sub> con el 6%; las cuales son analizadas utilizando una perspectiva sectorial en donde el 35% de las emisiones corresponden a sector Energético, el 24% a la Agricultura, selvicultura, y otros usos del suelo (AFOLU), 18% al Industrial, 14% al Transporte, 6% a la Edificación y 3% a Residuos (Figura 2).

**Tabla 1.** Publicaciones de los informes de evaluación del IPCC. Fuente: IPCC, 2015<sup>a</sup>; IOM, En línea.

Año	Informe	Consideraciones
1990	Primer Informe de Evaluación (Grupo de trabajo I – Climate Change: The IPCC Scientific Assessment; Grupo de trabajo II – Climate Change: The IPCC Impacts Assessment; Grupo de trabajo III – Climate Change: The IPCC Response Strategies).	La Asamblea General de las Naciones Unidas toma nota de las conclusiones del informe y decide dar inicio a las negociaciones para establecer una convención marco sobre el cambio climático.
1995	Segundo Informe de Evaluación (Grupo de trabajo I – Climate Change 1995: The Science of Climate Change; Grupo de trabajo II – Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses; Grupo de trabajo III – Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change; IPCC Second Assessment: Climate Change 1995 (incluido el Informe de síntesis).	Los resultados del informe estuvieron disponibles para la Segunda Conferencia de las Partes en la CMCC, y proporcionó material para las negociaciones del Protocolo de Kioto derivado de la Convención.
2001	Tercer Informe de Evaluación (Grupo de trabajo I – Climate Change 2001: The Scientific Basis; Grupo de trabajo II – Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Grupo de trabajo III – Climate Change 2001: Mitigation; Climate Change 2001: Synthesis Report).	A partir de los resultados de este informe se consideró establecer de generar un nuevo protocolo y de mayor severidad para abordar el cambio climático. Promovió el desarrollo en 2005 del protocolo de Montreal
2007	Cuarto Informe de Evaluación (Grupo de trabajo I – Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Grupo de trabajo II – Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability; Grupo de trabajo III – Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change; Climate Change 2007: Synthesis Report).	En este informe se señaló una tendencia creciente en los eventos extremos observados en los pasados cincuenta años y considera la probabilidad de un incremento en las temperaturas, olas de calor y precipitaciones; siendo estas más frecuentes en el futuro. Es por este informe que el IPCC comparte el Premio Nobel de la Paz, por “sus esfuerzos por aumentar los conocimientos sobre el cambio climático de origen humano y divulgarlos, y por sentar las bases de las medidas necesarias para contrarrestar ese cambio”.
2014	Quinto Informe de Evaluación (Grupo de trabajo I – Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Grupo de trabajo II – Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A. Global and Sectorial Aspects. Part B. Regional Aspects; Grupo de trabajo III – Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change; Climate Change 2014: Synthesis Report).	Es considerado el informe más completo desarrollado por el IPCC, y en el que consideran con mayor detalle los efectos del clima en cada uno de los continentes y las estrategias de adaptación y mitigación necesarias para continuar abordando el cambio climático.

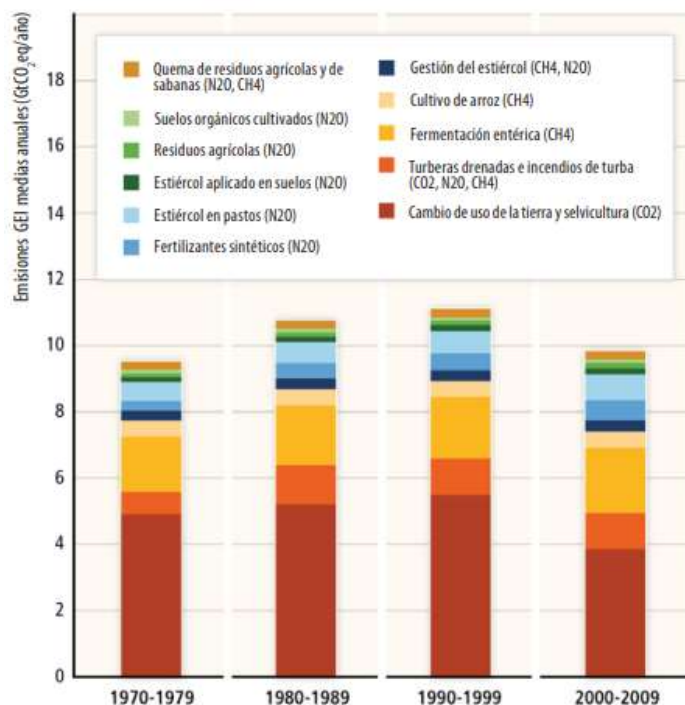


**Figura 2.** Emisiones globales GEI, directas e indirectas, por sectores de actividad en 2010. Fuente: MAAMA, 2015.

De acuerdo al informe del IPCC (2015), las emisiones directas e indirectas de AFOLU representan el 24% y 0,87% del total, respectivamente, procedentes de la quema de residuos agrícolas, suelos orgánicos cultivados, residuos agrícolas, estiércol aplicado en suelos y pastos, utilización de fertilizantes sintéticos, cultivo de arroz, fermentación entérica, turberas drenadas e incendios de turba, y en mayor proporción por los cambios de uso de la tierra y silvicultura (Figura 3). Durante el período 2000-2010, todos los sectores evaluados tuvieron tendencia al incremento excepto este, que presentó un 21% de las emisiones (10 GtCO<sub>2</sub>eq), es así como con un nivel de acuerdo medio los expertos consideran que las emisiones de CO<sub>2</sub> en este sector disminuirán con el tiempo y esperan que para el año 2050 este sector se convierta en sumideros netos de CO<sub>2</sub>. Es importante señalar que las emisiones generadas por el sector AFOLU en los países desarrollados están determinadas por la agricultura mientras que en los países en desarrollo por la deforestación y la degradación de los bosques (MAAMA, 2015).

Desde el punto de vista de mitigación, para disminuir las emisiones de este sector, el grupo recomienda (MAAMA, 2015), la reducción de la deforestación, la gestión de los cultivos agrícolas, la ganadería, el potencial de captación de carbono de los suelos y la biomasa, el reemplazo de combustibles fósiles por biomasa para la producción de energía,

y la aplicación de tecnologías no evaluadas como el Biocarbón o los productos de madera con el objetivo de sustituir los materiales de construcción de alto consumo energético.



**Figura 3.** Emisiones de gases de efectos invernadero en el sector AFOLU entre 1970 y 2009. Fuente: MAAMA, 2015.

#### 1.4. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI y los reportes en el sector AFOLU

Los inventarios de GEI así como los reportes de cada uno de los sectores a nivel global se realizan siguiendo el refinamiento 2019 (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>) de las directrices definidas por el IPCC en el año 2006 (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>) las cuales se diseñaron para mejorar la coherencia e integridad en la estimación del informe de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en relación a los sectores agricultura (considerado en las directrices de 1996 en el capítulo 4) y el cambio de uso de la tierra y silvicultura (Capítulo 5); el refinamiento del 2019 no reemplaza las directrices del 2006 (sino que deben usarse en conjunto; estas están consolidadas en cinco volúmenes (Orientación general, Energía, Procesos industriales y uso de productos, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, y Desechos), cada uno de los cuales está dividido en capítulos; lo que significa que para realizar los inventarios y la compilación de los informes se debe hacer cruzar la información entre dos volúmenes como máximo, el primero en

donde se realiza la orientación interdisciplinaria por temas y el segundo correspondiente al sector a evaluar.

Las variaciones entre las directrices del 2006 y que se incluyen en el refinamiento del 2019 sobre los aspectos a considerar para desarrollar un inventario GEI en el sector AFOLU se enlistan a continuación (Goodwin, *et al.* 2019):

- Se adoptaron seis categorías de uso de la tierra utilizadas en GPG-LULUCF. Estas categorías se subdividen a su vez en tierra que permanece en la misma categoría y tierra convertida de una categoría a otra.
- Informar sobre todas las emisiones por fuentes y absorciones por sumideros de tierras gestionadas, que se consideran antropogénico, mientras que las emisiones y absorciones de tierras no gestionadas no se informan;
- Incorporación de elementos de reporte adicionales introducidos en el reporte de todas las emisiones y remociones para tierras manejadas,
- Métodos genéricos para contabilizar la biomasa, la materia orgánica muerta y los cambios en las existencias de C del suelo en todas las categorías de usos de la tierra. Y métodos genéricos para las emisiones de gases de efecto invernadero generados por la quema de biomasa que se pueden aplicar en todas categorías de uso de la tierra;
- Incorporación de métodos para las emisiones distintas de CO<sub>2</sub> de los suelos gestionados y la quema de biomasa, y la ganadería;
- Adopción de tres niveles jerárquicos de métodos que van desde factores de emisión predeterminados hasta ecuaciones simples. al uso de datos y modelos específicos de cada país para adaptarse a las circunstancias nacionales;
- Descripción de métodos alternativos para estimar e informar los cambios en las existencias de C asociados con la madera recolectada;
- Incorporación de análisis de categorías clave para categorías de uso de la tierra, depósitos de C y gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> y otros;
- Adherencia a los principios de balance de masas en el cálculo de cambios en las existencias de carbono;
- Mayor coherencia en la clasificación de la superficie terrestre para seleccionar los factores de cambio de existencias y emisiones adecuados y datos de actividad;
- Mejoras de las emisiones predeterminadas y factores de cambio de existencias, así como el desarrollo de un factor de emisión. Base de datos (EFDB) que es una herramienta complementaria a las Directrices del IPCC de 2006, que proporciona emisiones alternativas factores con documentación asociada. La EFDB se describe en el Capítulo 2 del Volumen 1.
- Incorporación de métodos para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de terrenos inundados.

## **1.6. Categorías de uso de la tierra utilizadas en GPG-LULUCF**



El inventario de los gases de efecto invernadero generados por el sector AFOLU requiere la consolidación de los datos de los usos de la tierra, en este sentido, el IPCC (2006) discrimina los usos de la tierra en seis categorías, a partir de las siguientes definiciones:

1. **Tierras forestales:** se incluyen todas las tierras con vegetación boscosa basada en los umbrales, basados en la cobertura de la copa, altura mínima de los árboles y la superficie mínima; también incluyen los sistemas con una estructura de vegetación que actualmente se encuentren por debajo, pero que potencialmente podría alcanzar in situ los valores umbrales utilizados por un país para definir la categoría de tierras forestales.
2. **Tierras de cultivo/agrícolas:** corresponden a las tierras cultivadas y los sistemas de agro-silvicultura donde la estructura de la vegetación se encuentra por debajo de los umbrales utilizados para la categoría de tierras forestales.
3. **Pastizales/praderas:** en esta categoría se encuentran inmersas las tierras de pastoreo y los pastizales que no se consideran tierras de cultivo. Incluye también los sistemas con vegetación boscosa y otra vegetación no herbácea, como las hierbas y la maleza que están por debajo de los valores umbrales utilizados en la categoría de tierras forestales. La categoría también incluye todos los pastizales, desde las tierras sin cultivar hasta las zonas de recreación, así como los sistemas silvopastoriles, coherentes con las definiciones nacionales.
4. **Humedales:** en esta categoría se incluyen las zonas de extracción de turba, la tierra que está cubierta o saturada de agua durante todo el año o durante parte de éste y que no cumple las características del resto de las categorías, además de los reservorios, los ríos naturales y los lagos.
5. **Asentamientos:** constituye toda la tierra desarrollada, incluidas las infraestructuras de transporte y los asentamientos humanos de cualquier tamaño, a menos que ya estén incluidos en otras categorías, la categorización debe estar relacionada con las definiciones nacionales.
6. **Otras tierras:** forman parte de esta el suelo desnudo, roca, hielo y todas aquellas zonas que no estén incluidas en ninguna de las otras cinco categorías. Permite que el total de las superficies de tierra identificadas coincida con la superficie nacional de la que se tienen datos.

### 1.7. Importancia de los bosques en el Cambio Climático

Los bosques ocupan el 30% de la superficie del planeta y específicamente los bosques tropicales además de ser importantes por su extensión, destacan por la amplia provisión de servicios ecosistémicos siendo estos: de suministro, culturales y de regulación; los primeros hacen referencia a los recursos alimenticios, medicinales, de producción de agua, fuentes de energía, materia prima para construcciones, entre otros; los culturales engloban los servicios recreativos y estéticos, mientras que, los de regulación, como su nombre lo indica son servicios que favorecen las condiciones de vida en la tierra, entre los que se encuentran la regulación de inundaciones, deslaves, erosión, calidad del agua, la

protección costera, la regulación hidrológica (incremento de la infiltración y evapotranspiración) y la regulación climática del planeta, entre los que destacan: reducción de albedo y temperatura, uso de carbono en la fotosíntesis y fijación y almacenamiento de carbono atmosférico (Ruiz, Fernández y Sayer, 2007)

En el último siglo se ha desarrollado un amplio interés en la conservación y manejo de los bosques tropicales debido a la relevancia que tiene a nivel mundial para disminuir la presencia de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, debido su capacidad de almacenamiento y secuestro de Dióxido de Carbono, el cual representa uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI), lo que en efecto ha promovido a la firma de acuerdos y políticas públicas a diferentes escalas para disminuir los efectos del cambio climático (Balvanera, 2012). El almacenamiento hace referencia a la cantidad de carbono fijado por la vegetación en un momento determinado, es expresado en unidades de peso "*TnC/ha*", y su medición se basa el volumen proporcionado principalmente por el tipo de bosque y la densidad de la madera, mientras que el secuestro o fijación constituye la tasa de carbono que está fijando la vegetación, estado determinado por las características de las especies, la tasa de crecimiento, la longevidad y la edad de los individuos, la calidad del sitio, el clima, y la disponibilidad de recursos para su desarrollo, la medida utilizada está definida en tiempo "*TnC/ha/año*" (Ortiz y Riascos, 2006; Patiño, *et al.* 2018)

De igual manera es importante mencionar que ambos conceptos están relacionados con el Stock y Flujo de carbono, el primero está conformado por los componentes en donde se mantiene almacenado el carbono dentro de los ecosistemas, los depósitos pueden categorizarse en biomasa aérea y subterránea, necromasa, y suelos (Honorio y Baker, 2010; Galicia, *et al.* 2015).

### **1.8. Métodos de inventarios de Gases de Efecto Invernaderos para el sector AFOLU**

Las tierras forestales es la categoría de mayor interés para el desarrollo de esta consultoría en la que la cobertura evaluada y analizada son los bosques de la Reserva Forestal Imataca; los inventarios para estimar los cambios en la biomasa de los bosques y plantaciones forestales pueden realizarse a diferentes niveles en función del espacio geográfico (global, regional y de paisaje) y de los datos utilizados, los cuales pueden ser obtenidos de información procedente de organismos públicos y privados locales, nacionales o internacionales (Honorio y Baker, 2010; GCE, 2013), en este deben definirse también los objetivos del inventario, las preguntas a resolver y por ende los componentes a analizar, lo cual determinará el tipo de muestreo a realizar y las metodologías empleadas.

En el caso de los inventarios a nivel de paisaje, con frecuencia se busca resolver las siguientes interrogantes ¿Cuál es el stock de carbono del área protegida?, ¿Cómo cambia la biomasa del área protegida?, ¿Cómo varía la biomasa con los factores edáficos?, para responderlas Ogle, *et al.* (2019) en el refinamiento de las directrices del IPCC del 2006, definen dos métodos para hacerlo, el primero es el uso de modelos alométricos para la

estimación de biomasa y el segundo la utilización de mapas de densidad de biomasa contruidos a partir de la aplicación de sensores remotos.

Los modelos alométricos son ecuaciones basadas en la relación proporcional entre las dimensiones de individuos o su tasa de crecimiento a partir del estudio de al menos dos variables. Se diseñan comúnmente a partir de árboles individuales mediante un muestreo destructivo de una población utilizando un diseño de muestreo que proporciona datos precisos y representativos. La elección de modelos alométricos apropiados debe estar fundamentada en criterios como (Honorio y Baker, 2010; Ogle, *et al.* 2019):

- Ecorregión, rango geográfico, factores ambientales (por ejemplo, ecosistema, clima o tipos de suelo),
- Representatividad del modelo en consideración del rango de tamaño individual y la población muestreada,
- Componentes de la planta estimados (por ejemplo, sobre el suelo, bajo el suelo, tallo, ramas, follaje),
- Rasgos funcionales de la especie (por ejemplo, densidad de la madera y arquitectura de los árboles),
- Prácticas de manejo de tierras o cultivos, actuales e históricas,

En relación a la aplicación de sensores remotos, actualmente existe una amplia variedad de satélites con sensores tanto activos como pasivos que permiten el desarrollo de mapas de densidad de biomasa, los cuales se construyen combinando datos de teledetección con observaciones de campo, teniendo como ventajas que pueden aplicarse a escalas locales, nacionales, continentales y globales. La obtención de mapas de densidad depende de (Ogle, *et al.* 2019):

- Las definiciones de biomasa forestal y leñosa aérea utilizadas para producir el mapa,
- El tipo de fuentes de datos de teledetección en términos de resolución espacial, cobertura temporal y respuesta de la biomasa en evaluación,
- El método utilizado para construir el mapa. Dichos métodos pueden variar desde una simple interpolación de estimaciones de campo hasta modelado más complejo de biomasa usando estimaciones de campo y señales observadas por teledetección,
- La disponibilidad y confiabilidad de las estimaciones de biomasa obtenidas de los datos de campo necesarios para producir y validar el mapa de densidad de biomasa; la combinación de datos de detección remota y observaciones de campo puede ser desafiante debido al tamaño y la forma de los elementos primarios (es decir, el tamaño y la forma de la parcela de campo respecto a la resolución geométrica de los datos de detección remota),
- El grado en que se caracteriza la incertidumbre del mapa y la forma en que se utiliza para evaluar el sesgo y precisión para estimaciones.

Además de los mapas de densidad de biomasa, pueden también realizarse utilizando estas herramientas, estudios multitemporales de la variación de la biomasa, así como también el análisis de los cambios de uso de la tierra, y monitorear las causas que los generan.

## **Parte B: requerimientos para la estimación de carbono y las emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub>**

Una de las actividades claves para la estimación de carbono y emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub> es la búsqueda de datos e información, tanto descriptiva como cartográfica. La descriptiva generada a través, de publicaciones científicas en libros, capítulos de libros, tesis, artículos científicos e información procedente de internet; mientras que la cartográfica tanto básica como temática generada oficialmente a través, del estado venezolano mediante el MINEC y el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), de las concesionarias de manejo forestal de la RFI, de las agencias espaciales y los centros de investigaciones nacionales e internacionales.

Dichos datos e información se pueden obtener de dos vías, la primera, vía web, mediante el buscador de Google empleando palabras claves, a través de las páginas oficiales de la MINEC, IGVSB, FAO, IPCC, universidades y centros de investigaciones, y, a través de las redes sociales como el Facebook, ResearchGate, entre otras; la segunda, vía intercambio, con los especialistas y el personal técnico que conformaron el equipo multidisciplinario, pertenecientes a la Dirección General de Patrimonio Forestal (DGPF) del MINEC, empresas concesionarias que han realizado las actividades de aprovechamiento forestal selectivo en la RFI, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales (FCFA).

### **2.1. Información descriptiva**

La información descriptiva base se puede agrupar de tres maneras: información del aspecto legal nacional, información de las directrices internacionales e información de FE.

#### **Información del aspecto legal nacional**

Con el fin de conocer los aspectos legales en materia de bosque y cambio climático, así como los instrumentos jurídicos que guían las actividades de aprovechamiento de los bosques en los tres ámbitos de estudio: Reserva Forestal Imataca (RFI), Unidad-N5 y Unidad Ecomanejo Tukupú, se debe recopilar información sobre la Ley de Bosques (RBV, 2013), la Primera Comunicación Nacional del Cambio Climático de 2005 y Segunda Comunicación Nacional del Cambio Climático de 2017, el Plan de Ordenamiento y

Reglamento de Uso de la RFI (2004). Dicha información es importante, primero, para estudiar las directrices del manejo de los bosques del país, así como de los inventarios realizados hasta el momento sobre los gases de efecto invernadero; segundo, para conocer los límites oficiales de los ámbitos de estudio, y tercero, para conocer las actividades que en estos ámbitos se han desarrollado hasta el momento.

### **Información de las directrices internacionales**

Uno de los elementos importantes a considerar, para adaptar una metodología estándar que permita estimar el carbono y las emisiones y absorciones producto del uso y el cambio del uso de la tierra, son las directrices y orientaciones que ha establecido el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), asimismo es importante considerar las orientaciones metodológicas y guías prácticas generadas por los grupos de investigadores. En este sentido, se recopiló el Refinamiento 2019 de las Directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2019), las Directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2006), las Orientaciones de Buenas Prácticas (OBP) para Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) de 2003 (IPCC, 2003), las orientaciones metodológicas y guías prácticas, de la Iniciativa Mundial de Observación del Bosque de 2020 (GFOI, 2020) y de las Observaciones Mundiales de la Cubierta Forestal y la Dinámica del Uso de la Tierra de 2016 (GOF-C-GOLD, 2016).

### **Información de Factores de Emisión (FE)**

Dependiendo de la información de campo existente y recopilada, es importante considerar los valores establecidos en las tablas propuestas del IPCC, en investigaciones científicas y en algunos productos globales, esto definirá el nivel asumido para el cálculo de los Factores de Emisión. Dicho esto, debe recopilar los valores de biomasa y sus factores de transformación a C almacenados, establecidos recientemente en las tablas de Refinamiento 2019 de las Directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2019), es importante resaltar que, en refinamiento, se afinaron dichos valores en función de los ecosistemas, para nuestro caso los valores serán los reportados para los húmedos tropicales siempreverde; así se tienen los valores de biomasa aérea del producto global generado por Baccini *et al.*, (2012); y los reportados en algunos estudios científicos para el ecosistema de estudio, los cuales se están utilizando para la estimación de biomasa y C almacenado, y para compararlos y determinar las incertidumbres.

## **2.2. Datos Cartográficos**

Dentro de los datos cartográficos se debe recopilar la cartografía oficial a nivel nacional, cartografía oficial a nivel regional, productos globales, datos de sensores nacionales, datos de sensores internacionales y, compuestos de imágenes.

### **Cartografía oficial a nivel nacional**

Con el propósito de realizar una caracterización físico-natural y socio-económica para la RFI, se debe recopilar información cartográfica generada por el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), a través del Sistema de Información para la Gestión y Ordenación del Territorio (SIGOT) (SIGOT, 2006); del Manejo de los Recursos Naturales y Ordenamiento de Tierras (MARNOT) (MARNOT, 2007); y de las hojas cartográficas a escala 1/100.000 y a escala 1/25.000.

### **Cartografía oficial a nivel regional**

En el ámbito de la RFI se han realizado una serie de proyectos que han generado información cartográfica de los aspectos físico-natural y socio-económicos, esta información debe ser recopilada y utilizada como base para la presente consultoría. La misma fue generada por la Corporación Venezolana de Guayana a través del Proyecto Inventario de los Recursos Naturales de la Región Guayana. Ciudad Bolívar. Venezuela (CVG-TECMIN,1987); por el antiguo Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables a través de los proyectos Recopilación y Análisis de Información Básica existente acerca de la Reserva Forestal Imataca (RFI) (CIERFI-MARN, 2001), por la Universidad Central de Venezuela a través del proyecto Ordenamiento Territorial de la Reserva Forestal Imataca y sus áreas adyacentes (Berroteran, 2003). Asimismo, dentro de la Unidad-N5 y la Unidad-C3 (donde se encuentra la Unidad Ecomanejo Tukupú), se elaboró información a través de los Planes de Ordenación y Manejo Forestal, la misma se ha recopilado y actualmente se encuentra procesándose.

### **Productos globales**

Con la disponibilidad actual de grandes cantidades de datos de sensores remotos y avances en el desarrollo de los algoritmos para procesarlos, así como el aumento en la capacidad de almacenamiento, se han generado una serie de productos globales de alta y media resolución, que deben considerarse para las estimaciones dentro de la RFI, para procesarlos y generar los resultados planteados en cada objetivo. La mayoría de estos datos se encuentran en los repositorios de las instituciones y los centros de investigación donde los originaron, se pueden acceder a ellos a través de la herramienta Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com>) (Gorelick *et al.*, 2017), para esto se deben desarrollar una serie de script en el lenguaje de programación Java, para procesarlos en la nube y descargarlos en la computadora local de trabajo.

Por medio del desarrollo de estos script se pueden descargar los productos globales: Modelo Digital de Elevación de 30 m de resolución espacial SRTM (Farr *et al.*, 2007); Global Forest Change en su versión v1.8, que posee información planetaria del bosque del 2000 hasta el 2020 (Hansen *et al.*, 2013); datos de stock de carbono de biomasa aérea a nivel nacional pantropical de 500 m (Baccini *et al.*, 2012); variables bioclimáticas de precipitación

y temperatura de 1 km (Fick y Hijmans, 2017); contenido de materia orgánica en el suelo a 30 cm de profundidad de 250m; altura del dosel forestal de 30 m (Potapov et al., 2021); y flujos de carbono forestal (Harri *et al.*, 2021).

### **Datos de sensores nacionales**

En el país se han desarrollado una serie de proyectos cartográficos que han generado datos de sensores remotos importantes para las estimaciones de carbono y las emisiones y absorciones de la RFI. Dicha información está referida a las ortoimágenes de radar, Modelos de Elevación del Terreno (MDT) y Modelo Digital de Superficie (MDS) OrbiSAR-1 a escala 1/50.000, generadas del sistema de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR), bandas X y P, de resolución espacial de 5.5 m y radiométrica de 32 bits, proyección: Universal Transverse Mercator, Datum: SIRGAS-REGVEN, Elipsoide: GRS80, Meridiano Central: -63.000000 y número de zona: 20 N, obtenidas en el 2003 por la compañía Orbisat da Amazônia SA (Brasil), en cooperación con Infoterra GmbH (Alemania) (Orbisat da Amazônia SA, 2004); en el proyecto CARTOSUR II (Orbisat da Amazônia SA, 2004).

Asimismo, dicha información refiere a las imágenes multiespectral del satélite Miranda o Venezuelan Remote Sensing Satellite (VRSS-1), lanzado el 29 de septiembre de 2012, de 16 m de resolución espacial; y las imágenes del satélite Sucre o Venezuelan Remote Sensing Satellite (VRSS-2), lanzado el 09 de octubre del año 2017, pancromática (PAN) de 1 m de resolución y multiespectral (MS) de 3 m de resolución.

### **Datos de sensores internacionales**

Para la interpretación de la degradación forestal producto del aprovechamiento forestal selectivo dentro de la RFI se deben recopilar imágenes de la serie temporal Landsat 4, 5, 7 y 8 sensores MSS, TM, ETM+ y OLI, con un nivel de corrección geométrica L1, las cuales pertenecen específicamente de los path/row 232/005, 2333/054 y 233/055. De igual manera se deben recopilar imágenes del satélite Sentinel 2, que posee un tamaño de pixel 10 m, y, un nivel 1C de corrección geométrica que empleo de un DEM de 90 m. Tanto las imágenes de la serie temporal Landsat como las de Sentinel 2 fueron obtenidas gratuitamente de la colección del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (U.S. Geological Survey) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>),

Asimismo, se debe recopilar los mosaicos de las imágenes multiespectrales de Planet de 4 m de resolución, con estos se construyó un mosaico continuo del año 2020 (Figura 3.4). Estas imágenes han sido tomadas a partir del año 2016 mediante Constelación de 130 pequeños satélites PlanetScope, actualmente son gratuitas para los países tropicales a través del convenio con el gobierno noruego (<https://www.planet.com/>).

## Compuestos de imágenes

Con la finalidad de generar los mapas de cobertura y uso de la tierra de la RFI, los cuales serán la base de los Datos de Actividad (DA) para la estimación de carbono y las emisiones y absorciones, se deben procesar y recopilar mosaicos de compuestos de imágenes Landsat. Estos compuestos deben ser procesados en la nube a través de la herramienta GEE, los mismos se obtuvieron mediante la combinación de imágenes superpuestas espacialmente en una sola imagen basada en una función de múltiples rangos de agregación espectrales y temporales (GEE developers, 2020a). Estos mosaicos (multibanda y multidate) se construyeron con la mediana de cada pixel de las bandas Red, Near Infrared (NIR) y Short-wave infrared (SWIR), luego se exportaron a Google Drive con 30 m de resolución, formato tiff y sistema World Geodetic System 1984 (WGS84) mediante la función Exporting Data de GEE (GEE developers, 2020b).

Los datos utilizados fueron la reflectancia de superficie de las imágenes Landsat con resoluciones de 16 días y 30 m, proporcionados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y disponibles en GEE (<https://earthengine.google.com>) (Gorelick *et al.*, 2017). Los datos de reflectancia de superficie Landsat en GEE fueron corregidos atmosféricamente utilizando los algoritmos Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) (TM y ETM+) y Landsat Surface Reflectance Corrected (LaSRC) (OLI) (Maske *et al.*, 2013; Vermote *et al.*, 2016). Luego, de acuerdo con el algoritmo CFMASK proporcionado por el GEE, se obtuvo el puntaje de calidad de píxel (pixel\_qa), eliminando así píxeles como nubes y sombras de nubes (Zhu and Woodcock, 2012; Foga *et al.*, 2017).

### 2.3. Datos de campo

Los datos necesarios para la obtención de los FE, se deben obtener de la recolección en el campo y de recolección bibliográfica.

#### Recolección en el campo

Si existe la posibilidad de recolectar información de campo, se debe seguir el Protocolo de Monitoreo de Unidades de Muestreo Multifuncionales realizado mediante una consultoría de la Empresa Nacional Forestal (ENFORESTAL) (Serrano, 2020), el cual se fundamenta en la elaboración de un censo de los individuos comerciales, simultáneamente en un muestreo sistemático de pre aprovechamiento con parcelas de 1000 m de longitud por 10 m de ancho las cuales se aplicaron con una intensidad del 1% sobre el área total de la PI, de este muestreo se derivó un sub-muestreo del 10% en los cuales se recolectarán los datos para analizar la diversidad y el carbono. En este trabajo de campo se deben recolectar datos fundamentales para la estimación de las reservas de carbono en los depósitos de AGB, biomasa muerta (detritus) y COS.



## Recolección bibliográfica

Esta referida a los datos de campo que han sido levantados para diferentes fines, como los levantados para fines de aprovechamiento por parte de las concesionaras madereras a través de parcelas temporales para los inventarios de pre y post aprovechamiento; los levantados para fines de estudiar la dinámica del bosque, como las parcelas permanentes establecidas por el proyecto RAINFOR ([www.rainfor.org](http://www.rainfor.org)) los cuales son disponible mediante el portal [forestplot.net](http://forestplot.net) (López-González *et al.*, 2011), este grupo de parcelas permanentes se establecieron en el año 2014 en la RFI; o los levantados con el fin de realizar estudios florísticos, para conocer la composición y estructura del bosque.

## Parte C: directrices metodológicas para los datos de actividad (DA)

Los DA necesarios para el cálculo de C en los depósitos de biomasa terrestre y en las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>, se deben generar a partir de los mapas de cobertura de uso de la tierra. Para ello hay que considerar el mapeo completo (wall-to-wall) para determinar los usos de la tierra, los diferentes tipos de bosques y posteriormente los cambios de las tierras forestales, este procedimiento según las directrices del IPCC es el Procedimiento 3, que involucra el mayor nivel de detalle para determinar los DA (IPCC, 2019). En tal sentido, la producción de dicho mapeo puede realizarse bajo la guía de las siguientes directrices:

### 3.1. Criterios conceptuales y cartográficos

Antes de llevar a cabo cualquier proyecto que involucre la elaboración de mapas, es necesario precisar una serie de criterios conceptuales y cartográficos, que permitieron establecer los lineamientos sobre los cuales se elaborará dicha cartografía. Para este caso particular, se deben establecer como criterios los definidos a continuación.

- **Bosque:** es importante contar con una definición clara de bosque, ya que la misma permitirá estimar la deforestación y otros cambios detectados en las imágenes utilizadas. La definición de bosque que se asumirá es derivada, por un lado, de la Ley de Bosques de Venezuela (RBV, 2013), que indica que los bosques nativos deben poseer una superficie mínima de 0,5 ha; y, por otro lado, de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), que indica que la cobertura mínima de copa de árboles es del 10% y que el potencial de alcanzar una altura mínima de madurez in situ es de 5 m (UNFCCC, 2011).
- **Deforestación:** en cuanto a la definición de deforestación, se asumirá en esta consultoría, la tomada de la Decisión 11/CP.7 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), en ésta la deforestación se define como "...la conversión directa, inducida por el hombre de tierras boscosas en tierras no forestales." (UNFCCC, 2011).

- Degradación forestal: es un proceso de cambio que la FAO define como "cambios dentro del bosque que afectan negativamente la estructura o función del rodal y el sitio y, por lo tanto, reducen la capacidad de suministrar productos y / o servicios" (FAO, 2002). La degradación forestal es originada según Hosonuma et al., (2012) por la recolección de leña, los incendios, el pastoreo y el aprovechamiento forestal selectivo, esta última actividad será evaluada en esta consultoría.
- Unidad mínima de interpretación (UMI) y la línea base: la UMI asumida será de 0,5 ha, como línea base para la RFI el año 2000 y como años de evaluación 2010 y 2020.
- Sistema de coordenadas: se asumirá el sistema de coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM), zona 20 del hemisferio norte y el datum WGS84 – Regven (Sistema Geodésico Mundial 1984 - Red Geocéntrica Venezolana), datum oficial para Venezuela desde el año 1999 según la Gaceta Oficial N° 36.653.
- Leyenda: en cuanto a la leyenda, se considerará como base las categorías de uso de suelo de la OBP-UTCUTS de 2003 (tierras forestales, tierras agrícolas, humedales, pastizales, asentamientos y otras tierras), la cual se adaptará a las condiciones propias de la RFI, Unidad N-5 y la UPF-EPDC-Tukupú, que variará con el nivel de detalle y el aumento de la escala. Con base a estas se estimarán las reservas de carbono terrestres y las emisiones y absorciones de C debido al proceso del cambio de uso de la tierra.

### 3.2. Análisis de los datos satelitales

Con la finalidad de reducir la incertidumbre de los mapas que se elaboraran y con ello aumentar la precisión de los valores de C y las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>, se debe emplear como método de análisis de datos de satélites la interpretación visual en pantalla (IPCC, 2019; GFOI, 2020), con los criterios establecidos por Chuvieco (2016), para diferenciar cada una de las coberturas de uso presente en el área de estudio en función de la adaptación de la leyenda del IPCC.

- El color: para la interpretación visual las múltiples combinaciones del color proporcionan el realce de los diferentes elementos en las cubiertas vegetales, así como la discriminación de cada elemento. Para este caso en particular, para las imágenes multiespectrales que se están empleando, se está utilizando las combinaciones a falso color, en el cañón rojo la banda roja, en el verde el infrarrojo cercano y en el azul la verde. Esta combinación permitirá a través del color diferenciar los límites de las diferentes coberturas, especialmente las correspondientes a la vegetación.
- El tono: se toma en cuenta la intensidad de energía solar recibida por el sensor para una determinada banda del espectro electromagnético, relacionando la

respuesta espectral de las distintas cubiertas, para las bandas particulares del espectro en el que se desee trabajar.

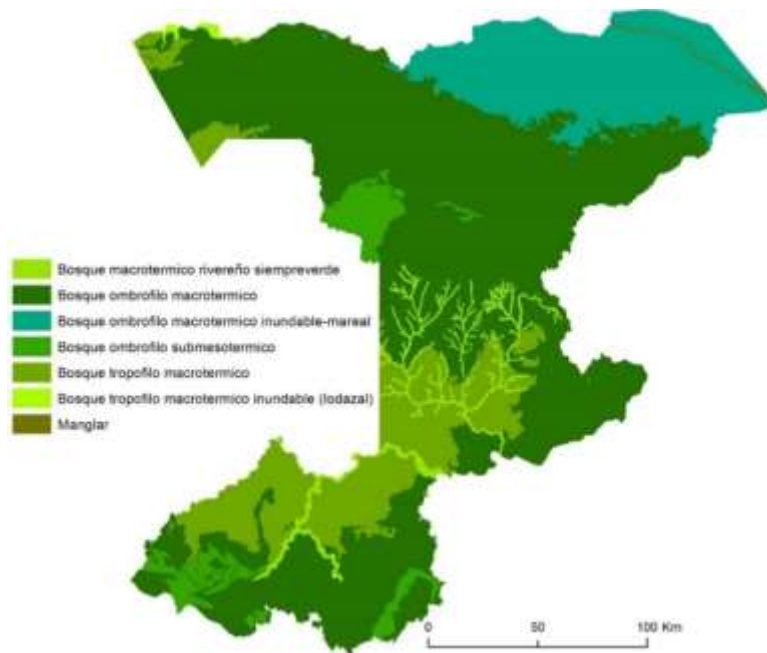
- La forma: se considera la configuración general de los bordes o límites del objeto u elemento contenido en la escena, dando la característica particular para ser clasificado, o del mismo modo para asignarlo a un grupo de formas comunes.
- El tamaño o dimensión: como se observan los objetos en la imagen depende de sí mismo y de la resolución espacial de la imagen. La experiencia del intérprete y el conocimiento previo del área de estudio permitirán diferenciar con mayor precisión los objetos censados en las imágenes.
- La textura: se refiere a la impresión visual de suavidad o aspereza creada por la imagen de detalle u objetos en el terreno, debido a la alternancia de las zonas iluminadas y las zonas en sombras de estos que se repiten.
- El patrón espacial: disposición particular de los diferentes elementos contenidos en la escena. Existen patrones naturales que por lo general están bien definidos, en líneas sinuosas, los patrones artificiales lo definen formas geométricas.

### **3.3. Estratificación del bosque**

Debido a que, hasta el momento en el proceso de elaboración de los mapas de cobertura de uso, se ha considerado la categoría de bosque en una sola sin discriminar los diferentes tipos que en esta se encuentra. Se debe proceder a estratificar dicha categoría dentro de los mapas de cobertura de uso, con la finalidad de diferenciar los depósitos y minimizar la incertidumbre en la estimación de C y las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2019; GFOI, 2020).

En tal sentido, para clasificar el bosque de la RFI, se puede asumir como criterio el planteado por CIERFI-MARN (CIERFI-MARN 2001), el cual se debe modificar para diferenciar los diferentes macroecosistemas de la reserva, del mismo se considera siete clases de bosque: bosque ombrófilo macrotérmico inundable-mareal, bosque macrotérmico ribereño siempreverde, bosque ombrófilo macrotérmico, bosque ombrófilo macrotérmico inundable-mareal, bosque ombrófilo submesotérmico, bosque tropófilo macrotérmico y bosque tropófilo macrotérmico inundable (lodazal) (Figura 4).

Una vez modificado el mapa de vegetación se interceptó al primer producto cartográfico, de este se obtendrá un segundo producto cartográfico, con las cinco categorías básicas del IPCC, de las cuales se derivarán 18 subclases generadas de la interpretación y de la realidad de la RFI (Tabla 1).



**Figura 3.4.** Mapa de vegetación de la RFI modificado de CIERFI-MARN (2001).

**Tabla 1.** Clases del IPCC y subclases de los mapas de cobertura y uso de la tierra.

Clases IPCC 2003	Subclases RFI	Código
Tierras forestales	Bosque macrotérmico ribereño siempreverde	Bmrs
	Bosque ombrófilo macrotérmico	Bom
	Bosque ombrófilo macrotérmico inundable-mareal	Bomim
	Bosque ombrófilo submesotérmico	Bos
	Bosque tropófilo macrotérmico	Btm
	Bosque tropófilo macrotérmico inundable (lodazal)	Btmi
	Manglar	Man
	Plantación forestal	Pf
Tierras agrícolas	Cultivos	C
Pastizales (Praderas)	Corta fuego	Cf
	Herbazal	H
Humedales	Pecuario	P
	Ríos	R
	Turberas	T
Asentamientos	Asentamientos humanos	Ah
	Minería	M
	Vialidad	V
Otras tierras	Otras Coberturas	Oc

### 3.4. Interpretación de la degradación forestal producto del aprovechamiento forestal selectivo

Las tierras forestales dentro de la RFI han sido gestionadas desde principios de la década de los ochenta, por el aprovechamiento forestal selectivo, que se ha desarrollado legalmente (Vilanova, 2020; Pacheco *et al.*, 2021), esto ha traído como consecuencia una degradación de los bosques que ha producido emisiones significativas de carbono. Acá se debe analizar la degradación forestal producto del aprovechamiento forestal selectivo, el resultado de este análisis, por un lado, se debe incorporar según las fechas de aprovechamiento a los mapas de cobertura y uso de la tierra de la RFI como una nueva subclase denominada "bosque degradado", y, por otro lado, se utilizar para realizar las estimaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las tierras forestales que permanecen como tal.

La metodología a utilizar para el análisis de la degradación forestal producto del aprovechamiento forestal selectivo consistió, por un lado, en ubicar el mapa de unidades de manejo forestal según el Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso (PORU) de la RFI (RBV, 2004) y determinar las fechas de aprovechamiento y los compartimientos aprovechados de cada una de las unidades (Azuaje, 2018), con la finalidad de ubicar las imágenes de la serie temporal de Landsat. Y, por otro lado, en elaborar la cartografía del aprovechamiento forestal selectivo (AFS) y degradación forestal (DF), según lo planteado por Pacheco-Angulo *et al.*, (2021), la misma consta de los siguientes pasos:

- Configuración del sistema TerraAmazon que incluye desde la creación de una base de datos en PostgreSQL, hasta la definición de las reglas y área de control (INPE-FUNCATE, 2013).
- Exportación del conjunto de datos de la serie temporal de Landsat, para obtener el modelo lineal de mezcla espectral (MLME) de Shimabukuro (1991), en cada imagen.
- Selección, a partir del MLME, de la capa sintética de suelo para aplicarle una máscara de nube y sombra de nube según los criterios de Vidal *et al.*, (2015).
- Con la fracción suelo, sin nubes ni sombra de nubes, se realizó una clasificación binaria con y sin aprovechamiento forestal selectivo (Shimabukuro *et al.*, 2019; Souza y Barreto, 2000), utilizando el algoritmo de árbol de decisión y el umbral que define por debajo de 37% evidencias de no aprovechamiento y entre 37 y 100% evidencias de aprovechamiento (Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).
- Las diferentes actividades de aprovechamiento forestal selectivo se clasificarán cartográficamente, considerando los patios de acopio, vías de aprovechamiento y áreas de arrastres (Souza, 2013; GOF-C-GOLD, 2016).
- A partir de la cartografía de AFS de cada uno de los compartimientos de las unidades de manejo, se determinarán de manera indirecta la cartografía de DF, la cual se obtuvo mediante aplicación de un búfer cuadrado que consideró 300 m de umbral (Pacheco-Angulo *et al.*, 2021).

## Parte D: directrices metodológicas para los factores de emisión (FE)

### 4.1. Definición de los depósitos terrestre de C

Una vez se determinado los DA a través de los mapas de cobertura y uso de la tierra, se procederá a estimar las reservas de C en cada una de las subclases. Antes de describir la propuesta metodológica que se desarrollará para la estimación de los depósitos terrestres de C y las emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub>, es importante señalar la definición de estos depósitos. En este sentido, en la tabla 2 se detalla la conceptualización establecida por el IPCC a los depósitos terrestres aproximados, estos están conformados por cinco.

**Tabla 2.** Definiciones de los depósitos terrestres de C.

Depósito		Descripción
Biomasa viva	Biomasa aérea	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, con inclusión de tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje.  Nota: Cuando el sotobosque es un componente relativamente pequeño del depósito de carbono de biomasa sobre el suelo se puede excluir de las metodologías y datos asociados utilizados en algunos niveles, siempre y cuando los niveles se utilicen de manera coherente en todas las series cronológicas de inventarios.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa viva de raíces vivas. A veces se excluyen raíces finas de menos de (sugerido) 2mm de diámetro porque con frecuencia no se pueden distinguir empíricamente de la materia orgánica del suelo o mantillo.
Materia orgánica muerta	Madera muerta	Comprende toda la biomasa boscosa no viva no contenida en el mantillo, ya sea en pie, superficial o en el suelo. La madera muerta comprende la que se encuentra en la superficie, raíces muertas y tocones de 10 cm de diámetro o más o de cualquier otro diámetro utilizado por el país.
	Mantillo (Detritus)	Comprende toda la biomasa no viva con un diámetro inferior a un diámetro mínimo elegido por el país (por ejemplo, 10 cm), que yace muerta, en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico. Comprende las capas de detritus, fúmica y húmica. Las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite de diámetro sugerido para la biomasa bajo el suelo) se incluyen en el mantillo cuando no se pueden distinguir empíricamente de él.
Suelos	Madera orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en suelos minerales y orgánicos (incluida la turba) a una profundidad especificada elegida por el país y aplicada coherentemente mediante las series cronológicas. Las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite de diámetro sugerido para la biomasa bajo el suelo) se incluyen con la materia

---

orgánica del suelo cuando no pueden distinguirse empíricamente de ella.

---

Fuente: Refinamiento 2019 de las Directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2019).

#### **4.2. Cálculo del C almacenado en la biomasa aérea (AGB)**

Debido a la escasa información referente a los datos de levantamiento de parcelas en las diferentes categorías de uso de la tierra, en esta guía se recomienda emplear Niveles 1 y 2 para la estimación de C de la AGB, la biomasa subterránea, la materia orgánica de madera muerta, la materia orgánica de detritus y la biomasa en el suelo, en las diferentes clases del mapa de uso de la tierra que poseen estos depósitos. El Nivel 1 utiliza valores de C por defectos que proporciona el IPCC, para las seis clases de cada área continental a fin de abarcar las diferencias en elevación y zona climáticas general. Mientras que el Nivel 2 utiliza datos de levantamientos de campo, que ya fueron levantados mediante inventario comercial de las empresas concesionarias, reportes de investigaciones, parcelas permanentes y parcelas temporales.

Para el caso del C de la AGB se puede utilizar un Nivel 1 mejorado, mediante la calibración de un modelo estadístico que permite generar un mapa de AGB en cada año de evaluación para toda la superficie de la RFI, a partir de datos de reflectividad de Landsat de 30 m de resolución y los datos del mapa de densidad de carbono de Baccini *et al.*, (2012) de 500 m de resolución, se utiliza el algoritmo de aprendizaje automático RandomForest (Breiman, 2001).

El modelo basado en Landsat proporciona estimaciones continuas de la magnitud del carbono almacenado en la vegetación, minimizando las limitaciones de los enfoques anteriores (por ejemplo, observaciones de campo y LiDAR que no coinciden espacial y temporalmente) (Saatchi *et al.*, 2011). El enfoque no requiere información espacial sobre el tipo de vegetación (por ejemplo, la derivada de mapas de cobertura terrestre) ya que se basa más directamente en la información espectral, en los datos satelitales calibrados.

Los modelos estadísticos para cada fecha se deben desarrollar en el GEE, mediante un script desarrollado que contenga, en primer lugar, la misma imagen compuesta libre de nubes y sombra de nubes que se utilizó para realizar la interpretación en cada año, para ello se empleó los mismos algoritmos explicados en el ítem 2.2; en segundo lugar, la calibración del modelo con el algoritmo RandomForest, mediante 500 muestras, extraídas del mapa de densidad de carbono de Baccini *et al.*, (2012) y de los valores espectrales de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 para Landsat 7 y 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 10 para Landsat 8; y, en tercer lugar, la validación del modelo mediante la extracción de 500 muestras aleatorias, tanto del mapa de densidad de carbono de Baccini *et al.*, (2012) como del mapa de densidad de Landsat recién creado, esto genera la matriz de confusión y la exactitud global del estimador.

Cada mapa de AGB generado se estratificó con los mapas de cobertura y uso de la tierra de la RFI, para obtener los valores en Mg por ha de AGB para cada una de las categorías, a través de un análisis estadístico zonal de media. Finalmente, los valores de AGB ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) se transformarán a C ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) asumiendo el factor 0,5 de Brown *et al.*, (2005).

#### **4.3. Cálculo del C biomasa subterránea**

Con respecto al C almacenado en el depósito de la biomasa subterránea del árbol (raíces), que rara vez se mide, se debe aplicar la relación raíz-vástago, establecida por el Refinamiento 2019 de las Directrices del IPCC (IPCC, 2019), para los tres ámbitos se utilizó el factor  $0,284 \pm 0,061$  que se sugiere para bosques húmedos tropicales de Norte y Suramérica con AGB mayor a  $125 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Mientras que para los pastizales el factor a aplicarse será un factor de expansión de 1,6, debido a que las adaptaciones a los incendios y al pastoreo han arrojado relaciones raíz-vástago más elevadas que en muchos otros ecosistemas (IPCC, 2019), y para los cultivos no se utilizaron valores de biomasa subterránea debido a que anualmente se cosechan.

#### **4.4. Cálculo del C madera muerta**

El carbono de la madera muerta varía considerablemente de una masa forestal a otra a lo largo del paisaje, tanto en las gestionadas como, incluso, en las no gestionadas. Las cantidades de madera muerta dependen de la fecha de la última alteración, de la cantidad de material aportado (mortalidad) en la fecha de la alteración, de las tasas de mortalidad natural, de la tasa de descomposición, y de la gestión. El planteamiento propuesto por el IPCC reconoce la importancia regional del tipo de bosque, del régimen de alteración y del régimen de gestión con respecto a las reservas de carbono en la madera muerta, y permite incorporar conocimientos y datos científicos disponibles.

En este sentido, el promedio a utilizar para la estimación de la biomasa muerta en todas las subclases de la clase tierras forestales será el reportado por Delaney *et al.*, (1997) en la RFI, este valor es de  $33,3 \pm 7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

#### **4.5. Cálculo del C detritus (hojarasca)**

Con respecto a la acumulación de detritus está en función de la cantidad anual de detritus depositado en forma de hojas, briznas y ramillas, frutos, flores y corteza, menos la tasa anual de descomposición. La masa de detritus depende también de la fecha de la última alteración y del tipo de alteración. Durante las primeras etapas del desarrollo de las masas forestales, el detritus aumenta rápidamente. Prácticas de gestión tales como la recolección de madera, la quema de maleza o la preparación del lugar alteran enormemente las propiedades del detritus, pero existen pocos estudios que documenten claramente los efectos de la gestión sobre el carbono presente en el detritus.



El IPCC establece como valor por defecto de las reservas de C en detritus medio para el bosque húmedo tropical siempre verde de hoja ancha, no obstante, en para esta consultoría se utilizó el reportado por Cuevas y Medina (1986) para los bosques húmedos de América, este valor es de  $6,6 \pm 0,46 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

#### 4.6. Cálculo del Carbono Orgánico en el Suelo (COS) del suelo

Para el cálculo de las reservas intermedias de carbono orgánico en el suelo (COS) en el ámbito de la RFI, se puede aplicar el método desarrollado en la consultoría protocolo para la valoración ambiental y económica de la RFI (Pérez, 2019), esta metodología se basa en el Refinamiento 2019 de las directrices del IPCC 2006 (IPCC, 2019) y de la metodológica de la FAO (2017), la misma se puede considerar una mejora del Nivel 1 del IPCC.

En este sentido, se debe considerar el levantamiento a nivel de gran grupo de suelos y macroecosistemas en la RFI efectuado por CIERFI-MARN (2001) y Berroteran (2003), a escala 1/250.000, con este levantamiento y el uso de los sistemas de información geográfica (SIG), se utilizó para el cálculo del COS el planteado en la ecuación 1.

$$\text{Reserva COS} = \text{CO} * \text{Da} * \text{d} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: Reserva de COS: es la reserva de carbono orgánico en el suelo, expresada en  $\text{kg} * \text{m}^{-2}$ ; CO: es el contenido de carbono orgánico en el suelo, expresado en  $\text{g} * \text{kg}^{-1}$ ; Da: es la densidad aparente del suelo, expresada en  $\text{kg} * \text{m}^{-3}$ ; d: es el espesor del suelo, asumido en 30 cm, conforme a los métodos predeterminados del IPCC (FAO, 2017).

Posteriormente, se debe estimar los valores de las variables ambientales asociadas a la materia orgánica en el suelo: clima, textura inferida del suelo, esqueleto grueso, posición en el paisaje y tipo de cobertura vegetal predominante.

Para la evaluación del CO se consideró la relación de la ecuación 2.

$$\text{CO} = \text{MO} * 1,73^{-1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: CO: es el contenido de carbono orgánico, expresado en  $\text{g} * \text{kg}^{-1}$ ; MO: es el contenido de materia orgánica, expresada en  $\text{g} * \text{kg}^{-1}$ .

Considerando que, en el nivel de trabajo, Nivel 1, no se dispone de muestreos de campo, para la determinación de la MO, se tiene que utilizar la relación entre la erosionabilidad del suelo (K, expresada en  $[\text{t} * \text{ha}^{-1}] * [(\text{mJ} * \text{mm}) * (\text{ha} * \text{h})^{-1}]$ , que hace referencia a la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad en las condiciones de una parcela de dimensiones definidas, mantenida sin cobertura y labrada en sentido de la pendiente, como lo expone Wischmeir *et al.*, (1971), la textura del suelo y su contenido de Materia Orgánica, según lo reportan Kirkby y Morgan (1980).

El valor original de K (Wischmeir *et al.*, 1971) depende específicamente de cinco factores: la clase textural, el contenido de materia orgánica, el predominio de granulometrías intermedias, la estructura y la permeabilidad de los suelos. Kirkby & Morgan (1980) asumen que una buena aproximación al valor K puede obtenerse considerando solo dos variables fundamentales: MO y clase textural del suelo. La MO es una variable esencial, que suministra cementación al suelo y eleva la estabilidad de los agregados, mejorando su estructura y resistencia al desprendimiento, además de mejorar la infiltración y en consecuencia reduciendo la escorrentía. Es decir, un suelo con un buen contenido de materia orgánica disminuye su probabilidad de ser erosionado.

Con base a este planteamiento se tiene que, conociendo la clase textural y el factor de erosionabilidad de los suelos (K) de la RFI, se puede estimar en consecuencia el porcentaje de MO correspondiente. Con esta modificación en la interpretación del método, se concibió una alternativa para obtener una aproximación a los valores de MO (%) en la Reserva, bajo el escenario de la muy limitada información disponible al respecto.

Al igual que Pérez (2019), los valores de K dentro de la RFI serán tomados en unidades del Sistema Inglés (y transformados a unidades del Sistema Internacional) de la base de datos del Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos (Hydro-BID). El Hydro-BID, utiliza la estructura de datos y las topologías de red de cuencas y corrientes de datos de Hidrología Analítica (Analytical Hydrographic Dataset, AHD), este sistema incorpora datos de uso de tierras, tipos de suelos, precipitaciones y temperatura dentro del área de estudio, así como los flujos de corrientes observados, en el caso de los datos de suelo, los mismos provienen de la Base de Datos Armonizada Mundial de Suelos (HWSD, por sus siglas en inglés), la cual en el continente americano fue complementada por el ISRIC-World Soil Information, junto con la FAO (BID, 2019).

En el caso de la identificación de las clases texturales predominantes en la RFI, las mismas deben ser tomadas de Pérez (2019), quien relacionó cada punto de K con las variables: relieve, paisaje, material parental y la clasificación taxonómica a nivel de Gran Grupo, ya expuestas en Berroterán (2003).

Para la asignación de los valores densidad aparente, se supone una primera aproximación en función de las clases texturales predominantes en los suelos de la Reserva, posteriormente se asumirá que la densidad aparente está condicionada, además, por el contenido (estimado) de materia orgánica (% MO) y la clasificación taxonómica de los suelos en el área en estudio; esto es: para suelos con un contenido de MO igual o superior a 6% se asume que la Da disminuya en aproximadamente 25%, mientras que en los Ultisoles (suelos generalmente bien estructurados), la reducción se espera en

aproximadamente 10% con respecto a otros suelos con igual textura pero pobremente estructurados.

Luego de estimar el CO y la Da, serán multiplicados por la profundidad asumida y determinadas las Reservas puntuales intermedias del COS en la RFI. Posteriormente los datos puntuales serán interpolados con el uso de un Sistema de Información Geográfica a fin de obtener la distribución espacial del COS. Una vez reflejada espacialmente la información, la misma fue superpuesta con el mapa de uso y cobertura de la tierra, para el año 2000, con el propósito de estimar los valores del COS en función de cada cobertura.

## **Parte E: directrices metodológicas para la evaluación de la incertidumbre y las estimaciones de carbono y las emisiones/absorciones de CO<sub>2</sub>**

### **5.1. Evaluación de la incertidumbre**

La incertidumbre es la falta de conocimiento del verdadero valor de un parámetro. La evaluación de la incertidumbre es fundamental en los ámbitos del IPCC y de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC): el IPCC define los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) conforme a las buenas prácticas como aquellos que *“hasta el momento no contienen sobrestimaciones ni subestimaciones en la medida que puedan juzgarse y en los que las incertidumbres se reducen tanto como sea factible”* (IPCC, 2019).

La identificación y cuantificación correctas de las diversas fuentes de incertidumbre ayudarán a evaluar la solidez de las estimaciones de C en los tres ámbitos analizados y las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> en la RFI y la Unidad-V, a fin de asegurar que no se sobrestimen las reducciones de las emisiones o los aumentos de las absorciones. A partir de la orientación del IPCC (2003), se determinarán algunos elementos básicos para la identificación, cuantificación y combinación de incertidumbres para las estimaciones del área y cambios del área (los datos de actividad, DA) y de las reservas de carbono y cambios en las reservas de carbono (los factores de emisión, FE).

### **5.2. Incertidumbre de los cambios del área**

En el contexto del IPCC, una estimación del área o cambio del área surge generalmente del análisis de un mapa basado en la detección remota, estos mapas están sujetos a errores de clasificación que inducen a sesgos en las estimaciones. Un enfoque adecuado es evaluar la exactitud del mapa y utilizar los resultados de la evaluación de exactitud para ajustar las estimaciones del área. La mayor parte de los métodos de clasificación de imágenes tienen

parámetros que pueden ajustarse para reducir las incertidumbres. Un buen ajuste reduce el sesgo, pero tiene cierto grado de subjetividad.

El objetivo de la evaluación de exactitud consiste en clasificar la frecuencia de los errores (omisión y comisión) para cada clase de cubierta terrestre, las diferencias en estos dos errores pueden utilizarse para ajustar las estimaciones del área y también para estimar las incertidumbres (intervalos de confianza) para las áreas de cada clase. El ajuste de las estimaciones del área a partir de una evaluación rigurosa de la exactitud representa una mejora con respecto a la simple presentación de informes de las áreas de las clases de mapas.

Dicho esto, resulta necesario evaluar la calidad de los mapas de cobertura y uso de la tierra generados para los tres ámbitos, de cara a conocer la incertidumbre de los productos generados y valorar el grado de acuerdo con la realidad (Chuvienco, 2016; Congalton y Green, 2009; Jensen, 2005; Olofsson *et al.*, 2020). Este proceso de evaluación requiere comparar el resultado con una fuente externa, que se considere fiel representante de la realidad presente en el terreno. Como lógicamente no es posible tener esa información para toda la RFI el proceso de evaluación requirió aplicar técnicas de muestreos, que permitirán estimar, con la mayor precisión y el menor tiempo posible, el error que contiene el resultado (Chuvienco, 2016; Congalton, 1988, Olofsson *et al.*, 2014).

En este punto se debe seguir las sugerencias de los científicos quienes recomiendan utilizar expertos externos, para seleccionar aleatoriamente los puntos de auditoría en cada clase y con base a las mismas imágenes que fueron utilizadas para la elaboración de los mapas (Congalton y Green, 2009). Para este caso el experto externo seleccionó 50 puntos muestras para cada clase de cada mapa (Congalton, 1988).

Este análisis se realiza mediante el cálculo de la matriz de confusión, a partir de la cual se obtuvo los errores de omisión, comisión y de precisión global (Congalton y Green, 2009; Olofsson *et al.*, 2020). Asimismo, se obtuvo el estadístico K (Cohen, 1960) para medir la precisión o acuerdo basado en la diferencia entre el error de la matriz y acuerdo en los cambios (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986), mediante la aplicación de la ecuación 3:

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i,j} X_{ij}^2}{\sum_{i,j} X_{i+} X_{+j}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: n es el número total de casos,  $X_{ij}$  se refiere al acuerdo observado y el producto de los marginales ( $X_{i+}$ ,  $X_{+j}$ ) el acuerdo esperado en cada clase.

### 5.3. Incertidumbres en las estimaciones del cambio en las reservas de carbono

La evaluación de las incertidumbres en las estimaciones de las reservas de C y, por consiguiente, de los cambios en las reservas de C (los FE), puede ser más compleja que la

estimación de las incertidumbres del área y los cambios en el área (los DA). A menudo es subjetiva y está vinculada a los juicios de los expertos. Esto se aplica especialmente a los bosques tropicales, que a menudo se caracterizan por un alto grado de variabilidad espacial.

De acuerdo con la bibliografía, la incertidumbre total de los FE es generalmente mayor que la incertidumbre total de los DA. Tenga en cuenta que en la bibliografía a veces se informan valores de incertidumbre muy bajos para las reservas de C. Esto se debe a que, por lo general, estos valores presumiblemente hacen referencia solo a los errores aleatorios en grandes áreas (que disminuyen con el aumento del tamaño de la muestra), pero no tienen en cuenta plenamente la probabilidad de sesgos.

La incertidumbre de las reservas de C puede ser causada tanto por errores aleatorios como por errores sistemáticos, pero a veces puede ser difícil hacer una distinción entre los dos. Los errores aleatorios son, como su nombre lo indica, impredecibles y, por lo tanto, casi inevitables. Los errores sistemáticos son generalmente predecibles, y si se conocen las causas del error, pueden eliminarse. Más allá de esta distinción general, las diversas fuentes de incertidumbre pueden estar relacionadas, al protocolo del inventario (errores de muestreo (tamaño y cantidad de la parcela) y representatividad), los métodos para convertir la medición del árbol en biomasa (ecuaciones alométricas o sobre los factores de expansión de la biomasa (FEB) y la integridad.

Las incertidumbres debidas a errores aleatorios pueden surgir de todo tipo de errores instrumentales como el ruido o la manipulación incorrecta, pero también pueden ser causadas por la variación natural de la biomasa en los bosques tropicales, que a menudo son de gran extensión, con poco o ningún acceso, que tienen una estructura compleja con varias capas, una alta biodiversidad y en general se estudian menos en comparación con otros tipos de bosques. Los valores de la biomasa en los bosques tropicales dependen de varios factores, tales como la temperatura, la altitud, la precipitación, el tipo de bosque, la composición de las especies de árboles, la estratificación, la escala espacial, las perturbaciones naturales y humanas, el tipo de suelo y los nutrientes del suelo (Clark y Clark, 2000; Pelletier *et al.*, 2012).

Para esta guía, la incertidumbre de la AGB se considera de dos fuentes, la primera, reportada por el producto global de densidad de carbono de Baccini *et al.*, (2012) para América Tropical, que fue 83% de precisión; y la segunda, mediante el cálculo de la matriz de confusión y la exactitud global del estimador, comentado en el ítem 4.2 sobre el script desarrollado para la estimación de la AGB, en este se comenta que la validación del modelo se realizó mediante 500 muestras aleatorias del mapa de densidad de carbono y del mapa de densidad de Landsat creado.

Con respecto a la incertidumbre de biomasa subterránea, la madera muerta y el detritus (hojarasca), el IPCC señala que sus valores oscilan entre 25% y 30% para cada depósito y los estudios científicos de igual manera reportan incertidumbres.

Mientras que la incertidumbre del carbono orgánico en el suelo, será empleando el producto de carbono orgánico en el suelo de 30 cm de profundidad que ofrece el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), este fue descargado a través del GEE. La metodología para determinar esta incertidumbre constará de tomar 50 puntos aleatorios del producto global de COS y del mapa COS generado con esto se determinó el error medio cuadrático (REMC) a través de la ecuación 4 (Congalton & Green, 2009).

$$\sqrt{\frac{\sum}{n}} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde: Zi, es el valor de producto global del COS y Zj el valor del valor del COS estimado de la RFI.

#### 5.4. Combinación de incertidumbres

El método empleado para combinar los parámetros individuales de las incertidumbres, fue el de propagación de error, recomendado para el Nivel 1 del IPCC, es fácil de implementar con una herramienta de hoja de cálculo (IPCC, 2006), pero para ello debe cumplirse determinadas condiciones para su utilización.

- Preferentemente solo cuando la estimación de emisiones y absorciones se basa en la suma, resta y multiplicación.
- No hay correlación entre las categorías, o las categorías se agrupan de manera que las correlaciones no son importantes.
- Los rangos relativos de incertidumbre en los factores de emisión y las estimaciones de área son los mismos en los años 1 y 2.
- Ningún parámetro tiene una incertidumbre > que aproximadamente  $\pm 60\%$ .
- Las incertidumbres son simétricas y siguen una distribución normal.
- Incluso en el caso de que no se cumplan todas las condiciones, el método de Nivel 1 se puede utilizar para obtener resultados aproximados.

Incluso en el caso de que no se cumplan todas las condiciones, el método de Nivel 1 se puede utilizar para obtener resultados aproximados.

La propagación de error para esta consultoría utilizó el método de multiplicación mediante la ecuación 5.

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:  $U_i$  = porcentaje de incertidumbre asociado con cada parámetro;  $U_{total}$  = porcentaje de incertidumbre en producto de cada parámetro.

## **5.5. Estimación de reservas de carbono almacenado**

Luego de determinar los DA y los FE con sus respectivos cálculos de incertidumbre, se debe estimar las reservas de carbono almacenado en la RFI para cada depósito, clase y subclase de uso de la tierra y año de evaluación. Este proceso se consta, por un lado, en determinar los valores promedios de carbono, y, por otro lado, en estimar la reserva de carbono almacenado propiamente dicha.

### **Determinación de los valores promedios de carbono**

Los valores promedios de carbono se determinarán para los depósitos de AGB, la biomasa subterránea y el COS, en los distintos años de evaluación de la RFI, los mismos se realizaron mediante un análisis zonal con los polígonos de las subclases de cada mapa de cobertura y uso de la tierra, y los mapas de AGB, biomasa subterránea y COS respetivamente, esto permitió generar las medias y las desviaciones estándar del contenido de carbono por hectáreas ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ).

En relación a los depósitos de biomasa madera muerta y detritus, los valores se obtuvieron directamente de reportes de estudios científicos tal y como se comentó en el ítem 4.4. de los factores de emisión.

### **Estimación de reserva de carbono**

Una vez obtenidos los valores promedios de carbono ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ), se procederá a estimar las reservas de carbono almacenado, las mismas se obtuvieron de la multiplicación de cada uno de estos valores por la superficie de cada una de las subclases de los mapas de cobertura y uso de la tierra (ha). El resultado de esta multiplicación se obtuvo en  $Mg\ C$ , el cual se dividió entre 1000 para obtenerlo en  $Tg\ C$ , este resultado se debe generar en la RFI para cada año de análisis, cada depósito de carbono y cada subclase de cobertura y uso de la tierra, esta última se agrupo en las clases del IPCC para sus respectivos análisis.

## **5.6. Estimación de emisiones y absorciones de $CO_2$**

Para estimar las transferencias de  $CO_2$ , de los depósitos a la atmosfera (emisiones) y de la atmosfera a los depósitos (absorciones), dentro de esta guía se debe asumir algunos criterios que permitirán definir las estimaciones en el marco de las directrices del IPCC (IPCC, 2006, 2019).

Estos criterios se basan, en asumir supuestos simplificadores que permitieron establecer en función de los datos y de los Niveles del IPCC los métodos para las estimaciones; en realizar las estimaciones de emisiones/absorciones para los cinco depósitos de las tierras convertidas en otros usos de tierra; en estimar las emisiones de la AGB para las tierras forestales que permanecen como tales; y, en estimar las emisiones producto de la madera recolectada.

### Supuestos simplificadores

- Para simplificar el proceso de contabilidad de carbono, se debe utilizar el enfoque de emisiones comprometidas, es decir, las emisiones que ocurren en su totalidad en el momento del cambio de uso de la tierra, la gestión de tierras forestales y la extracción de madera. De igual manera se debe utilizar la suposición simplificadora del Nivel 1 del IPCC, que todo el carbono eliminado es emitido en el momento de su eliminación (IPCC, 2019; Pearson *et al.*, 2014).
- Las emisiones y absorciones de los cinco depósitos se estimaran por clases, por un lado, diferenciando las tierras convertidas a otros usos de la tierra, mediante la combinación de los DA que aportó el alcance espacial de la transición de la cubierta terrestre (ha), obtenidas de la técnica de detección de cambios de los mapas de cobertura y uso, y, los FE por unidad de actividad ( $\text{CO}_2$  e  $\text{ha}^{-1}$ ), obtenidos mediante la aplicación el método de diferencia de existencia (IPCC, 2019); y, por otro lado, diferenciando la clase tierras forestales que permanecieron como tal, las cuales se diversificaron en bosque maduro con una tasa media anua de acumulación de AGB de  $0,57 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Vilanova *et al.*, 2018), y bosque secundario más jóvenes ( $\leq$  a 20 años) y más antiguos ( $>$  a 20 años) con una tasa media de  $2,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $5,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  respectivamente (Requena Suarez *et al.*, 2019).
- Se debe asumir como clase principal las tierras forestales, porque ser la de mayor porcentaje espacial dentro de la RFI y poseer un historial importante de gestión de cuatro décadas, lo cual influye significativamente sobre el inventario de los GEI.
- Para las tierras forestales gestionadas por el manejo forestal las emisiones de AGB se estimarán en cada compartimento, multiplicando las áreas de degradación forestal obtenidas de manera indirecta del mapa de aprovechamiento forestal selectivo (DA) por el valor promedio de emisiones de carbono de cada área (FE) planteado por Pacheco-Angulo *et al.*, (2021) para el área de estudio.
- Para obtener las emisiones por actividades de aprovechamiento forestal selectivo y conocer su influencia, se debe clasificar el mapa de aprovechamiento en patios de acopio, vías de aprovechamiento y áreas de arrastres, estas clases se asociaron a las emisiones totales de cada compartimento.
- Se de incluir como depósito adicional los productos de madera recolectada (IPCC, 2019), en el mismo se determinó las emisiones, considerando como DA el volumen



de madera recolectada ( $m^3$ ), y como FE la transformación de dicho volumen de madera en carbono emitido.

- Finalmente, los valores del cambio neto de C, se deben transformar en valores de emisiones y absorciones equivalentes de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), multiplicando la cantidad estimada de carbono (expresada en  $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) por 44/12, que es la relación del peso molecular del carbono ( $Mg\ CO_2\ e/ha$ ) (WRI, 2005).

### Estimación de emisiones/absorciones de tierra convertida en otro uso de tierra

Para estimar las emisiones y absorciones de  $CO_2$ , producto de la tierra convertida a otro uso de la tierra y tierra que permanecieron en el mismo uso, se debe utilizar, en primer lugar, la técnica de detección de cambios para obtener los DA, en segundo lugar, el método de diferencia de existencia para obtener los FE, y, en tercer lugar, aplicar las ecuaciones generales del IPCC para las estimaciones y absorciones de  $CO_2$ .

Técnica de detención de cambio para la determinación de los DA: la detección de la conversión del uso de la tierra, se debe realizar mediante un matriz de tabulación cruzada o matriz de cambios (Pontius *et al.*, 2004), la cual permitirá obtener para cada cobertura y uso de la tierra las ganancias, las pérdidas y las persistencias. En particular, mediante este proceso se determinará los DA producto de las tierras convertidas en otros usos de tierra y las tierras que permanecieron en el mismo uso, las cuales se analizarán para determinar las emisiones y absorciones de los cinco depósitos.

En este sentido, se puede comentar que la matriz de tabulación se generará del cruce de los mapas de cobertura y uso de la tierra del tiempo 1 (Tiem 1) y tiempo 2 (Tiem 2). En la tabla 3 se visualiza la matriz de cambios, en las filas las categorías del mapa en el Tiem 1 y en las columnas las categorías del mapa en el Tiem 2. La diagonal principal indica las persistencias entre el tiempo 1 y el tiempo 2, y los elementos fuera de la diagonal principal determinan las transiciones ocurridas entre los dos tiempos para cada categoría. Asimismo, la fila 6 muestra el total ocupado por cada categoría en el Tiem2 ( $P_{+j}$ ), y la columna 6 indica el total de cada categoría en el tiempo Tiem1 ( $P_{i+}$ ). La fila 7 muestra la ganancia que tuvo cada categoría entre el Tiem1 y Tiem2 y la columna 7 la pérdida que tuvo cada categoría entre el Tiem1 y Tiem2.

**Tabla 3.** Matriz de tabulación cruzada.

		Tiem <sub>2</sub>						
		1	2	3	n	5	6	7
Tiem <sub>1</sub>	1		Clase 1	Clase 2	.....	Clase n	Suma Tiem <sub>1</sub>	Perdidas
	2	Clase 1	$P_{11}$	$P_{12}$	.....	$P_{1n}$	$P_{1+}$	$P_{1+} - P_{ij}$
	3	Clase 2	$P_{21}$	$P_{22}$	.....	$P_{2n}$	$P_{2+}$	$P_{2+} - P_{ij}$
	n	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	6	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

4							
5	Clase n	$P_{n1}$	$P_{n2}$	.....	$P_{nn}$	$P_{n+}$	$P_{n+} - P_{jj}$
6	Suma Tiem <sub>2</sub>	$P_{+1}$	$P_{+2}$	.....	$P_{+n}$	$P$	
7	Ganancias	$P_{+1} - P_{jj}$	$P_{+2} - P_{jj}$	.....	$P_{+n} - P_{jj}$		

Fuente: Adaptación de Pontius *et al.*, (2004).

Cálculo de las ganancias (G<sub>ij</sub>) y pérdidas (L<sub>ij</sub>): de la matriz de tabulación cruzada se determinaron los parámetros de ganancias (Ecuación 6) y pérdidas (Ecuación 7).

$$G_{ij} = P_{+(j)} - P_{-jj} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$L_{ij} = P_{-(j+)} - P_{-jj} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde: G<sub>ij</sub> es la ganancia, P<sub>+j</sub> es la sumatoria de la columna en cuestión, P<sub>jj</sub> es el valor de la diagonal principal de la columna en cuestión, y, L<sub>ij</sub> son las pérdidas, P<sub>(j+)</sub> es la sumatoria de la fila en cuestión.

Adicionalmente se es importante realizar un análisis de la deforestación y sus elementos impulsores, para ello se calculó de la tasa media anual de deforestación, mediante la ecuación planteada por Sader and Joyce (1988) (Ecuación 8):

$$TMAD = \left( \frac{Bosque1 - Bosque2}{Bosque1 * N} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde: TMAD es la tasa media anual de deforestación, Bosque1 es la superficie del bosque del año 1 y Bosque2 del año 2, ambas involucran la suma de todas las categorías de bosques en sus respectivos años, y N el número de años considerados.

En relación a los elementos impulsores, es interesante considerar los criterios establecidos por Geist y Lambin (2001) para los países del cinturón tropical, por Pacheco *et al.*, (2011) para Venezuela, y recientemente por WWF International para determinar los frentes de deforestación a nivel mundial (Pacheco *et al.*, 2021). Los mismo tomaron en cuenta como elementos impulsores directo de la deforestación la expansión agrícola, la extensión de infraestructuras, la explotación maderera, la explotación minera y la presencia de conflictos sociales.

Para este guía se debe relacionar estos elementos impulsores directo con las clases de cobertura y uso de la tierra que reemplazaron a las tierras forestales: la expansión agropecuaria se asociarla con las clases cultivos, herbazales y pecuario; la explotación minera con la clase minería propiamente dicha; la extensión de infraestructura con las clases vialidad y cortafuegos; y, la expansión urbana con la clase de asentamientos humanos. A cada una de estas clases se les determinará la superficie porcentualmente para conocer la influencia de las mismas en el proceso de deforestación.

Método de diferencia de existencias para la determinación de los FE: el método de diferencia de existencias, permitió medir en dos momentos los cambios de reserva de C, mediante la diferencia promedio anual entre estimaciones en dos puntos de tiempo (IPCC, 2019). Este método se utilizó para los diferentes depósitos considerados en la RFI y la Unidad N-5, mediante la siguiente ecuación 9.

$$\Delta C = \frac{C_{t2} - C_{t1}}{t2 - t1} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:  $\Delta C$  = variación anual de las existencias de carbono en el depósito (t C / año);  $C_{t1}$  = existencia de C en el tiempo  $t1$  (t C);  $C_{t2}$  = existencia de C en el tiempo  $t2$  (t C).

Determinación del cambio de las reservas del COS: se consideraran los procedimientos y postulados del IPCC (2006) para la estimación de los cambios en las existencias de COS, que toman en cuenta que los cambios en las existencias de carbono del suelo se pueden desagregar en cambios de existencias de C en suelos minerales y emisiones de suelos orgánicos (Tabla 4), además se podrán considerar los cambios de existencias de carbono de los depósitos de C inorgánico en el suelo (Ecuación 10), debido a la limitada información científica de que se dispone para derivar factores de cambio de inventario, se supondrá para el Nivel seleccionado (en este caso Nivel 1) que el flujo neto de existencias de C inorgánico equivale a cero.

$$\Delta C_{\text{Suelos}} = \Delta C_{\text{Minerales}} - L_{\text{Orgánicos}} + \Delta C_{\text{Inorgánicos}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:  $\Delta C_{\text{Suelos}}$ : cambio anual en las existencias de carbono de los suelos, expresado en ton C\*año<sup>-1</sup>;  $\Delta C_{\text{Minerales}}$ : cambio anual en las existencias de carbono orgánico de los suelos minerales, expresado en ton C\*año<sup>-1</sup>;  $L_{\text{Orgánicos}}$ : pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados, expresada en ton C\*año<sup>-1</sup>;  $\Delta C_{\text{Inorgánicos}}$ : cambio anual en las existencias de carbono inorgánico de los suelos, expresado en ton C\*año<sup>-1</sup> (se supone como 0 a menos que se emplee un método de Nivel 3).

**Tabla 4.** Pasos de cálculo de COS para el Nivel 1.

Suelos	Pasos
Suelos minerales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para suelos minerales, el método por defecto se basa en los cambios de las existencias de C en el suelo durante un período finito. El cambio se calcula sobre la base de las existencias de C después del cambio de gestión con respecto a las existencias de carbono en una condición de referencia.</li> <li>- Se consideran las siguientes hipótesis:               <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Con el transcurso del tiempo, el C orgánico del suelo alcanza un valor estable que se promedia en el espacio y que es específico para el suelo, el clima, el uso de la tierra y las prácticas de gestión; y</li> <li>ii. Los cambios en las existencias de C orgánico del suelo durante la transición a un nuevo COS en equilibrio se producen de manera lineal.</li> </ol> </li> </ul>

- 
- Los cambios en el COS en suelos minerales se computan empleando la ecuación de cambio anual en las existencias de carbono orgánico en suelos minerales la (Ecuación 11).

$$rate = \frac{(\Delta C)}{D} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:  $\Delta C_{\text{Minerales}}$ : cambio anual en las existencias de carbono orgánico de los suelos minerales, expresado en  $\text{ton C} \cdot \text{año}^{-1}$ ;  $\text{COS}_0$ : existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, expresadas en  $\text{ton C}$ ;  $\text{COS}_{(0-T)}$ : existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, expresadas en  $\text{ton C}$ .  $\text{COS}_0$  y  $\text{COS}_{(0-T)}$  se calculan en función de la ecuación de las existencias de carbono orgánico en suelos minerales para un período de inventario (Ecuación 12).

$$\sum (C_{REF} * LU * F_{MG} * F_i * A_{c,s,i}) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:  $\text{COS}_{REF}$ : existencias de carbono de referencia, expresadas en  $\text{ton C ha}^{-1}$ ;  $F_{LU}$ : factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra o subsistemas de un uso de la tierra en particular, sin dimensión;  $F_{MG}$ : factor de cambio de existencias para el régimen de gestión, sin dimensión;  $F_i$ : factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica, sin dimensión;  $A$ : superficie de tierra del estrato que se estima, expresada en ha.

$T$ : cantidad de años de un período de inventario dado, expresada año

$D$ : dependencia temporal de los factores de cambio de existencias, que es el lapso por defecto para la transición entre los valores de equilibrio del COS, expresada en año. Si  $T$  es mayor que  $D$ , se considera el valor de  $T$  para obtener la tasa anual de cambio durante el tiempo de inventario ( $0 - T$  años)

- Las tasas anuales de cambio en las existencias de carbono se calculan como la diferencia en las existencias (a través del tiempo) dividida por la dependencia temporal ( $D$ ) de los factores de cambio de existencias (el valor por defecto es de 20 años).
- Se supone que las existencias de C de los suelos forestales no cambian con la gestión.
- En cuanto a tierras nativas no gestionadas, así como a tierras forestales, asentamientos y pastizales nominalmente gestionados bajo regímenes de poca perturbación, se supone que las existencias de C en el suelo son equivalentes a las de los valores de referencia (es decir, los factores de uso de la tierra, perturbación -sólo para bosques-, gestión e ingreso equivalen a 1).

---

Suelos orgánicos

- Estimar la superficie de suelos orgánicos drenados bajo bosques gestionados de cada región climática para cada año.
-

---

Seleccionar el factor de emisión apropiado (FE) para las pérdidas anuales de CO<sub>2</sub>.

- Estimar las emisiones totales acumulando el producto de la zona (A) multiplicado por el factor de emisión (FE) para todas las zonas climáticas mediante la ecuación de pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados (CO<sub>2</sub>) (Ecuación 13).

$$L_{\text{Orgánicos}} = \sum (A * FE) \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde: L<sub>Orgánicos</sub>: pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados, expresada en ton C\*año<sup>-1</sup>; A: superficie de los suelos orgánicos drenados en el tipo de clima (c), expresada en ha

FE: factor de emisión (Tabla 5) para el tipo de clima (c), expresado en ton C\*ha<sup>-1</sup>\* año<sup>-1</sup>

- Las tierras convertidas en tierras forestales en suelos orgánicos dentro del período del inventario se tratan de la misma manera que las tierras forestales que permanecen como tales en suelos orgánicos.

---

Fuente: Adaptación del IPCC (2006).

**Tabla 5.** Factores de emisión para suelos orgánicos drenados en bosques gestionados.

Clima	Factores de emisión (ton C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	
	Valores	Rangos
Tropical	1,36	0,82 – 3,82
Templado	0,68	0,41 – 1,91
Boreal	0,16	0,08 – 1,09

Fuente: Adaptación del IPCC (2006).

La determinación del cambio de las reservas del COS y pérdidas de CO<sub>2</sub>, fue realizada para los cambios de uso y cobertura de la tierra ocurridos en la RFI en el intervalo 2000 – 2020.

Ecuaciones generales para la estimación de las emisiones y absorciones CO<sub>2</sub>: para estimar las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> del cambio en las existencias de C en los distintos usos de la tierra, se utilizó la ecuación general del IPCC 14.

$$Emisión/Absorción = DA * FE \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde: Emisión/Absorción = es la cantidad de emisiones y/o absorciones de CO<sub>2</sub> para cada una de las clases y depósitos analizados; DA = datos de actividad; y FE = factor de emisión.

Posteriormente, se utilizó la ecuación general planteada por el IPCC para Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT) (IPCC, 2019), con esta se estimó el cambio de C para cada clase que fue convertida a otro uso mediante la ecuación 15.

$$\Delta C_{ASOUT} = \Delta C_{TF} + \Delta C_{TA} + \Delta C_P + \Delta C_H + \Delta C_A + \Delta C_{OT} \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:  $\Delta C_{ASOUT}$  = Variación total anual de las existencias de carbono en el sector ASOUT ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ );  $\Delta C_{TF}$  = tierras forestales;  $\Delta C_{TA}$  = tierras agrícolas;  $\Delta C_P$  = pastizales;  $\Delta C_H$  = humedales;  $\Delta C_A$  = asentamientos;  $\Delta C_{OT}$  = otras tierras.

Para cada clase de uso de la tierra los cambios de existencias de C de cada estrato se estimaron para los cinco depósitos, mediante la suma de los cambios en todos los depósitos como en se observa en la ecuación 16.

$$\Delta C_{UT1} = \Delta C_{AGB} + \Delta C_{BS} + \Delta C_{MM} + \Delta C_D + \Delta C_S \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:  $\Delta C_{UT1}$  = cambios en las existencias de carbono para un estrato de una categoría de uso de la tierra ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ );  $\Delta C_{AGB}$  = biomasa aérea;  $\Delta C_{BS}$  = biomasa subterránea;  $\Delta C_{MM}$  = madera muerta;  $\Delta C_D$  = detritus;  $\Delta C_S$  = suelo.

Además, los cambios en las existencias de carbono en el suelo se determinaron según los cambios en las existencias de C en los suelos minerales y las emisiones de los suelos orgánicos (Ecuación 17).

$$\Delta C_S = \Delta C_{Minerales} + \Delta C_{Inorgánicos} - L_{Orgánicos} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:  $\Delta C_S$  = cambios anuales en la existencia de C de los suelos ( $\text{t C / ha}$ );  $\Delta C_{Minerales}$  = cambios anuales en la existencia de C orgánicos de los suelos minerales;  $L_{Orgánicos}$  = pérdida anual de carbono de suelos drenados;  $\Delta C_{Inorgánicos}$  = cambios anuales en la existencia de C inorgánicos de los suelos.

### Estimación de emisiones de tierras forestales que permanecen como tales

Con la finalidad de conocer las emisiones producto de las tierras forestales gestionadas por el aprovechamiento forestal selectivo, se estimará en primer lugar, las emisiones de la AGB para cada compartimiento aprovechado, y, en segundo lugar, las emisiones por cada actividad de aprovechamiento.

Estimación de las emisiones de AGB: se obtendrán multiplicando las áreas degradadas de cada compartimiento aprovechado (ha) (DA), por el valor promedio de emisiones de carbono ( $61,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) (FE) planteado por Pacheco-Angulo *et al.*, (2021), este resultado se expresó para toda la RFI anualmente y se transformó en valores de emisiones equivalentes de  $\text{CO}_2$ , para ser incorporado al inventario global de GEI de la RFI.

Estimación de emisiones de AGB por actividades de aprovechamiento: para determinar las emisiones por actividades de aprovechamiento, estas se deben clasificar en el mapa de aprovechamiento forestal selectivo en: patios de acopio, que se produjeron cuando el bosque se aprovechó con el propósito de almacenar temporalmente troncos antes del transporte final; vías forestales, fueron construidas para transportar madera desde los patios hasta los aserraderos; y áreas de arrastres, creadas por la tala de árboles y pistas de arrastre, las cuales provocaron daños o la muerte a otros árboles en pie (Souza, 2013; Pacheco-Angulo *et al.*, 2017). Estas categorías se asociarán con las emisiones en cada compartimento para determinar la contribución global a las emisiones de cada actividad en las tierras gestionadas.

### **Estimación de emisiones producto de la madera recolectada**

Debido a que en la RFI se han realizado actividades de manejo forestal desde inicio de la década de los ochenta hasta nuestros días, en la cual se han extraído legalmente del bosque volúmenes de madera considerables, se incluyó como un depósito adicional los productos de madera recolectada (IPCC, 2019).

Para estimar las emisiones de este depósito, se consideró como DA el volumen de madera en rola recolectada ( $m^3$ ), y como FE obtenido de la transformación de dicho volumen de madera en carbono emitido, considerando la densidad promedio de la madera y el factor de 0,5 (Feldpausch *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2005). Al igual que en el caso anterior, este resultado se expresó anualmente y se transformó  $CO_2$  e para ser incorporado al inventario global de GEI de la RFI.

## Referencias

- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B. M., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Asner, G. P., . . . Willcock, S. (2016). An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406-1420. doi: 10.1111/gcb.13139.
- Azuaje, F. (2018). Segundo Informe de Avance de la consultoría en Restauración, conservación y manejo forestal sustentable (MFS) manejo sustentable de tierras (MST) de bosques en zonas afectadas por procesos de degradación, "Ecología Forestal": Producto 5: "Criterios e Indicadores para priorizar áreas destinadas a la restauración de bosques". Proyecto: Ordenación forestal sustentable y conservación de bosques en la perspectiva ecosocial (GCP/VEN/011/GFF). Venezuela.
- Baccini, A., Goetz, S.J., Walker, W.S., Laporte, N.T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S.A., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta, S., & Houghton, R.A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Clim. Change*, 2, 182-185.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21 (1-2): 136-147.
- Benavides, H., y León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernaderos y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá, Colombia.
- Berroterán. (2003). Reserva Forestal Imataca, ecología y bases técnicas para el ordenamiento territorial (pp. 208). Caracas Venezuela: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.
- BID. (2019). Plugin de QGIS para la simulación de escenarios de recursos hídricos. Banco Interamericano de Desarrollo. (Disponible en: <https://code.iadb.org/es/repositorio/12/hydrobid>). Acceso: 14 de agosto de 2019.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Brown, S., Pearson, T., Moore, N., Parveen, A., Ambagis, S., & Shoch, D. (2005). Impact of selective logging on the carbon stocks of tropical forests: Republic of Congo as a case study. (pp. 21). USAID: Winrock International Report.
- Camilloni, I. y Vera, C. (2007). Ciencias naturales: la atmósfera. Programa de capacitación multimedial. Explora las ciencias en el mundo contemporáneo. Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. Buenos Aires, Argentina.
- Chuvieco, E. (2016). Fundamentals of satellite remote sensing an environmental. An Environmental Approach. Boca Ratón, Florida: Taylor & Francis Group.



- CIERFI-MARN. (2001). Recopilación y Análisis de Información Básica existente acerca de la Reserva Forestal Imataca (RFI). [CD-ROM]. Documento Compilatorio, Sistema de Información Geográfica, y documentos anexos. Caracas. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.
- Clark, D. B. y D. A. Clark. (2000). "Landscape-scale Variation in Forest Structure and Biomass in a Tropical Rain Forest." *Forest Ecology Management* 137: 185-198.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46.
- Congalton, R. (1988). comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(3), 593-600.
- Congalton, R., & Green, K. (2009). *Assesing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices*. London, New York, CRC Press: Taylor and Francis Group.
- Cuevas, E., & Medina, E. (1986). Nutrient dynamics within amazonian forest ecosystems. *Oecologia*, 68, 466-472.
- CVG-TECMIN.1987. Proyecto Inventario de los Recursos Naturales de la Región Guayana. Ciudad Bolívar. Venezuela.
- Delaney, M., Brown, S., Lugo, A., Torres-Lezama, A., & Bello-Quintero, N. (1997). The distribution of organic carbon in major components of forests located in five life zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 13, 697-708.
- Eva, H., & Huber, O. (2005). A Proposal for Defining the Geographical Boundaries of Amazonia. In JRC (Ed.), (pp. 38). Ispra, Italy: Joint Research Center.
- FAO (2002). *Proceedings: second expert meeting on harmonising forest-related definitions for use by various stakeholders*. Rome.
- FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia.
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings* (Publication no. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>).
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45.
- Feldpausch, T.R., Jirka, S., Passos, C.A.M., Jasper, F., & Riha, S.J. (2005). When big trees fall: Damage and carbon export by reduced impact logging in southern Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 219, 199-215.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. [<https://doi.org/10.1002/joc.5086>]. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Foga, S.; Scaramuzza, P.L.; Guo, S.; Zhu, Z.; Dilley, R.D.; Beckmann, T.; Schmidt, G.L.; Dwyer, J.L.; Joseph Hughes, M.; Laue, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sens. Environ.* 194, 379–390, doi:10.1016/j.rse.2017.03.026.

- Galicia, L., Saynes, V., Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences* 93 (3): 473-484
- GEE developers. (2020a). Compositing and Mosaicking in Google Earth Engine cloud platform. Google Developers. Available online: [https://developers.google.com/earth-engine/ic\\_composite\\_mosaic](https://developers.google.com/earth-engine/ic_composite_mosaic) (accessed on 16 November 2020).
- GEE developers. (2020b). Exporting Data in Google Earth Engine cloud platform. Google Developers. Available online: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/exporting> (accessed on 16 November 2020).
- Geist, H., & Lambin, E. (2001). What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence (pp. 116). Louvain-la-Neuve, Belgium: LUC International Project Office.
- GFOI. (2020). Integration of remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests. Methods and Guidance from the Global Forest Observations Initiative: Global Forest Observations Initiative. Group on Earth Observations. Edition 3.0, Food and Agriculture Organization. Rome.
- GOFC-GOLD. (2016). A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOFC-GOLD Report version COP22-1. The Netherlands: GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University.
- Goodwin, J., Gillenwater, M., Romano, D., Radunsky, K. (2019). Volume 1: General Guidance and Reporting. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D. (2017). Moore, R. Google Earth Engine: Planetaryscale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ*, 202, 18–27, doi:10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Grupo Consultivo de Expertos sobre las Comunicaciones Nacionales de las Partes No Incluidas en el anexo I de la Convención (GCE). (2013). Manual para el sector del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS). Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., . . . Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. doi: 10.1126/science.1244693.
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., de Bruin, S., Farina, M., . . . Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/s41558-020-00976-6
- Honorio, E. y Baker, C. (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Universidad de Leeds. Lima, Perú.

- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R., Brockhaus, M., Verchot, L., . . . Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 04400.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2014). Cambio climático. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>.
- INPE-FUNCATE. (2013). TerraAmazon 4.4 User's Guide Administrator; INPE-FUNCATE: São José dos Campos, Brazil.
- IOM (Environmental migration portal). En línea. El Quinto Informe de Evaluación del IPCC: Qué implica para Latinoamérica?. Disponible en: <https://environmentalmigration.iom.int/el-quinto-informe-de-evaluaci%C3%B3n-del-ipcc-qu%C3%A9-implica-para-latinoam%C3%A9rica>
- IPCC. (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 632). Publisher: Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> (Often referred to as IPCC AFOLU GL).
- IPCC. (2014). Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.
- IPCC. (2015). Cambio climático 2014 Mitigación del cambio climático: Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Contribución del grupo de trabajo III al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2015<sup>a</sup>). Ficha informativa del IPCC: Fechas y momentos destacados de la historia del IPCC. Secretaría del IPCC. Ginebra, Suiza.
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. ed.). Published: IPCC, Switzerland.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*: 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Kirkby M. y Morgan R. (1980). *Soil erosion*. New York. USA. John Wiley and Sons.
- Lopez-Gonzalez, G., Lewis, S. L., Burkitt, M., & Phillips, O. L. (2011). ForestPlots.net: a web application and research tool to manage and analyse tropical forest plot data. *Journal of Vegetation Science*, 22, 610–613. doi: 10.1111/j.1654-1103.2011.01312.x

- MARNOT. (2007). Propuesta para la implantación del sistema de información geográfica proyecto manejo de recursos naturales y ordenamiento de tierras. Estándares para la presentación de la data digital de la base cartográfica. Versión 2.0, Caracas, Venezuela.
- Masek, J.G.; Vermote, E.F.; Saleous, N.; Wolfe, R.; Hall, F.G.; Huemmrich, K.F.; Gao, F.; Kutler, J.; Lim, T.K. (2013). LEDAPS Calibration, Reflectance, Atmospheric Correction Preprocessing Code, Version 2; ORNL Distributed Active Archive Center: Oak Ridge, Tennessee, TN, USA.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Fundación Biodiversidad, Oficina Española de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología, Centro Nacional de Educación Ambiental) (MAAMA). (2015). Cambio climático: mitigación. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC, grupo de trabajo III. España.
- Naciones Unidas (NU). (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.
- Naciones Unidas (NU). (1998). Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Ogle, S., Sanz, M., Rocha, M., MacDonald, J., Dong, H. (2019). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Olivo, M., y Soto, A. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. Universidad, Ciencia y Tecnología 14 (57).
- Olofsson, P., Arévalo, P., Espejo, A. B., Green, C., Lindquist, E., McRoberts, R. E., & Sanz, M. J. (2020). Mitigating the effects of omission errors on area and area change estimates. Remote Sensing of Environment, 236, 111492. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111492>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment, 148, 42-57. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Orbisat da Amazônia SA. (2004). Successful completion of phase II of the InSAR cartography project in Venezuela (CartoSUR II) Recuperado de: [http://swrh.codexscribo.com/docs/cartosur\\_ii/cartosur\\_ii-orbisat.html](http://swrh.codexscribo.com/docs/cartosur_ii/cartosur_ii-orbisat.html)
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2019). La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanza un nuevo récord. En: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-en-la-atm%C3%B3sfera-alcanza>
- Ortiz, A., y Riascos, L. (2006). Almacenamiento y fijación de carbono del sistema agroforestal cacao Theobroma cacao L. y laurel Cordia alliodora (Ruiz & Pavón) Oken en la Reserva Indígena de Talamanca, Costa Rica. Tesis de grado. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto, Costa Rica.
- Pacheco, C., Aguado, I. y Mollicone, D. (2011). Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo, Biollania 10: 281-292.

- Pacheco, C., Aguado, I., & Mollicone, D. (2014). Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images. *Acta Amazonica*, 44(2), 185-196.
- Pacheco, P., Mo, K., Dudley, N., Shapiro, A., Aguilar-Amuchastegui, N., Ling, P.Y., Anderson, C. and Marx, A. (2021). *Deforestation fronts: Drivers and responses in a changing world*. WWF, Gland, Switzerland.
- Pacheco-Angulo, C. (2018). Tercer Informe de Avance de la Consultoría en Cartografía, Geomática y Sensores Remotos. In: Componente 1: Sistema Nacional Integrado de Información Forestal (SINIFF). Proyecto: Ordenación Forestal Sustentable y Conservación de Bosques en la Perspectiva Ecosocial (GCP/VEN/011/GFF). Venezuela.
- Pacheco-Angulo, C., Plata-Rocha, W., Serrano, J., Vilanova, E., Monjardin-Armenta, S., González, A., & Camargo, C. (2021). A Low-Cost and Robust Landsat-Based Approach to Study Forest Degradation and Carbon Emissions from Selective Logging in the Venezuelan Amazon. *Remote Sensing*, 13.
- Pacheco-Angulo, C., Vilanova, E., Aguado, I., Monjardin, S., & Martinez, S. (2017). Carbon Emissions from Deforestation and Degradation in a Forest Reserve in Venezuela between 1990 and 2015. *Forests*, 8(8), 291.
- Patiño, S., Suárez, L., Andrade, H., Segura, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 9 (2): 121-133
- Pearson, T.R.H., Brown, S., & Casarim, F. (2014). Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environmental Research Letters*, 9, 1-11.
- Pelletier, J., K. R. Kirby y C. Potvin. (2012). "Significance of Carbon Stock Uncertainties on Emission Reductions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries." *Forest Policy and Economics* 24: 3-11.
- Peréz, R. (2019). Protocolo para la Valoración Ambiental y Económica de la Reserva Forestal Imataca. Venezuela: Componente 1: Sistema Nacional Integrado de Información Forestal (SINIFF). Proyecto: Ordenación Forestal Sustentable y Conservación de Bosques en la Perspectiva Ecosocial (GCP/VEN/011/GFF).
- Pontius, R., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistenc. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 251–226.
- Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., . . . Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>
- RAISG. (2009). *Amazonía 2009. Áreas Protegidas y Territorios Indígenas*. AIDSESP-DIREN-EcoCiencia-ecoSIG-FAN-FGA-Instituto del Bien Común-ICV-Imazon-ISA-SINCHI.
- RAISG. (2015). *Deforestación en la Amazonía (1970-2013)* (pp. 48). [www.raisg.socioambiental.org](http://www.raisg.socioambiental.org).
- República Bolivariana de Venezuela. (06 de Agosto de 2013). Ley de Bosques. Gaceta Oficial N° 40.222. Ley de Bosques. Caracas, Distrito Capital, Venezuela.

- República Bolivariana de Venezuela. (22 de Septiembre de 2004). Decreto N° 3.110. Gaceta Oficial N° 38.028. Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso de la Reserva Forestal Imataca. Caracas - Venezuela.
- Requena Suarez, D., Rozendaal, D. M. A., De Sy, V., Phillips, O. L., Alvarez-Dávila, E., Anderson-Teixeira, K., . . . Herold, M. (2019). Estimating aboveground net biomass change for tropical and subtropical forests: Refinement of IPCC default rates using forest plot data. *Global Change Biology*, 25(11), 3609-3624. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.14767>.
- Rosenfield, G. H., & Fitzpatrick-Lins, A. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 223-227.
- Ruiz, M., Fernández, C., y Sayer, J. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas* 16 (3): 81-90.
- Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, 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.
- Sader, S. A., & Joyce, A. T. (1988). Deforestation Rates and Trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica*, 20(1), 11-19. doi: 10.2307/2388421.
- Serrano. (2020). Segundo Informe de Avance de la consultoría en Plan Piloto de Comanejo Sustentable del Bosque Protocolo de Monitoreo Unidades de Muestreo Multifuncionales. Producto 8: "Planes forestales operativos basados en la información generada por el SINIIF para la planificación y manejo forestal con enfoque de medios de vida desarrollados con gobiernos locales y organizaciones comunitarias.". Proyecto: Ordenación forestal sustentable y conservación de bosques en la perspectiva ecosocial (GCP/VEN/011/GFF). Venezuela.
- Shimabukuro, Y.E.; Arai, E.; Duarte, V.; Jorge, A.; dos Santos, E.G.; Gasparini, K.A.C.; Dutra, A.C. (2019). Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 40: 5475–5496.
- Shimabukuro, Y.E. y Smith, J.A. (1991). The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 29, 16-20.
- SIGOT. 2006. Sistema de Información para la Gestión y Ordenación del Territorio. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela.
- Souza, C. (2013). Monitoring of Forest Degradation: A Review of Methods in the Amazon Basin. In F.a.H. Archard, M. (Ed.), *Global Forest Monitoring from Earth Observation* (pp. 171-194). EEUU: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Souza, J.R.; Barreto, P. (2000). An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. *Int. J. Remote Sens.* 21: 173–179.
- Torres, A. (2008). La cuidada movilización de los recursos forestales. La industria forestal. Medio humano, establecimientos y actividades Geo Venezuela (pp. 382-438). Publisher: Fundación Polar. Caracas, Venezuela: Tomo 3.

- UNFCCC. (2011). Decisions adopted by COP16 ("The Cancun Agreements") on Policy approaches and positive incentives on issues relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries; and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries. UN-FCCC/CP/2010/7/Add.1 Decision 16/CMP.1., 231.
- Vermote, E.; Justice, C.; Claverie, M.; Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sens. Environ.* 185, 46–56, doi:10.1016/j.rse.2016.04.008.
- Vidal, D.; Corrêa, M.; Gama, A.; Guerreiro, C.; De Almeida, A.; Corrêa, M.; Cavalcante, N.; Sant'Ana, J. (2015). Testes para definição dos parâmetros de detecção de nuvens e sombras em imagens do sensor AWIFS no plugin Cloud Detection, do aplicativo TerraAmazon. In Proceedings of the An. XVII Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto—SBSR, João Pessoa, Brazil, 25–29 April 2015.
- Vilanova, E. (2020). *Silvicultural Practices in Venezuelan Natural Forests: An Historical Perspective and Prospects of Sustainable Forest Management* [Online First], IntechOpen. doi: DOI: 10.5772/intechopen.93279.
- Vilanova, E., Ramírez-Angulo, H., & Torres-Lezama, A. (2010). El almacenamiento de carbono en la biomasa aérea como un indicador del impacto de la extracción selectiva de maderas en la Reserva Forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*, 35(9), 659-665.
- Vilanova, E., Ramírez-Angulo, H., Ramírez, G., & Torres-Lezama, A. (2012). Compliance with sustainable forest management guidelines in three timber concessions in the Venezuelan Guayana: Analysis and implications. *Forest Policy and Economics*, 17, 3-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.11.001>.
- Vilanova, E., Ramírez-Angulo, H., Torres-Lezama, A., Aymard, G., Gámez, L., Durán, C., . . . Ettl, G. J. (2018). Environmental drivers of forest structure and stem turnover across Venezuelan tropical forests. *PLOS ONE*, 13(6), e0198489. doi: 10.1371/journal.pone.0198489.
- Wischmeir W. et al. (1971). A soil credibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26:189-193 pp.
- WRI. (2005). *The greenhouse gas protocol: The Land Use, Land-Use Change, and Forestry Guidance for GHG Project Accounting* (pp. 100). Washington D.C World Resources Institute
- Zhu, Z.; Woodcock, C.E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 118, 83–94, doi:10.1016/j.rse.2011.10.028.

