

SISTEMA DE MONITOREO DE BOSQUES Y CARBONO (SMBByC)

*Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque
y la deforestación - Año 2022*

RESUMEN EJECUTIVO

Versión 1.0



Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Bogotá, julio de 2023

Cítese como: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Ideam - MADS]. (2023). *Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque - Año 2022*. Ideam - MADS.

2023. Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)

Susana Muhamad González - Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Sandra Vildary Quiroga - Viceministra de Políticas y Normalización Ambiental

Francisco Canal Albán - Viceministro de Ordenamiento Ambiental del Territorio

Adriana Rivera Brusatin - Directora de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos

Sebastián Carranza Tovar - Director de Cambio Climático y Gestión del Riesgo

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Ghisliane Echeverry Prieto - Directora General

María Yuli González González - Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

Edersson Cabrera Montenegro - Coordinador Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono

Equipo Técnico SMByC

Edersson Cabrera Montenegro

Componente Procesamiento Digital de Imágenes

Gustavo Galindo García

Juan Carlos Rubiano Rubiano

Cristhian Forero Castro

Carol Franco Aguilera

Andrés Zuluaga Morales

Xavier Corredor Llano

Mónica Rivera

Ricardo Mancera Quiñones

Omar Sotelo Roncancio

Leonardo Hurtado Abril

Fabián Hernández Ramos

Anny Giraldo Solano

Jhonatan Arias Zapata

Luis Manuel Guerrero Buelvas

Ferney Gutiérrez Cardozo

Johan Ramírez Contreras

Carlos Ramos García

Santiago Palacios Noguera

Componente Causas y Agentes de Transformación del Bosque

José Julián González Arenas

Edilneyi Zúñiga Avirama

Alexánder Cubillos González

Claudia Duque Quevedo

Amalia Garavito Guerrero

Nidia Vanegas Pérez

BOSQUE NATURAL 2022 EN CIFRAS

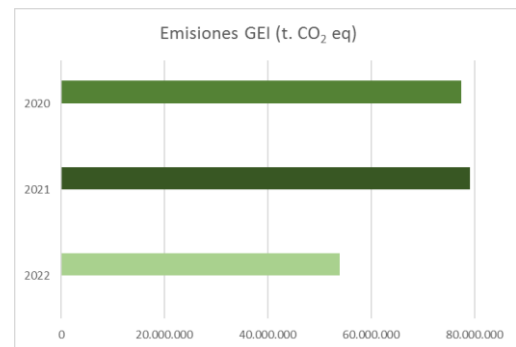
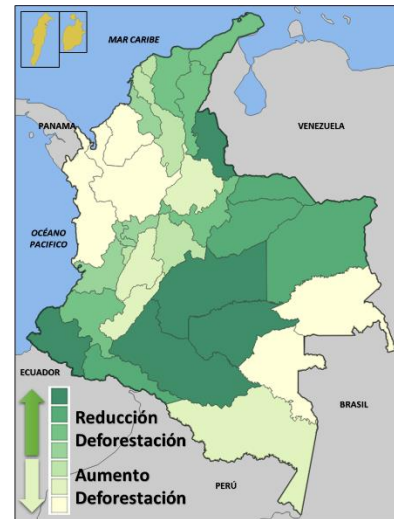
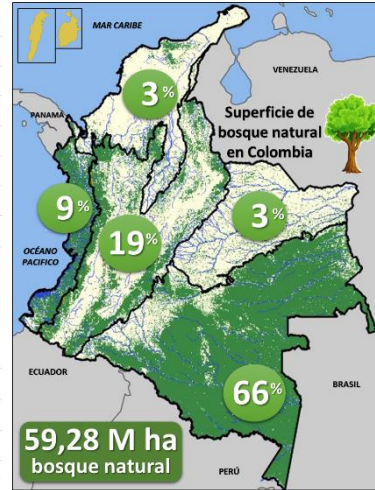
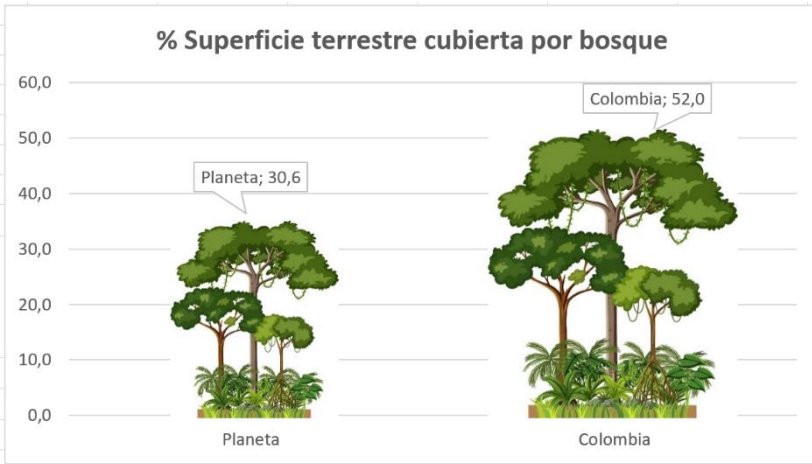


TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
PRESENTACIÓN	7
1. METODOLOGÍA.....	9
1.1 Monitoreo de la superficie de bosque natural y la deforestación en Colombia	10
1.1.1 Fase 1. Preprocesamiento digital de imágenes de satélite	10
1.1.2 Fase 2. Procesamiento digital de imágenes	17
1.1.3 Fase 3. Evaluación de la exactitud temática.....	18
1.2 Caracterización de causas y agentes de la transformación del bosque	21
2. ACTUALIZACIÓN DE CIFRAS de MONITOREO - Año 2022	23
2.1 Monitoreo de la superficie de bosque en Colombia	23
2.2 Monitoreo de la superficie deforestada	25
2.2.1 Dinámica regional de la deforestación 2022	26
2.2.2 Dinámica municipal de la deforestación 2022	28
2.2.3 Dinámica de la deforestación en 2022 en las figuras de manejo.....	30
2.2.1 Análisis complementarios de la dinámica de deforestación 2022.....	33
2.3 Principales causas y agentes de la deforestación en Colombia durante 2022.....	40
2.3.1 Identificación de principales núcleos activos de deforestación.....	40
2.3.2 Análisis de la aceleración/desaceleración de la deforestación en Colombia 2022	51
2.3.3 Monitoreo comunitario participativo de los bosques en Colombia	54
3. ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN BOSQUES NATURALES	57
3.1 Factores de emisión	57
3.2 Estimación de contenidos de carbono.....	61
3.3 Estimación de emisiones.....	61
REFERENCIAS	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Cadena de procesamiento digital de imágenes implementada para la actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque y la deforestación en Colombia.</i>	9
<i>Figura 2. Plugin Cloud Masking, enmascaramiento de nubes y sombras de nubes (Imagen del 08-01-2022).</i>	12
<i>Figura 3. Mosaico de mínimo estadístico de 2022.</i>	13
<i>Figura 4. Mosaico de máximo estadístico de 2022.</i>	14
<i>Figura 5. Mosaico de jday-last-pixel de 2022. Imágenes Landsat.</i>	15
<i>Figura 6. Mosaico de mediana de superficie de reflectancia 2022. Imágenes Landsat 8 y 9.</i>	16
<i>Figura 7. Evaluación de puntos aleatorios para la zona de Guaviare periodo 2021-2022.</i>	20
<i>Figura 8. Figuras de manejo de los bosques naturales en Colombia para 2022.</i>	23
<i>Figura 9. Distribución de la superficie de bosque natural en Colombia 2022.</i>	24
<i>Figura 10. Dinámica de la deforestación a escala nacional y el bioma de la Amazonia. Periodo 2013-2022.</i>	25
<i>Figura 11. Distribución de la superficie deforestada en Colombia 2022.</i>	26
<i>Figura 12. Superficie deforestada a escala departamental en Colombia 2022.</i>	28
<i>Figura 13. Dinámica de la deforestación a escala departamental en Colombia. Periodo 2013-2022.</i>	28
<i>Figura 14. Superficie deforestada a escala municipal - Año 2022.</i>	29
<i>Figura 15. Análisis # polígonos deforestados. Periodo 2021-2022.</i>	34
<i>Figura 16. Tamaño máximo del parche deforestado. Periodo 2021-2022.</i>	35
<i>Figura 17. Dinámica de los tamaños de parches deforestados 2022.</i>	36
<i>Figura 18. Dinámica de la superficie deforestada. Parches > 50 ha.</i>	37
<i>Figura 19. Pérdidas de bosque natural asociadas a fenómenos naturales 2022.</i>	38
<i>Figura 20. Alertas tempranas de deforestación y puntos de calor semanales por departamentos 2022.</i>	39
<i>Figura 21. Incidencia de puntos de calor asociados a quemas e incendios 2022 vs. 2023.</i>	40
<i>Figura 22. Principales causas directas de deforestación en Colombia 2022.</i>	41
<i>Figura 23. Núcleos de alta deforestación (NAD) 2022.</i>	42
<i>Figura 24. Núcleo de alta deforestación Guaviare (Marginal de la Selva) 2022.</i>	43
<i>Figura 25. Núcleo de alta deforestación Sabanas del Yarí-Caguán 2022.</i>	44
<i>Figura 26. Núcleo de alta deforestación Sur del Meta 2022.</i>	45
<i>Figura 27. Núcleo de alta deforestación Putumayo 2022.</i>	46
<i>Figura 28. Núcleo de alta deforestación Andina Norte - Catatumbo.</i>	47
<i>Figura 29. Núcleo de alta deforestación Mapiripán (Meta) 2022.</i>	48
<i>Figura 30. Núcleo de alta deforestación Andina Centro Norte - Nororiente de Antioquia/Sur de Bolívar 2022.</i>	49
<i>Figura 31. Núcleo de alta deforestación Pacífico Norte 2022.</i>	50
<i>Figura 32. Núcleo de alta deforestación Paramillo 2022.</i>	51
<i>Figura 33. Análisis de aceleración de la deforestación 2022.</i>	52
<i>Figura 34. Zonas de aceleración y desaceleración de la deforestación 2022.</i>	53

Figura 35. Diagnóstico de iniciativas comunitarias que desarrollan procesos de monitoreo local y su localización con respecto a los núcleos de alta deforestación de 2022 (Ideam, 2023). _____ 55

Figura 36. Distribución de conglomerados del IFN en Colombia (MADS e Ideam, 2020). ____ 58

LISTA DE TABLAS

Pág.

<i>Tabla 1. Superficie deforestada en Colombia. Reporte por regiones naturales 2021-2022</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2. Superficie deforestada en Colombia. Reporte por municipios 2021-2022</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3. Superficie deforestada en Colombia. Reporte por áreas del Sinap 2019-2022</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Superficie deforestada en Colombia. Reporte zonas de reserva forestal L.2/59. 2022</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 5. Análisis geoestadístico de la deforestación. Periodo 2014-2022</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 6. Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa aérea para árboles, palmas y helechos</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 7. Estimación de contenidos de carbono en la biomasa aérea (BA), biomasa subterránea (BS), carbono orgánico en suelos (COS), biomasa total (BT) y carbono en biomasa forestal (CBF) por bioma</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 8. Almacenamiento de carbono en bosques naturales de Colombia y a nivel de bioma</i>	<i>61</i>

PRESENTACIÓN

Dando cumplimiento a sus actividades misionales y compromisos internacionales, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), en articulación con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), continúa con la operación del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBByC). Su principal propósito es informar al país cuánto bosque hay y cuánto bosque se perdió por deforestación, lo cual está formalizado en el Decreto 1655 de 2017, que lo define como el conjunto de procesos, metodologías, protocolos y herramientas para la generación periódica de información sobre: (i) la superficie de bosques de Colombia y sus cambios en el tiempo, (ii) las reservas de carbono almacenadas en los bosques naturales, (iii) las causas y agentes de la deforestación y la degradación de los bosques, y (iv) las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la deforestación y la degradación forestal. La operación del SMBByC se lleva a cabo gracias al apoyo financiero del programa REM Visión Amazonia, la iniciativa GEF “Corazón de la Amazonia” y el proyecto del Fondo BioCarbono del Banco Mundial en la Orinoquia.

Para la generación de esta amplia información de monitoreo, el SMBByC ha consolidado diferentes tipos de reportes que permiten hacer seguimiento a la dinámica del bosque en un año calendario, a saber: (i) informe de actualización de cifras anuales de monitoreo de bosque y deforestación, (ii) boletines trimestrales de detecciones tempranas de deforestación, (iii) reportes semanales de alerta temprana de deforestación, (iv) reportes mensuales de seguimiento a acuerdos de conservación de bosques, y (v) reporte diario de puntos de calor.

En este contexto, es importante considerar que estos reportes generan información complementaria y no deben ser comparados directamente. Para la actualización de las cifras anuales, desde enero 1 hasta diciembre 31 de cada año, se recopila y procesa toda la información satelital (cerca de 2.900 imágenes), resultados que se publican oficialmente entre junio y julio del año siguiente. Los boletines trimestrales reportan cada tres meses los núcleos de alerta temprana de pérdida de bosque, los cuales son útiles para identificar la dinámica de la deforestación mientras se publican las cifras oficiales anuales, ya que incluyen estimados mensuales de deforestación para los departamentos con mayor deforestación histórica (p. ej.: Amazonia); asimismo, permiten marcar las tendencias del fenómeno.

Tanto los datos de cifras anuales como los boletines trimestrales utilizan el procesamiento digital de imágenes de satélite e incorporan un análisis de causas y agentes de deforestación. Las cifras oficiales incluyen todo el catálogo de imágenes de satélite disponible, un riguroso proceso de control de calidad y verificación, con datos de alta confiabilidad. Por su parte, los boletines trimestrales solo utilizan tres meses del catálogo de imágenes de satélite disponible y un proceso de control de calidad menos intensivo, lo que genera datos indicativos de la tendencia de deforestación, con una mayor incertidumbre, pero que permiten tomar acciones tempranas en territorio.

1. METODOLOGÍA

El SMByC se concibe como el conjunto de procesos, metodologías, protocolos y herramientas establecidos por el Ideam, para generar periódicamente información sobre la superficie de bosque natural en Colombia, identificar sus cambios en el tiempo, estimar las reservas de carbono almacenadas en los bosques naturales, identificar las causas y agentes de la transformación del bosque (p. ej.: deforestación y degradación de los bosques), así como estimar las emisiones y absorciones de GEI asociadas a la deforestación y la degradación forestal (Figura 1).

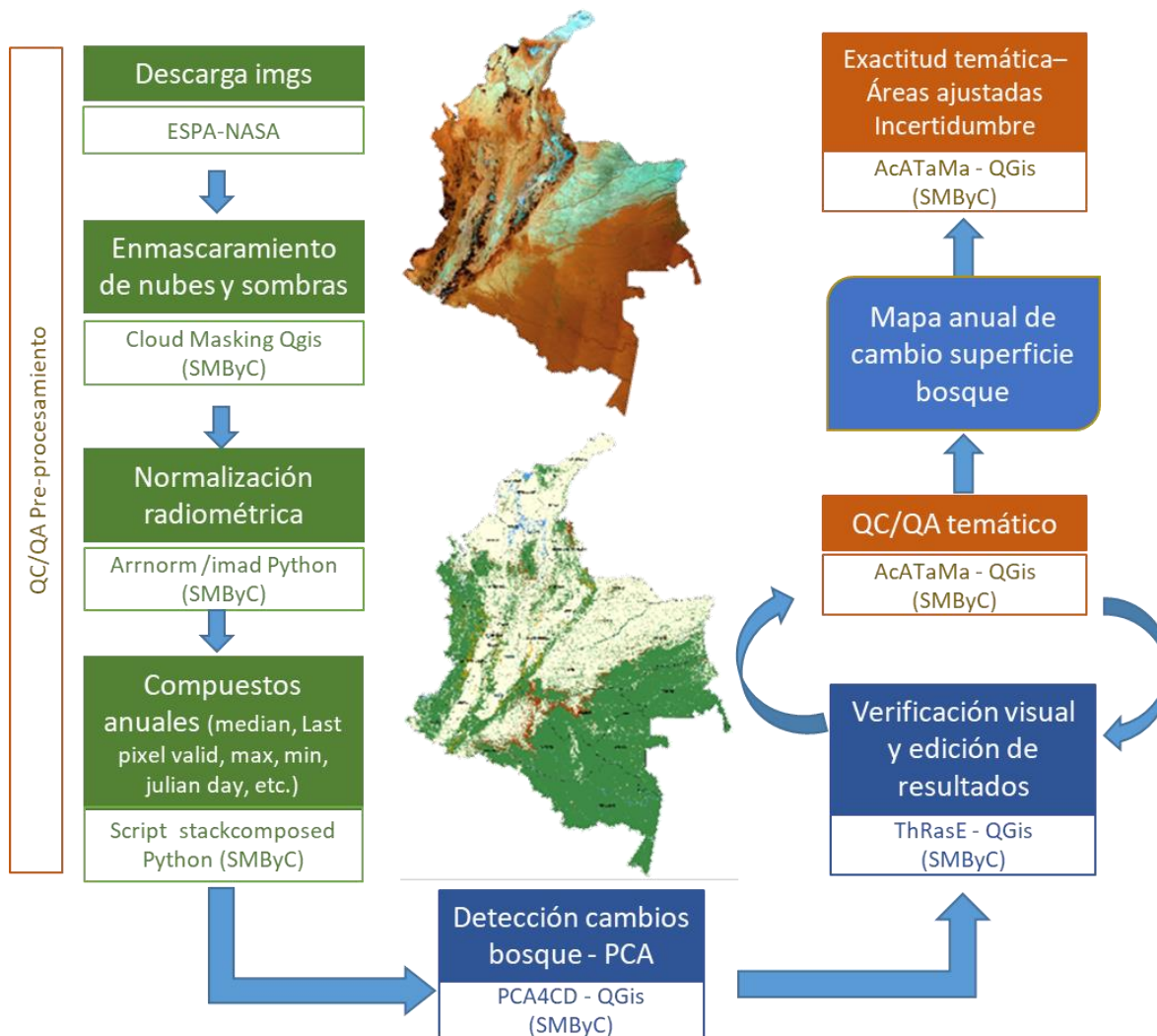


Figura 1. Cadena de procesamiento digital de imágenes implementada para la actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque y la deforestación en Colombia.

La metodología empleada para la generación de cifras oficiales de monitoreo de bosque es consistente con las directrices establecidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y las orientaciones de buenas prácticas para la estimación de los “cambios en los contenidos de carbono de las tierras forestales convertidos a otras categorías de uso de las

tierras”, descritas en su *Guía de buenas prácticas para el sector de cambio de uso del suelo* (IPCC, 2006). En este sentido, de acuerdo con lo dispuesto en las decisiones relevantes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) en su *Guía de las buenas prácticas*, el SMByC opera bajo los principios de transparencia, completitud, comparabilidad, consistencia y precisión. Este sistema fue adoptado oficialmente por Colombia mediante el Decreto 1655 de 2017, donde se establece que sus principales componentes son: (i) monitoreo de la superficie de bosque natural y la deforestación en Colombia, (ii) caracterización de causas y agentes de la transformación del bosque, y (iii) monitoreo del Carbono en bosques naturales.

Toda la información generada por el SMByC se encuentra disponible en la página web del sistema, a excepción de aquella que tiene restricciones de uso (<http://smbyc.ideam.gov.co/>)¹.

1.1 Monitoreo de la superficie de bosque natural y la deforestación en Colombia

El SMByC ha desarrollado un protocolo para el procesamiento digital de imágenes, con el objetivo de generar información sobre distribución, extensión y cambios en la cobertura boscosa en Colombia (Galindo *et al.*, 2014). Este protocolo se implementa a través de la utilización de imágenes de satélite e incluye cuatro fases: (i) preprocesamiento digital de imágenes de satélite, (ii) procesamiento digital de imágenes, (iii) evaluación de la exactitud temática, y (iv) reporte de los datos de monitoreo. Este proceso se resume en 13 pasos metodológicos, que se describen a continuación.

1.1.1 Fase 1. Preprocesamiento digital de imágenes de satélite

Paso 1. Selección y descarga de imágenes

Para cada año de referencia, el SMByC descarga todo el catálogo de imágenes de los programas satelitales Landsat (7 ETM+, OLI 8 y OLI 9) del nivel L1T (superficie de reflectancia), y Copernicus (Sentinel 2A y Sentinel 2B), y selecciona todas aquellas imágenes con menos del 90 % de cobertura de nubes y con una ventana temporal entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del año de referencia, asegurándose de que todas las imágenes del último trimestre del año sean descargadas y procesadas. A través de la generación de compuestos temporales anuales de imágenes, se excluyen de cada imagen todos los píxeles de “nubes” y “sombras de nubes”. Estos compuestos permiten identificar la superficie de bosque y sus cambios en el año de referencia. Así, para el año de referencia 2022, para Colombia se descargaron 2.192 imágenes Landsat 8 y Landsat 9, de las 2.747 imágenes disponibles en el portal para descarga (EROS Clearinghouse) del USGS (United States Geological Survey o Servicio Geológico de

¹ Dadas algunas restricciones en las plataformas de publicación de información del SMByC en el IDEAM, los usuarios interesados pueden también solicitar toda la información al e-mail: smbyc@ideam.gov.co.

Estados Unidos), las otras 555 fueron descartadas por tener 100 % áreas de nubosidad o sombras.

Cuando los datos Landsat y Sentinel no proveen una cobertura libre de nubes suficiente, se aplica un procedimiento para complementar el análisis con otras plataformas satelitales, incluidas las provenientes de CBERS, RapidEye, Aster y Planet Labs. La cobertura completa anual del territorio continental de Colombia es proporcionada por 63 trayectorias de imágenes. Adicionalmente, se establece un protocolo para la proyección geográfica (UTM 18N) y nivel de procesamiento de las imágenes descargadas y, de encontrarse disponible, se obtiene la reflectancia superficial de los datos Landsat de alto nivel, a través del Sistema de Observación y Ciencias de Recursos Terrestres del USGS.

Paso 2. Apilamiento de bandas

Una vez seleccionadas y descargadas las imágenes, con el fin de archivarlas completas, se reconstruyen mediante la unión de todas las bandas, descartando las que corresponden a la longitud de onda del infrarrojo térmico. En el caso de Landsat 8 y 9 OLI, las capas de aerosoles y cirrus son también excluidas. Para el procesamiento y análisis de la detección de cambio, las bandas seleccionadas de las imágenes son extraídas y apiladas para cada una de las imágenes. Tanto para Landsat-7 ETM+ como para Landsat-8 y 9 OLI, estas bandas corresponden a rojo, infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) y dos infrarrojos de onda corta. No obstante, para cada misión, estas corresponden a bandas diferentes; así que para Landsat 4-5 TM y Landsat-7 ETM+, se selecciona la banda 3 (Rojo -0.631 - 0.692 nm), la banda 4 (infrarrojo cercano 0.772-0.898 nm), la banda 5 (SWIR-1 1.547-1.749 nm) y la banda 7 (SWIR-2 2.107 - 2.294 nm). Para Landsat-8 y 9 OLI, se selecciona la banda 4 (rojo 0.636-0.673 nm), la banda 5 (infrarrojo cercano 0.851 -0.879 nm), la banda 6 (SWIR-1 1.566 -1.651 nm) y la banda 7 (SWIR-2 2.107- 2.294 nm).

Debido a la gran cantidad de imágenes que se requieren para construir el compuesto, en este paso se aplica un mecanismo en el que se recodifican los nombres de las bandas (1, 2, 3 y 4), para facilitar su manipulación y procesamiento. Los procedimientos para la selección, apilamiento, recodificación y almacenamiento de las bandas apiladas en directorios internos del Ideam se desarrollan a través de los *scripts* de Python específicos para cada misión de Landsat / Sentinel, que se encuentran disponibles en la página de algoritmos del SMByC (<https://github.com/SMByC>). Los siguientes son los pasos que se deben llevar a cabo.

Paso 3. Corrección geométrica

Para la construcción de los compuestos anuales de imágenes, se requiere tener un corregistro exacto en píxeles entre todas las imágenes descargadas para cada escena. Los productos L1T suministrados por el Earth Resources Observation and Science Center (EROS) suelen tener una correspondencia exacta de los píxeles. Sin embargo, antes de la interpretación se revisa cada imagen y se realiza la corrección geométrica únicamente para las imágenes que se encuentren

con un desplazamiento sistemático, es decir, que estén desplazadas en alguno de los ejes o en ambos, pero de igual forma en toda la imagen se ajustan aquellas que no cumplan esta condición. Para facilitar este proceso, se ha desarrollado un algoritmo para QGIS, disponible en <https://github.com/SMBYC/Coregistration-Qgis-processing>.

Paso 4. Enmascaramiento de nubes y sombras

Una vez ajustados los desplazamientos, se procede a ejecutar un procedimiento que permite enmascarar y eliminar las áreas de nubes, sombras o bruma presentes en las imágenes de satélite, mediante la implementación de un procedimiento semiautomatizado diseñado por el SMBYC, el cual cuenta con herramientas para agrupar los valores digitales de las nubes y las sombras, y así formar una máscara. La figura 2 representa un ejemplo de una imagen enmascarada.

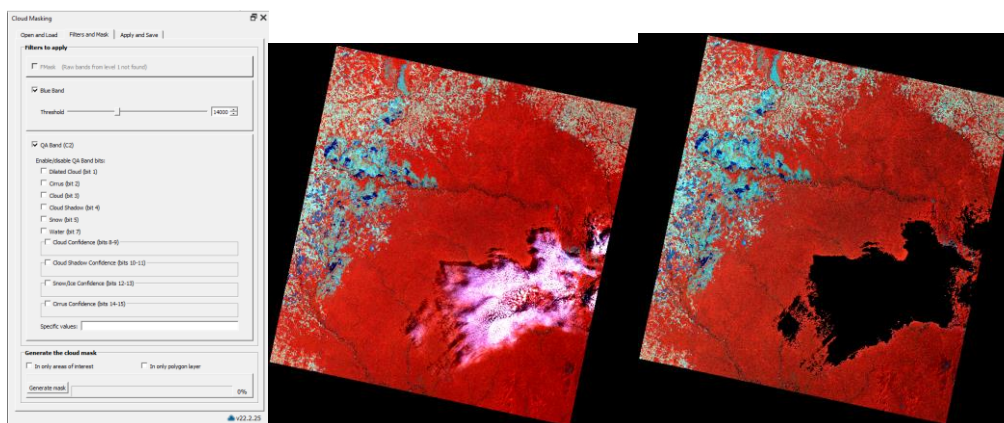


Figura 2. Plugin Cloud Masking, enmascaramiento de nubes y sombras de nubes (Imagen del 08-01-2022).

Para su implementación, se ha desarrollado un *plugin* denominado Cloud Masking, que funciona en el *software* QGIS e implementa una serie de filtros de enmascaramiento utilizados por el SMBYC del Ideam (<https://github.com/SMBYC/CloudMasking>).

Las imágenes enmascaradas se someten a un proceso de control de calidad aplicando diferentes métricas estadísticas, diseñadas para dar resultados de muy alta calidad. Para este proceso, se utilizan los mosaicos de mínimo valor, máximo valor, cantidad de fechas utilizadas y último píxel válido.

La figura 3 presenta la métrica (v1) del mínimo estadístico para cada píxel en 2022, que incluye todas las imágenes enmascaradas y revisadas por el proceso de control de calidad. Con esta métrica se identifican errores en el enmascaramiento de sombras que requieren de un mejor detalle en cada una de las escenas. El círculo rojo representa un ejemplo de una zona que requiere de ajustes, ya que aún tiene sombras que deben enmascararse. Los comentarios sobre los ajustes se envían a los intérpretes para ajuste y revisión.

Adicionalmente, el control de calidad también evalúa las imágenes enmascaradas con otra métrica denominada máximo estadístico. Con este se determina si hay errores en el enmascaramiento de las nubes. La Figura 4 muestra un mosaico de máximo para 2022 en su primera versión.

El óvalo rojo representa una zona que requiere de ajustes, ya que aún tiene nubes por enmascarar. Es prioritario realizar una revisión más detallada a las imágenes utilizadas en el último trimestre del año, y para ello, se utiliza la métrica del píxel válido de la última fecha registrada, la cual indica, según la escala de valores, a qué día del año corresponde un determinado píxel.

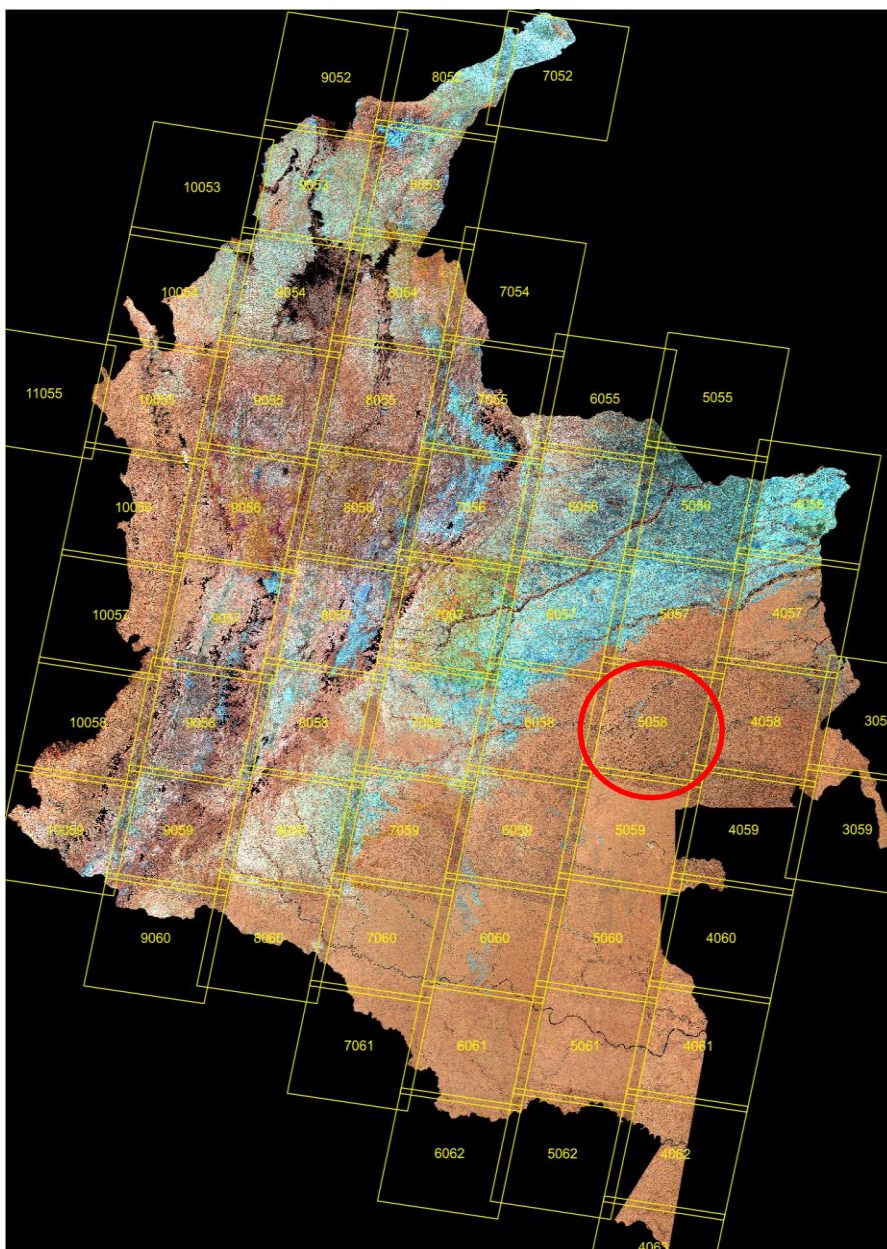


Figura 3. Mosaico de mínimo estadístico de 2022.

Esta métrica se denomina *jday-last-pixel*. Como resultado del uso de esta métrica, para aquellas áreas donde no se cuenta con datos de Landsat para el último mes o trimestre del año, se prioriza el uso de imágenes Sentinel 2 o de Planet Labs, como se observa en la figura 5.

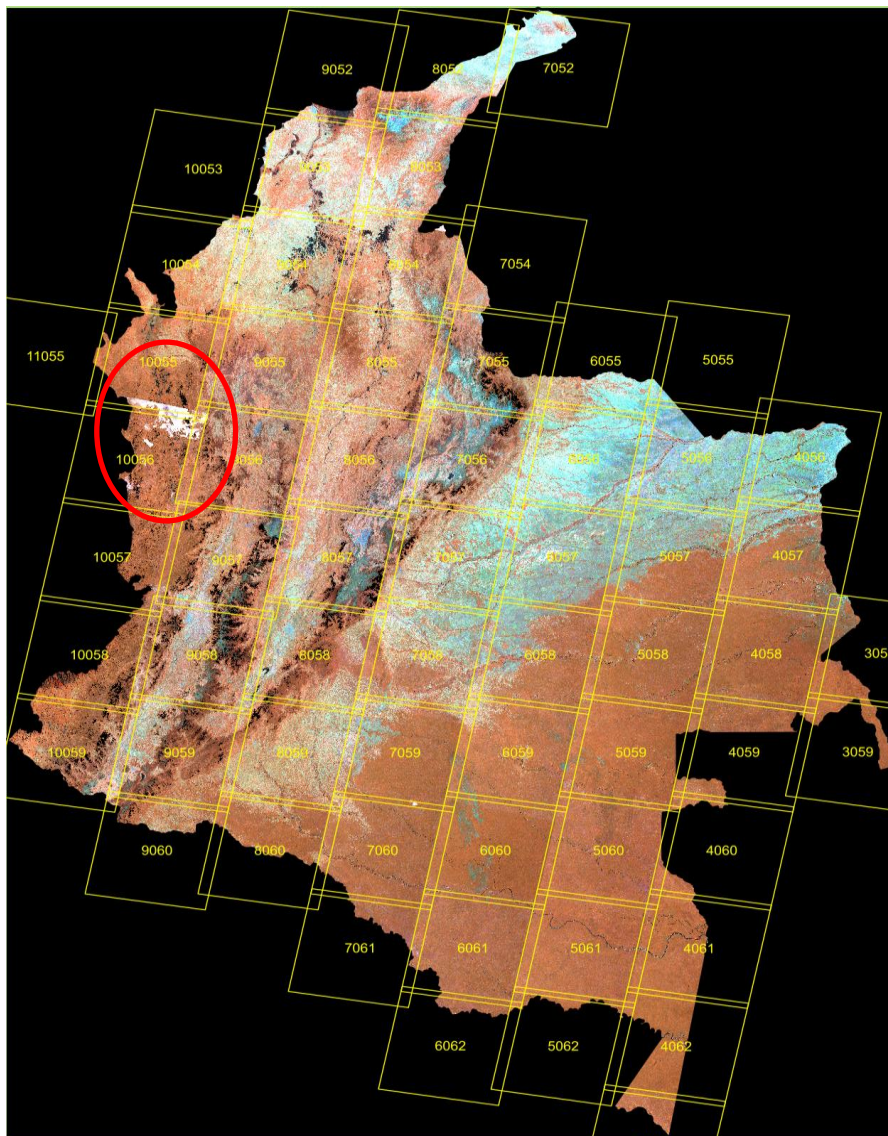


Figura 4. Mosaico de máximo estadístico de 2022.

Paso 5. Normalización radiométrica

Una vez enmascaradas las imágenes, se realiza un proceso de normalización radiométrica relativa, en el cual se ajustan los valores radiométricos de forma que se reduzca la variabilidad entre las imágenes, debida a diferencias atmosféricas, de iluminación, calibración del sensor,

distorsiones geométricas, entre otras, permitiendo así que las imágenes de los diferentes años sean comparables entre sí y los cambios detectados no se deban a este tipo de factores (Olthof *et al.*, 2005; Potapov *et al.*, 2012). La normalización radiométrica se hace para homogeneizar los valores de las imágenes de reflectancia en cada una de las cuatro bandas trabajadas.

Para ejecutar este procedimiento, se ha desarrollado un algoritmo en Python (ARRNorm - <https://github.com/SMBYC/ArrNorm-Qgis-processing>) que reduce las diferencias entre la base (promedio 2.575 de todas las imágenes Landsat 2012-2021) y cada una de las imágenes de 2022, con el objetivo de efectuar una normalización relativa y automática de todas las imágenes, apoyada en la propiedad de invariabilidad de la transformación de detección de alteración multivariante (MAD) y la regresión lineal ortogonal (Canty y Nielsen, 2007).

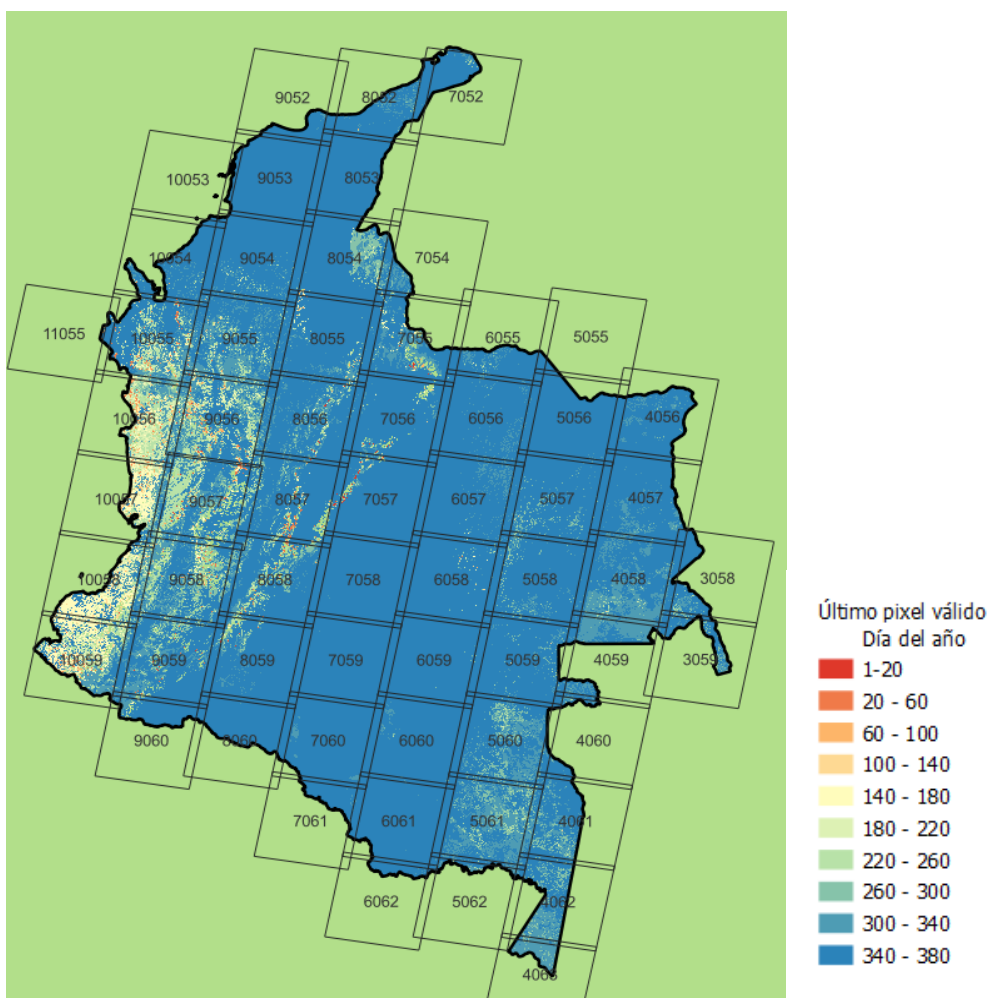


Figura 5. Mosaico de *jday-last-pixel* de 2022. Imágenes Landsat.

Paso 6. Generación del compuesto de imágenes

Empleando todas las imágenes disponibles para Colombia del año calendario correspondiente al año de reporte, se implementa un procedimiento en el cual, para cada unidad de observación (píxel) se tiene una serie de tiempo anual con todos los datos de superficie de reflectancia válidos para ese año. Se utilizan métricas estadísticas, cuya principal métrica generada es la mediana anual de cada banda espectral, estadístico que ha mostrado buenos resultados para la detección de cambios. De esta forma, para cada unidad de observación se obtiene un único valor radiométrico de superficie de reflectancia anual en cada una de las bandas radiométricas utilizadas (Rojo, NIR y SWIR-1 y SWIR-2), como se presenta en la figura 6.

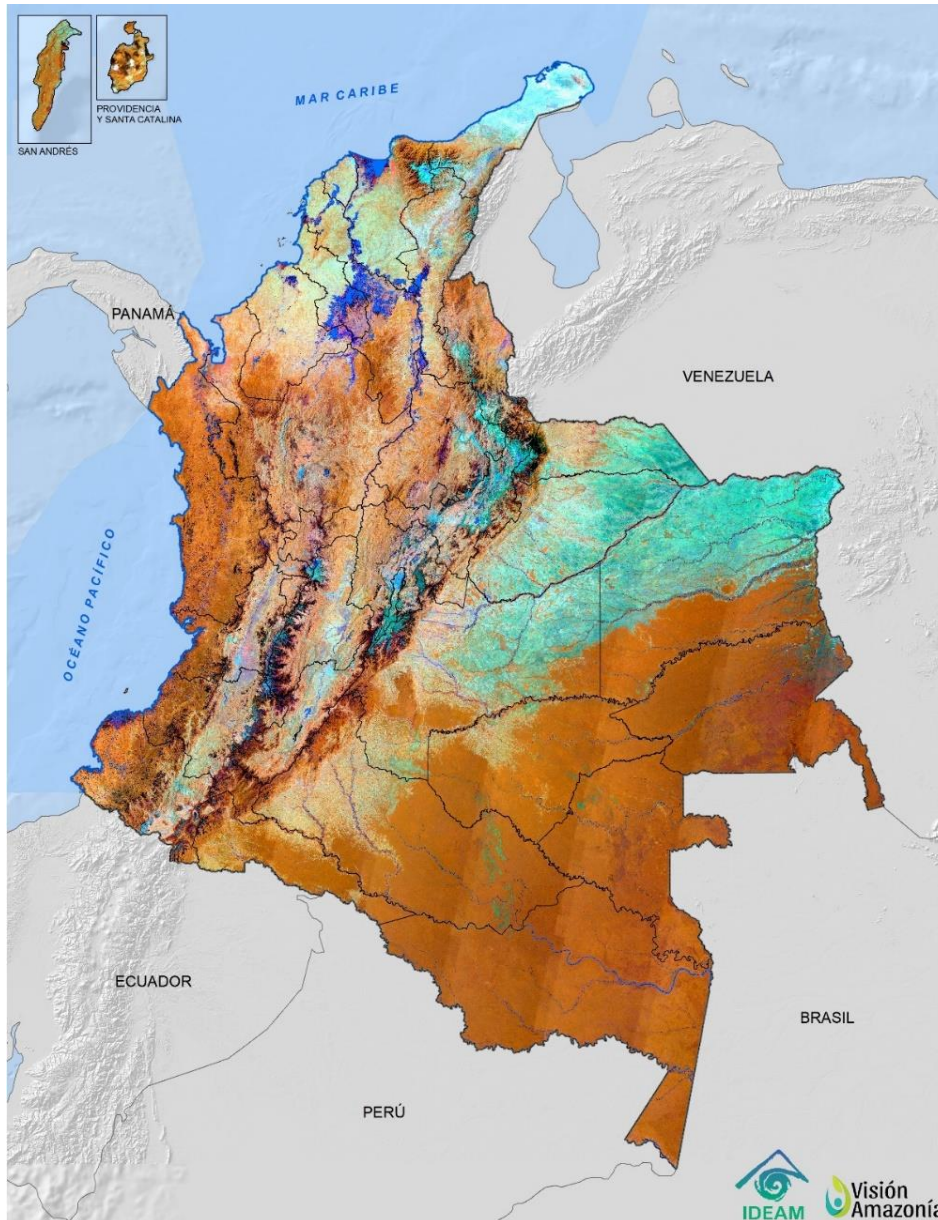


Figura 6. Mosaico de mediana de superficie de reflectancia 2022. Imágenes Landsat 8 y 9.

Para ejecutar este procedimiento, se ha desarrollado un algoritmo en Python que corre en la plataforma Q GIS: <https://github.com/SMByC/StackComposed-Qgis-processing>

La métrica de Last-pixel complementa los cambios encontrados con la mediana, al facilitar la identificación de cambios al final de cada periodo. Otros insumos, los cuales complementan la identificación de los cambios, son la métrica de la mediana y del último píxel de Sentinel 2 para cada periodo, imágenes y compuestos Planet Labs y, en algunas ocasiones, Worldview, así como capas de guía conocidas, tales como Google Earth, Bing y Esri, al igual que información secundaria de plantaciones forestales, cultivos de palma o de aprovechamiento forestal, entre otras.

1.1.2 Fase 2. Procesamiento digital de imágenes

Esta fase involucra tres pasos para la detección automatizada de cambios en la superficie de bosque natural, lo cual permite la detección directa de cambios en la respuesta espectral que puedan corresponder a una pérdida o ganancia de la cobertura del bosque. Luego, incorpora el conocimiento de expertos para la verificación visual directa de los cambios sobre las imágenes, a fin de minimizar los posibles errores y falsas detecciones debidas a errores en la clasificación automática de los cambios en la superficie de bosque. El resultado de esta fase es la identificación semiautomatizada de las clases de deforestación y regeneración. A continuación, se describen los pasos realizados.

Paso 7. Detección del cambio de cobertura de bosque

Para identificar el cambio de cobertura de bosque, se utiliza un método directo y automatizado, aplicando el análisis de componentes principales (PCA) sobre la matriz de correlación de los valores de los píxeles del compuesto temporal de medianas generado en el paso anterior, para luego realizar una reclasificación de los valores de los píxeles al valor de la clase correspondiente. La leyenda y los valores asignados en la reclasificación para cada clase son:

1. Bosque Estable
2. No Bosque Estable
3. Deforestación
4. Regeneración
5. Sin información (corresponde a los datos enmascarados debido a la ocurrencia de nubes y sombras de nube).

Para ejecutar este procedimiento, el SMByC ha desarrollado un *plugin* en el *software* Q GIS: <https://github.com/SMByC/PCA4CD>

Para ajustar las áreas sin información detectadas para cada periodo de reporte, se aplica un análisis de series de tiempo, con el cual se verifica la consistencia temporal. Para este proceso,

se tiene en cuenta la información del más reciente periodo de reporte, y con esta se ajustan las áreas sin información retrospectivamente para los otros periodos de reporte.

Paso 8. Verificación visual de los cambios detectados por parte del intérprete

Una vez finalizada la fase de procesamiento, en donde se ha ejecutado el proceso de PCA por escena o conjunto de escenas, cada intérprete codifica cada unidad de observación a la clase o categoría correspondiente, para obtener así un mapa preliminar de cambio de bosque con las siguientes clases o estratos:

- ❖ Bosque Estable
- ❖ Deforestación
- ❖ Sin información
- ❖ Regeneración
- ❖ No Bosque Estable

Para ejecutar este procedimiento, se desarrolló un algoritmo en Python que corre en un *plugin* de la plataforma Q GIS denominado ThRasE: <https://github.com/SMByC/ThRasE>. Este *software* cuenta con una diversidad de ventanas y herramientas que facilitan la edición de los datos ráster temáticos, y además, se pueden utilizar todos los insumos mencionados anteriormente de manera interactiva.

Paso 9. Control de calidad y ajustes durante el proceso

Se implementa un estricto proceso de control de calidad que implica el seguimiento de todos los procedimientos ejecutados, desde la descarga de las imágenes de satélite y los productos intermedios hasta los resultados del mapa de cambio de bosque y el mapa de superficie de bosque. El SMByC ha consolidado un conjunto de herramientas para garantizar la calidad, completitud y consistencia de los datos, a través de un *script* de Python ejecutado en Q GIS® para producir los informes de control de calidad para cada escena.

1.1.3 Fase 3. Evaluación de la exactitud temática

En esta fase, las zonas asignadas a los intérpretes para la generación de los cambios por deforestación, son sometidas a un proceso de control de calidad. En este proceso se generan muestreos aleatorios estratificados para cada una de estas zonas, con el fin de determinar la exactitud del productor y el usuario. Si la zona no cumple con los estándares establecidos, se devuelve al intérprete para ajustes y revisión. En total, para todo el territorio nacional se evaluaron alrededor de 160.000 puntos de muestreo, solo para concretar la fase a su versión final.

Posteriormente, se realiza un proceso de validación cruzada, el cual permite que cada zona interpretada pueda ser revisada por una tercera persona. Este proceso también es sujeto a control de calidad, y para 2020 conlleva la evaluación de aproximadamente 2.000 nuevos puntos aleatorios distribuidos en 25 zonas.

Paso 10. Diseño de muestreo

Se implementa un diseño de muestreo aleatorio y estratificado, en el que el tamaño de la muestra (n) se selecciona siguiendo las recomendaciones de Cochran (1977) para este tipo de diseño. La proporción asignada de cada clase utiliza una asignación proporcional basada en el área de cada estrato en comparación con el área total asignada (Stehman, 2012). Las proporciones de cada uno de los estratos se basan en el mapa de cambio de bosque para el año de referencia, los cuales son: (i) Bosque Estable; (ii) No Bosque Estable y (iii) Deforestación. Adicional a esta estratificación inicial, cada uno de los estratos se subdivide teniendo en cuenta las tendencias históricas de la deforestación, basadas en un mapa de riesgo de deforestación que identifica dos áreas principales: bajo riesgo y alto riesgo. En la Ecuación 1 se presenta la expresión matemática utilizada para calcular la proporción (W_i) de área mapeada ($A_{m,i}$) por clase i , con respecto al área total de las clases (A_{tot}):

$$W_i = \frac{A_{m,i}}{A_{tot}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

A las clases con mayor área mapeada se les asigna un valor de p de 0,9, por considerar que presentan una exactitud alta; mientras que las clases de cambio, deforestación en áreas con alto riesgo de deforestación (DEF-AR) y deforestación en áreas con bajo riesgo de deforestación (DEF-BR), se les asigna un valor de p de 0,80, por considerar que para estas clases existe mayor incertidumbre y, por lo tanto, menor exactitud.

Se calcula el error estándar (típico, S_i) asociado a cada clase como la raíz cuadrada de la varianza. El tamaño total de la muestra (n) se calcula como la sumatoria de los productos de la proporción de área (W_i), asociada a cada clase i , por los errores estándar (S_i) de cada clase, sobre un error estándar general de la clasificación $S(o)$, elevados al cuadrado, tal como se observa en la Ecuación 2:

$$n = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i S_i)}{S_o} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para el año de referencia, se asume entonces un valor para el error estándar esperado general de clasificación (0,005). La proporción asignada de cada estrato se basa en un enfoque simplificado del óptimo, en función de la proporción de área de cada estrato en comparación con el área total asignada. Así, los estratos más pequeños se ajustan minimizando el estimador de la varianza para la exactitud de esas clases de usuario, de acuerdo con las recomendaciones de Olofsson *et al.* (2014).

Paso 11. Implementación del muestreo

El control de calidad se ejecuta a partir de un *software* desarrollado también por el SMByC (Acatama), para la estimación de la exactitud temática de datos ráster. Este *software* permite la generación del diseño de muestreo, el diseño de respuesta y la estimación en un marco de inferencia basado en diseño, y en él se organiza y evalúa el muestreo aleatorio estratificado para cada zona de interpretación. La figura 7 configura un ejemplo de este análisis.

Para ejecutar este procedimiento, el *plugin* de QGIS está disponible en <https://github.com/SMByC/AcATaMa>

Paso 12. Interpretación de los puntos de muestreo

El equipo de intérpretes realiza la interpretación visual de cada unidad de verificación, aplicando las definiciones de bosque y deforestación adoptadas por el SMByC. Este procedimiento se aplica en Acatama, mediante la definición de una escala de referencia fija para la interpretación, tomando como base los identificadores y clasificando de manera consecutiva, como se aprecia en la figura 7. Como datos de referencia para la interpretación de los puntos de muestreo, se utilizan los compuestos de mediana anual y de *last pixel* para el año de referencia a evaluar, así como compuestos temporales de periodos anteriores y posteriores a este.

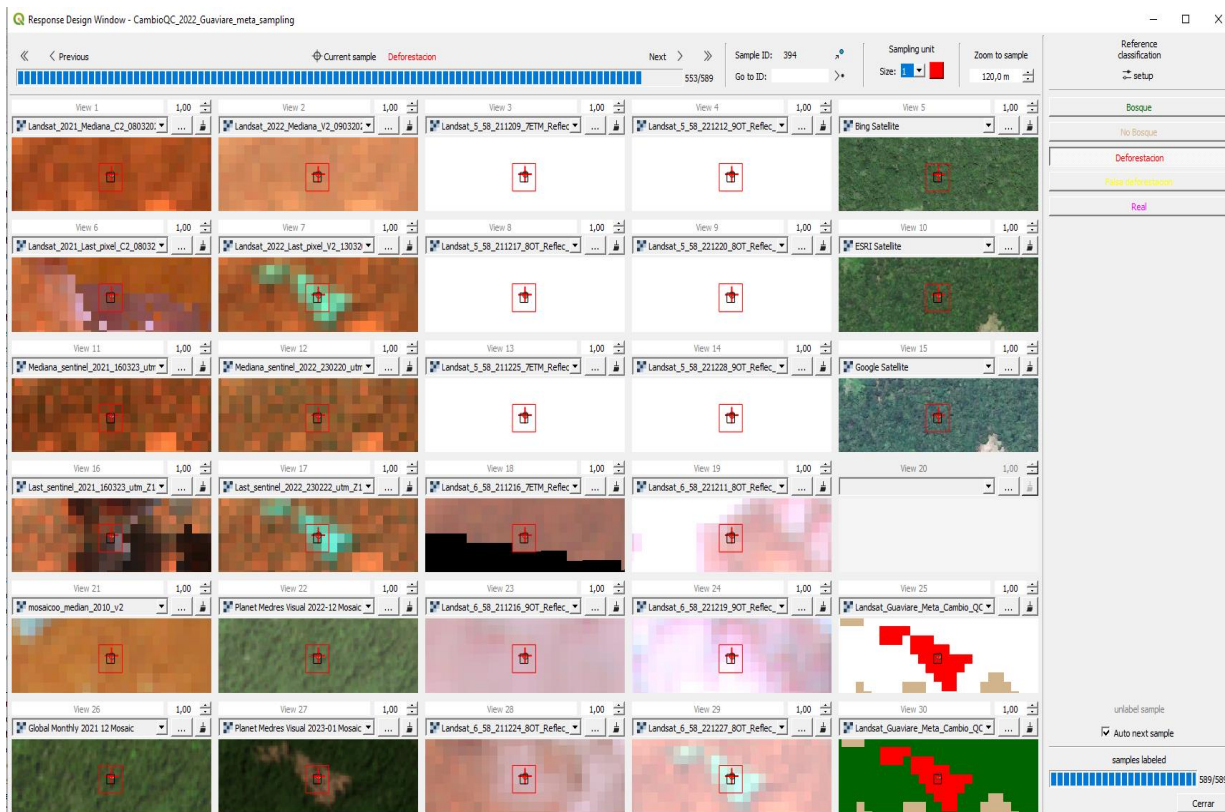


Figura 7. Evaluación de puntos aleatorios para la zona de Guaviare periodo 2021-2022.

Paso 13. Matriz de error e intervalos de confianza

Con los datos de referencia recogidos en el paso 12, se estima la exactitud de la clasificación en el mapa de cambio final. El acuerdo/desacuerdo entre el mapa y la referencia se resume en una matriz de error o confusión, que proporciona una evaluación de la precisión del mapa. A partir de esto, se calcula la frecuencia de correspondencia para evaluar la exactitud de cada clase, en términos de proporciones estimadas de clases y errores de omisión y comisión. Debido a que las medidas de exactitud son calculadas a partir de una muestra, están sujetas a incertidumbre (Olofsson *et al.*, 2013). Dicha incertidumbre se representa mediante el cálculo de su error estándar, utilizado para construir intervalos de confianza del 95 % que muestra el rango de valores en las estimaciones de área para las clases de mapa.

1.1.4. Fase 4. Reporte de los datos de monitoreo

Para calcular la superficie deforestada entre dos periodos de análisis, se tienen en cuenta únicamente las áreas para las cuales hay información en los dos periodos de análisis, de manera que exista la certeza de que el evento ocurrió en el periodo analizado. Las pérdidas de bosque detectadas luego de una o varias fechas sin información no son incluidas en el cálculo, con el fin de evitar tasas sobreestimadas en periodos en los que aumentan las áreas sin información (p. ej.: épocas climáticas de alta nubosidad o fallas en los sensores de los satélites). Después de la generación de resultados de cada periodo de monitoreo de la deforestación, se realiza un análisis de consistencia de la serie temporal, en el que se comprueba que para cada uno de los píxeles marcados como deforestación, ese mismo píxel no se ha marcado en los periodos anteriores como deforestado (al menos seis años). Si este fuera el caso, se corrige el resultado más reciente y se marca como No Bosque (NB) o se revisa el área específica de forma retrospectiva.

Podría ocurrir que después de seis años, un evento de cambio detectado antes de 2022 podría volver a ser marcado como deforestado solo en 2028 o 2029. De acuerdo con los datos disponibles, este tipo de eventos representan menos de 500 ha. El mismo procedimiento se aplica para “píxeles regenerados”, manteniendo el mismo proceso de chequeo en el que un píxel marcado como deforestado no podría ser asignado a una clase de cambio hasta después de seis años.

1.2 Caracterización de causas y agentes de la transformación del bosque

Los estudios de caracterización de causas y agentes de deforestación que se desarrollen están alineados temática y geográficamente; para ello, es preciso contemplar tres lineamientos metodológicos base:

- i. Los estudios deben emplear como base los datos de cobertura de bosque y deforestación generados por el SMBYC del Ideam, para garantizar la comparabilidad y replicabilidad de los análisis y estimaciones realizadas por estudios independientes. Asimismo, permiten la

articulación de los resultados con los reportes nacionales y el monitoreo de las intervenciones orientadas a mitigar la deforestación en todo el territorio nacional.

- ii. La delimitación de los estudios debe emplear el marco geoestadístico nacional diseñado para tal fin, que consiste en una retícula nacional de 24 km por 24 km, subdividida en retículas de 500 m por 500 m. Esto permite identificar y monitorear las áreas cubiertas por estudios, identificar las zonas sin información, y diseñar muestreos más rigurosos y comparables en términos temáticos.
- iii. El diseño de acciones y medidas efectivas para las áreas con mayor presencia del fenómeno de deforestación depende de estudios de caracterización representativos tanto en términos temáticos como geográficos. Esto implica contar con un análisis del grado de representatividad de la información recopilada para los análisis, a fin de diferenciar cuáles estudios realmente permiten inferir tendencias y extrapolar sus resultados al total del área de estudio delimitada por el desarrollador. Identificar estas limitaciones en los estudios durante la planeación de nuevas investigaciones evita omitir áreas que figuren como previamente caracterizadas, pero que en realidad hayan sido submuestreadas y requieran de mayor estudio.

Las actividades que causan de forma directa la deforestación deben ser caracterizadas en términos de los patrones espaciales asociados a su presencia, pero también por su importancia económica y sociocultural para los agentes de deforestación y demás actores clave involucrados. Actividades con un nivel de arraigo sociocultural alto requieren de medidas y acciones diferentes a aquellas en las que prevalece el beneficio económico sobre otros intereses. El análisis de actividades que causan deforestación debe hacerse como parte de un análisis más amplio, con el objetivo de establecer su importancia relativa (económica, sociocultural, etc.) dentro del conjunto de actividades y sistemas productivos forestales y no forestales que tienen presencia en el área de estudio.

2. ACTUALIZACIÓN DE CIFRAS DE MONITOREO - AÑO 2022

2.1 Monitoreo de la superficie de bosque en Colombia

Los resultados de monitoreo para 2022 identificaron una superficie de bosque natural de 59.277.461 ha, equivalentes al 51,9 % del territorio continental e insular del país, resaltando a Colombia como un país de bosques. Asimismo, esta actualización lo siguen catalogando como uno de los doce países con mayor cobertura boscosa del planeta, representando cerca del 1,5 % del bosque en el planeta, lo cual a su vez aporta significativamente para que sea considerado un país megadiverso, solo superado por Brasil.

De la misma forma, estos resultados permiten resaltar que la proporción de la superficie de bosque natural en Colombia está por arriba del promedio mundial, reportado como 30,6 % de la superficie global, y aunque los bosques no están distribuidos de manera equitativa, indica que tendríamos un equivalente de 0,52 ha de bosque en el planeta por persona (FAO, 2020), mientras que para Colombia este indicador con los datos oficiales sería de 1,14 ha de bosque por habitante². También, este resultado permite identificar que Colombia para 2022 cumple con las metas establecidas para 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 15.1), específicamente en lo relacionado con la conservación de más del 50 % de su territorio continental e insular cubierto por bosques.



Figura 8. Figuras de manejo de los bosques naturales en Colombia para 2022.

² Cálculo basado en los datos reportados por el DANE para 2022:

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Un análisis más detallado permite identificar que la mayor proporción de cobertura boscosa natural se concentra en la región de la Amazonia, cerca del 66 % del total nacional, con 38.911.990 ha. Asimismo, se reporta que el Caribe continúa siendo la región con menor proporción de cobertura boscosa natural, representando tan solo el 2,7 % del total nacional, con 1.617.477 ha de bosque natural (Figura 9).



Figura 9. Distribución de la superficie de bosque natural en Colombia 2022.

En Colombia, el 56 % de los bosques naturales se localiza en áreas de resguardos indígenas, territorios colectivos de comunidades negras y zonas de reserva campesina (ZRC); 21 % de la superficie de bosque se encuentra en áreas de parques nacionales naturales, y el 16 % en las zonas de reserva forestal (ZRF) declaradas por la Ley 2 de 1959, en sus diferentes tipologías (Figura 8). Finalmente, el análisis de este indicador a escala departamental permite resaltar que para 2022, los departamentos que concentran la mayor proporción

de la superficie del bosque natural del país son: Amazonas (17,9 %), Guainía (11,1 %) y Caquetá (10,7 %). De la misma forma, se identifica que los departamentos que cuentan con menor superficie de su territorio con bosque naturales son: Atlántico (0,007 %), Sucre (0,048 %), Quindío (0,086 %) y La Guajira (0,29 %).

De acuerdo con la información del DANE, en Colombia se identifican 1.123 municipios (Datos Abiertos, 2022), pero en la jurisdicción de 25 municipios se concentra el 57,3 % de la superficie de bosque del país, siendo los municipios de Solano (3,83 millones de ha) y Cumaribo (3,77 millones de ha) los que conservan las mayores superficies de bosque. Asimismo, se identifican 20 municipios con áreas que cumplen con los criterios que definen la superficie de bosque en Colombia.

2.2 Monitoreo de la superficie deforestada

Los resultados de monitoreo para 2022 permiten identificar que en Colombia se presentó una superficie deforestada de 123.517 ha, que se constituye como la cifra oficial de deforestación para el país (Figura 11). Con este resultado es posible analizar una reducción del 29,1 % respecto de la pérdida reportada en 2021, como se presenta en la Figura 10.

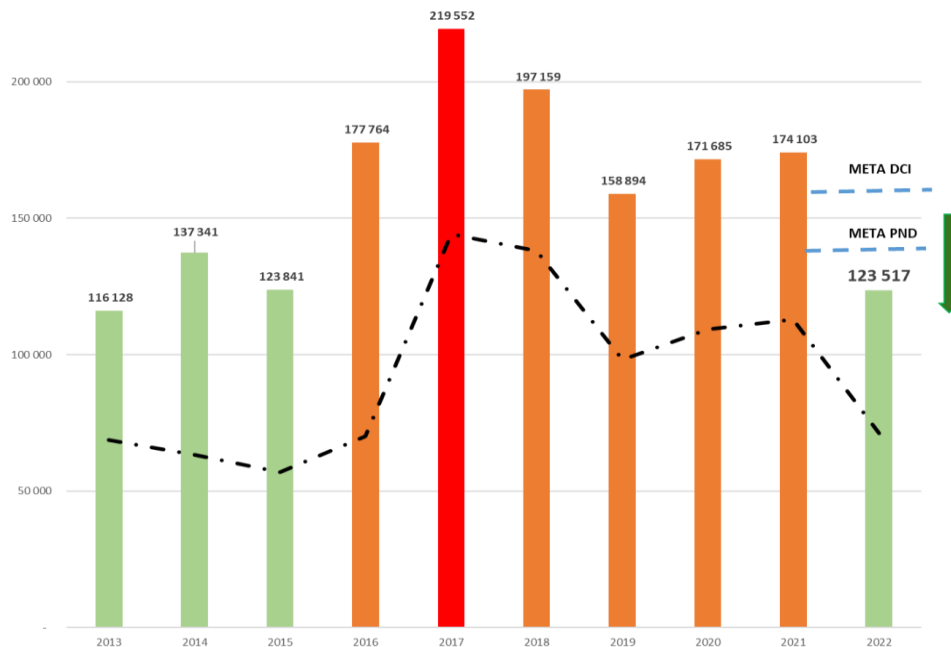


Figura 10. Dinámica de la deforestación a escala nacional y el bioma de la Amazonia. Periodo 2013-2022.

La dinámica de la superficie deforestada en Colombia para los últimos diez años (periodo 2013-2022) muestra que en 2022 se rompió la tendencia de aumento de la deforestación de los últimos dos reportes anuales (2020 y 2021), y evidencia que se regresó a cifras de deforestación que no se presentaban en Colombia desde 2015, lo que refleja un avance

en el cumplimiento de metas nacionales contenidas en el Plan Nacional de Desarrollo y la Declaración Conjunta de Intención, como se observa en la Figura 101.



Figura 11. Distribución de la superficie deforestada en Colombia 2022.

2.2.1 Dinámica regional de la deforestación 2022

A escala regional, las cifras obtenidas reportan que las áreas de cambio en la cobertura de bosque natural durante 2022 se concentran principalmente en las regiones de la Amazonia

(58 %), Andes (18 %) y Pacífico (11 %), mientras que las más bajas superficies deforestadas del periodo se presentaron en las regiones del Caribe (8 %) y la Orinoquia (5 %). En estos resultados se destaca la reducción de la deforestación en el bioma de la Amazonia, pasando de 112.899 ha en 2021 a 71.185 ha en 2022, es decir, una reducción del 37 %, que es mayor al resultado nacional. Asimismo, se identifica que el Caribe fue la única región donde se aumentó la deforestación: 939 ha respecto de la cifra de 2021, lo que representa un incremento del 10 %, como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Superficie deforestada en Colombia. Reporte por regiones naturales 2021-2022

Superficie Deforestada Anual (ha)				
Regiones Naturales	Año 2021	Año 2022	Diferencia 2021-2022	% Cambio 2021-2022
Caribe	9.544	10.483	939	10
Andina	29.903	22.163	- 7.740	-26
Amazonia	112.899	71.185	- 41.714	-37
Orinoquia	8.350	6.387	- 1.963	-24
Pacífico	13.406	13.299	- 107	-1

A escala departamental, en 2022, el 81 % de la pérdida de bosque natural del país ocurrió en la jurisdicción de ocho departamentos: Meta (24.109 ha), Caquetá (19.193 ha), Guaviare (15.721 ha), Putumayo (10.852 ha), Antioquia (10.290 ha), Chocó (8.569 ha), Norte de Santander (7.179 ha) y Nariño (4.535 ha), siendo el departamento del Meta el que presenta el mayor porcentaje de pérdida de bosque, con el 19,5 % del total nacional, como se presenta en la figura 12.

En términos de reducción de la superficie deforestada, los resultados de monitoreo permiten identificar que los departamentos de Caquetá (-19.500 ha), Meta (-15.129 ha), Guaviare (-9.294 ha) y Norte de Santander (-4.868 ha) presentaron las mayores reducciones comparados con los datos de 2021. Asimismo, es importante resaltar que, en términos porcentuales, las mayores reducciones se presentaron en Caquetá (-50 %), Norte de Santander (-40 %), Guaviare (-37 %) y Meta (-34 %). De la misma forma, se destaca que en 11 departamentos se identifica aumento de deforestación, principalmente en Chocó (+1.606 ha) y Antioquia (+538 ha), como se presenta en la figura 13.

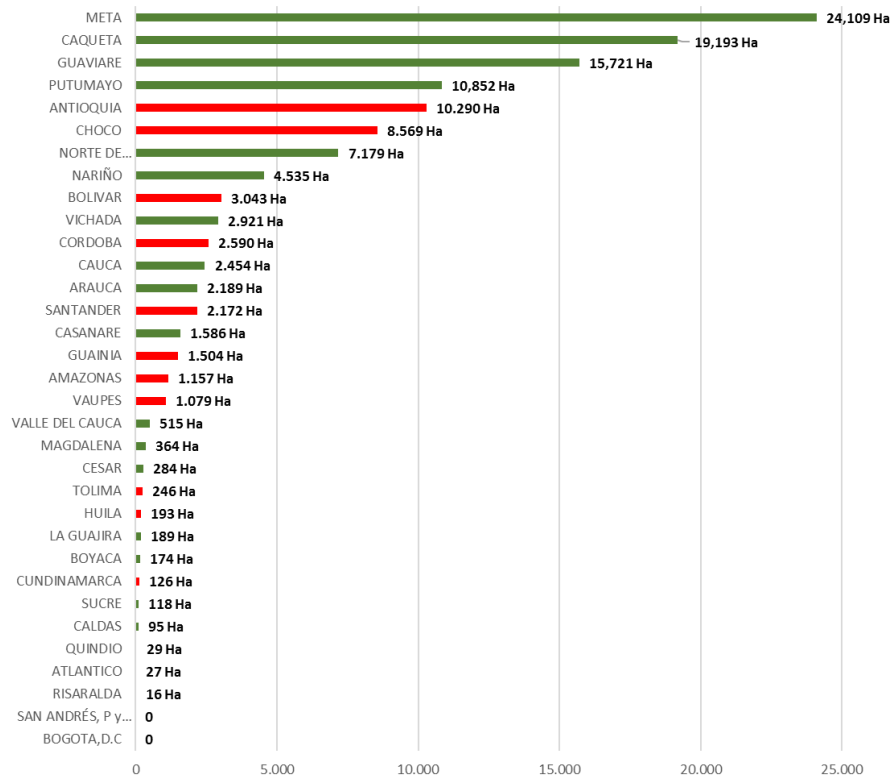


Figura 12. Superficie deforestada a escala departamental en Colombia 2022.

2.2.2 Dinámica municipal de la deforestación 2022

A nivel municipal, para 2022, los resultados de monitoreo permiten identificar que en 535 municipios se registró al menos 1 hectárea deforestada, así como que en la jurisdicción de 25 municipios se concentró el 66 % de la deforestación del país.

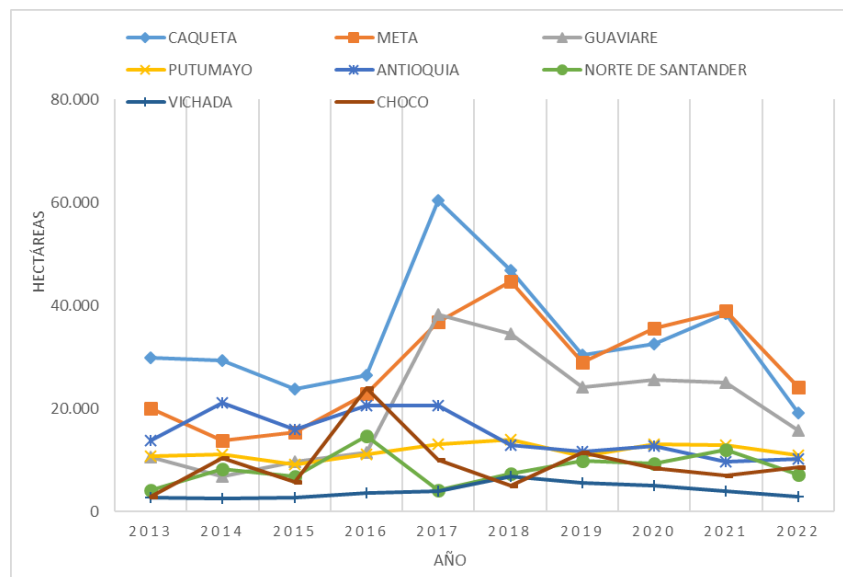


Figura 13. Dinámica de la deforestación a escala departamental en Colombia. Periodo 2013-2022.

Los municipios con las mayores superficies deforestadas son La Macarena (8.811 ha), Cartagena del Chairá (7.373 ha), San Vicente del Caguán (6.838 ha), Mapiripán (6.052 ha), San José del Guaviare (5.938 ha) y Calamar (5.209 ha), como se presenta en la figura 14.

En términos de reducción de la superficie deforestada, los resultados de monitoreo permiten identificar que los municipios de San Vicente del Caguán (-8.475 ha), Cartagena del Chairá (-8.468 ha), San José del Guaviare (-5.388 ha) y Tibú (-3.665 ha) presentaron las mayores reducciones comparadas con los datos de 2021.

Asimismo, es importante resaltar que, en términos porcentuales, las mayores reducciones se presentaron en San Vicente del Caguán (-55 %), Cartagena del Chairá (-53 %), El Retorno (-53 %) y San José del Guaviare (-48 %). De la misma forma, se destaca que se identifica aumento de deforestación, principalmente en Riosucio (+934 ha) y Tierralta (+756 ha), como se presenta en la figura 14.

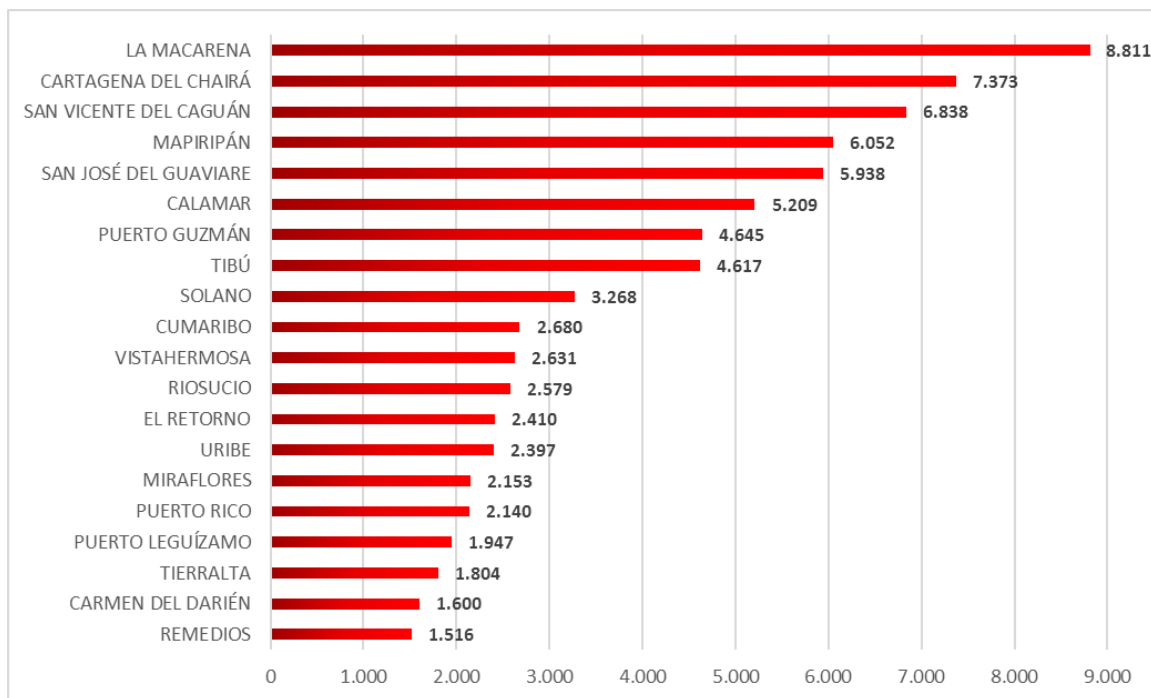


Figura 14. Superficie deforestada a escala municipal - Año 2022.

La tendencia de la pérdida de bosque para los ocho municipios con mayor deforestación en 2022 permite identificar que la deforestación presenta un patrón de disminución, principalmente en los municipios de San Vicente del Caguán (-55 %), Cartagena del Chairá (-53 %), San José del Guaviare (-48 %), Tibú (-44 %), Mapiripán (-43 %), Cumaribo (-28 %), La Macarena (-26 %), Calamar (-23 %) y Puerto Guzmán (-21 %). La tabla 1 muestra las hectáreas deforestadas en cada uno de estos municipios en 2022.

Tabla 2. Superficie deforestada en Colombia. Reporte por municipios 2021-2022

Departamento	Municipio	2022
META	LA MACARENA	8.811
CAQUETÁ	CARTAGENA DEL CHAIRÁ	7.373
CAQUETÁ	SAN VICENTE DEL CAGUÁN	6.838
META	MAPIRIPÁN	6.052
GUAVIARE	SAN JOSÉ DEL GUAVIARE	5.938
GUAVIARE	CALAMAR	5.209
PUTUMAYO	PUERTO GUZMÁN	4.645
NORTE DE SANTANDER	TIBÚ	4.617
CAQUETÁ	SOLANO	3.268
VICHADA	CUMARIBO	2.680
META	VISTAHERMOSA	2.631
CHOCÓ	RIOSUCIO	2.579
GUAVIARE	EL RETORNO	2.410
META	URIBE	2.397
GUAVIARE	MIRAFLORES	2.153
META	PUERTO RICO	2.140
PUTUMAYO	PUERTO LEGUÍZAMO	1.947
CÓRDOBA	TIERRALTA	1.804
CHOCÓ	CARMEN DEL DARIÉN	1.600
ANTIOQUIA	REMEDIOS	1.516
ANTIOQUIA	SEGOVIA	1.489
PUTUMAYO	PUERTO CAICEDO	1.111
NARIÑO	TUMACO	1.006
PUTUMAYO	PUERTO ASÍS	989
ARAUCA	ARAUQUITA	898

2.2.3 Dinámica de la deforestación en 2022 en las figuras de manejo

Para 2022, la deforestación en áreas del Sistema de Parques Nacionales Naturales representó el 10 % del total nacional (12.449 ha), valor superior a 2021, cuando representó el 8,2 %; sin embargo, se resalta una reducción en área total deforestada del 12,8 %, respecto a la cifra total de 2021.

El PNN Tinigua es el área protegida que presentó la mayor deforestación, con 4.878 ha, seguido del PNN Sierra de La Macarena, con 2.738 ha. Igualmente, se destaca una reducción en la deforestación en los PNN Serranía de Chiribiquete, PNN La Paya, RNN Nukak, PNN Cordillera de los Picachos, PNN Tinigua y PNN Sierra de La Macarena, como se muestra en la Tabla 3. Nos obstante, se resalta el aumento de la deforestación en el PNN Paramillo, que pasó de 727 ha deforestadas en 2021 a 1.200 ha deforestadas en 2022, lo que indica un aumento de 463 ha deforestadas, siendo necesario reforzar las acciones de control en esta área protegida (Tabla 3).

Las ZRF declaradas por la Ley 2 de 1959 han sido históricamente afectadas por la deforestación. Para 2022, en este tipo de áreas se deforestaron 33.602 ha de bosque natural, que representan cerca del 27,2 % de la deforestación del país para el mismo periodo.




Tabla 3. Superficie deforestada en Colombia. Reporte por áreas del Sinap 2019-2022

Parque Nacional Natural	2019	2020	2021	2022
Tinigua	6,527	5,708	5,341	4,878
Sierra de la Macarena	2,173	3,629	3,222	2,738
Serranía de Chiribiquete	820	1,948	2,207	1,272
Paramillo	806	1,008	727	1,200
La Paya	679	1,067	888	551
Catatumbo Bari	344	246	277	353
Nukak	631	612	407	215
Cordillera de los Picachos	208	298	208	181
Yaigoje Apaporis	232	153	128	143
Sierra Nevada de Santa Marta	369	331	153	141
El Tuparro	37	237	84	137
Puinawai	40	102	138	124
Cahuinari	35	4	3	101
Las Orquideas	16	38	19	80
Serranía de los Yariguies	25	1	3	46
Los Katis	10	25	2	36
Serranía de los Churumbelos - Auka Wasi	12	5	25	34
Sanquianga	10	56	54	24
Río Pure	7	99	0	24
Tama	60	17	71	23
Nevado del Huila	7	13	1	23
Amacayacu	16	13	84	22
Munchique	14	78	63	19
Farallones de Cali	17	76	60	17
Alto Fragua - Indi Wasi	7	19	29	16
El Cocuy	8	8	22	16
Las Hermosas	0	10	7	11
Tatama	1	0	0	7
Utria	10	20	13	7
Sumapaz	17	8	4	7
Chingaza	0	1	8	3
Isla de Salamanca	0	40	3	0

Las áreas zonificadas como tipo A son las más afectadas por este fenómeno, con 22.913 ha, que representan el 68,2 % de la deforestación. Asimismo, las áreas zonificadas como tipo B están bastante afectadas, con cerca de 9.271 ha, que representan el 27,6 % de la deforestación.

Finalmente, con respecto al nivel de afectación de las siete grandes reservas, se tiene que para 2022, en la ZRF de la Amazonia se identificaron 24.816 ha deforestadas (20,1 % del total nacional); en la ZRF de la Amazonia, 24.816 ha deforestadas (20,1 % del total nacional), principalmente localizadas en las áreas tipo A (18.782 ha). Otra de las reservas afectadas es la ZRF del río Magdalena, con 5.965 ha deforestadas (4,8 % del total nacional), principalmente localizadas en las áreas tipo B (2.979 ha) (Tabla 4).

Tabla 4. Superficie deforestada en Colombia. Reporte zonas de reserva forestal L.2/59. 2022

 		
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono		
 Cambio en la superficie cubierta por bosque natural (ha). Reporte por Reservas Forestales de Ley Segunda. Año 2022		
<i>Zona de Reserva Forestal</i>	<i>Tipo de Zonificación</i>	<i>Deforestación Anual (ha)</i>
Amazonia	Tipo A	18 782
	Tipo B	5 991
	Tipo C	44
Central	Tipo A	59
	Tipo B	20
	Tipo C	0
Cocuy	Tipo A	171
	Tipo B	21
	Tipo C	13
Pacífico	Tipo A	1 551
	Tipo B	265
	Tipo C	58
Río Magdalena	Tipo A	2 020
	Tipo B	2 979
	Tipo C	966
Serranía de los Motilones	Tipo A	279
	Tipo C	317
Sierra Nevada de Santa Marta	Tipo A	51
	Tipo B	15

Para el año 2022 la deforestación en Resguardos Indígenas³ representó cerca del 12 % del total nacional, con 15.115 ha, principalmente en el bioma de la Amazonia, siendo los

³ Cálculo basado en los datos reportados por la Agencia Nacional de Tierras (ANT) para 2019:
<https://www.ant.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/datos-abiertos/>

resguardos indígenas de Llanos del Yarí – Yaguará II, Nükak-Makú, Vaupés y Selva de Matavén las áreas más afectadas, con 2.230 ha, 1.926 ha, 825 ha y 733 ha, respectivamente. Este resultado permite identificar una reducción de 11 % respecto de 2021, cuando se deforestaron 18.603 ha. El 56 % de la deforestación identificada en la jurisdicción de Resguardos indígenas se concentró en 10 de las 730 áreas declaradas hasta 2018.

Para 2022, la deforestación en Consejos Comunitarios de Comunidades Negras Indígenas (CCCN) representó el 9,7 % del total nacional, con 11.932 ha, principalmente en el bioma del Pacífico. Este resultado permite identificar una reducción de 5,3 % respecto de 2021, cuando se deforestaron 12.595 ha. No obstante, se resalta una mayor concentración de la deforestación en este tipo de áreas, puesto que se identifica una menor reducción respecto del total nacional, y la representatividad aumentó del 7,2 % en 2021 a 9,7 % en 2022. Los CCCN más afectados fueron Acadesán y Río Cacarica, con 919 ha y 750 ha, respectivamente. El 48 % de la deforestación identificada en la jurisdicción de CCCN se concentró en 10 de las cerca de 180 áreas declaradas hasta 2019.

Finalmente, para 2022, la deforestación en ZRC representó cerca del 2 % del total nacional, con 2.163 ha, principalmente en el bioma de la Amazonia. Este resultado permite identificar una reducción de 5,3 % respecto de 2021, cuando se deforestaron 4.519 ha. Las ZRC de Guaviare y valle del río Cimitarra fueron las áreas más afectadas, con 1.433 ha y 455 ha, respectivamente; asimismo, estas dos ZRC concentraron el 87 % de la deforestación identificada en la jurisdicción de ZRC.

2.2.1 Análisis complementarios de la dinámica de deforestación 2022

Análisis geoestadístico de la deforestación en Colombia. Periodo 2014-2022

A partir de la información reportada por el SMByC del Ideam, se presenta un análisis de la dinámica de la superficie deforestada en la superficie continental de Colombia, para el periodo 2014-2022. San Andrés y Providencia están excluidos del presente análisis, dada su escala de análisis y la baja dinámica de cambio por deforestación.

El análisis estadístico contiene la información a escala nacional, departamental, municipal, veredal y por Núcleos de Desarrollo Forestal y de la Biodiversidad. Las unidades principales del análisis son los polígonos de deforestación detectados anualmente por el SMByC del Ideam. Para este análisis espacial se considera que los polígonos son asignados a una sola unidad espacial, de acuerdo con la localización de su centroide, sin subdivisión de unidades espaciales. Esto podría tener un impacto mínimo en las estadísticas agregadas, dada esta característica. Asimismo, dependiendo de la variación anual del tamaño de los polígonos, la asignación a la unidad espacial puede variar año a año, lo cual también puede tener un impacto mínimo en las estadísticas anuales. Un polígono puede estar asignado a una unidad espacial y posteriormente a otra diferente y adyacente, de acuerdo con su crecimiento.

Los intervalos de áreas deforestadas anuales con los cuales se generaron las estadísticas son:

- o Intervalo 1: menor a 2 ha
- o Intervalo 2: mayor o igual a 2 y menor a 5 ha
- o Intervalo 3: mayor o igual a 5 y menor a 10 ha
- o Intervalo 4: mayor o igual a 10 y menor a 20 ha
- o Intervalo 5: mayor o igual a 20 y menor a 30 ha
- o Intervalo 6: mayor o igual a 30 y menor a 50 ha
- o Intervalo 7: mayor o igual a 50 ha

Bajo este contexto metodológico, se identifica que en promedio el número total de parches deforestados se ha mantenido relativamente estable en los últimos nueve años. No obstante, analizando los intervalos, se evidencia que históricamente el mayor número de parches está en las áreas pequeñas (< 2 ha) y que este intervalo ha presentado un crecimiento desde 2019, como se aprecia en la Figura 15 y la Tabla 5. Asimismo, es importante mencionar que el resto de los intervalos han tenido una reducción del número de parches desde 2020.

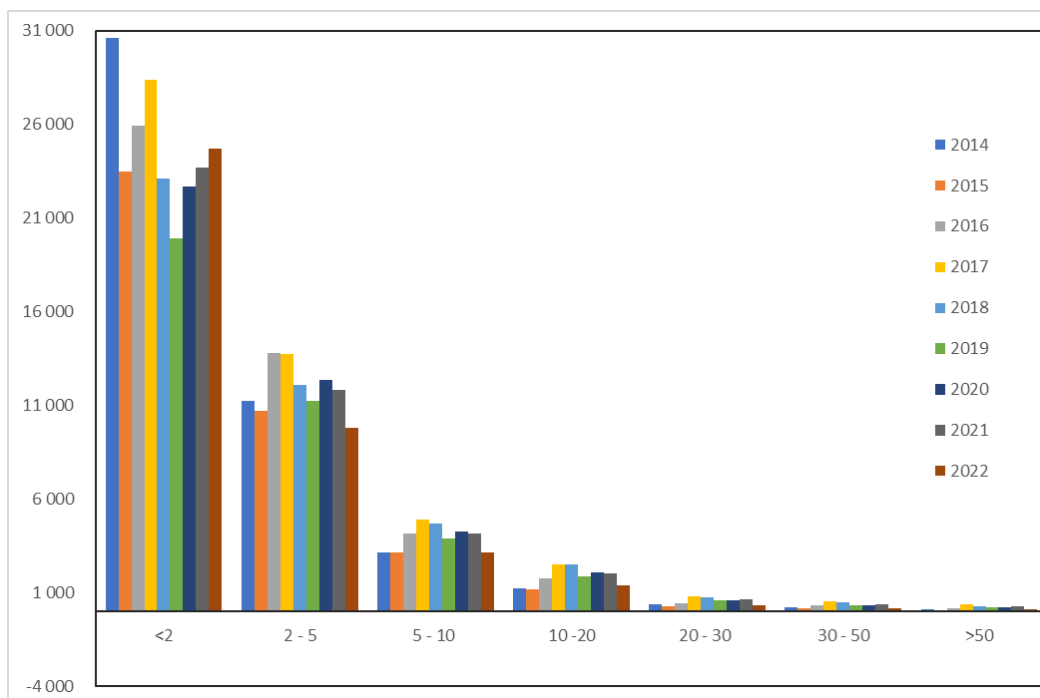


Figura 15. Análisis # polígonos deforestados. Periodo 2014-2022.

El tamaño promedio de parche se disminuye en 2022, pasando de 4,1 ha a 3,1 ha. Los parches de mayor tamaño se concentran en Calamar, PNN Macarena y Cartagena del Chairá.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se observan dos patrones respecto del tamaño promedio de parche, un periodo de crecimiento desde 2014 hasta 2018 y un periodo de reducción desde 2015 hasta 2022.

Tabla 5. Análisis geoestadístico de la deforestación. Periodo 2014-2022

Año de reporte	# Polígonos	Polígono máx. (ha)	Tamaño promedio(ha)
2014	46.952	737	2,9
2015	39.090	753	3,1
2016	46.620	2.700	3,8
2017	51.218	889	4,3
2018	43.930	637	4,5
2019	38.073	2.305	4,2
2020	42.546	1.099	4,0
2021	42.945	285	4,1
2022	39.665	336	3,1

De la misma forma, se revela que el tamaño máximo del parche deforestado se presentó en 2016, cuando se acumuló una deforestación de 2.700 ha en un solo polígono, y que para el último año de reporte, el tamaño del mayor parche deforestado aumentó, pasando de 285 ha en 2021 a 336 ha en 2022, como se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

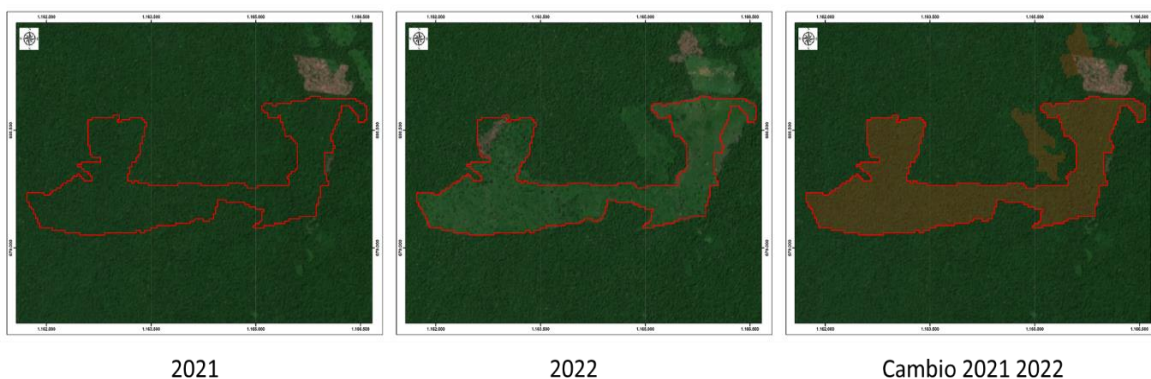


Figura 16. Tamaño máximo del parche deforestado. Periodo 2021-2022.

Dentro del análisis de tamaño de parche, se tiene que el mayor parche de deforestación de 2022 se localiza en el municipio de Calamar (Guaviare). En general, los de mayor tamaño

se concentran en el municipio de Calamar, PNN Sierra de La Macarena y el municipio de Cartagena del Chairá (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

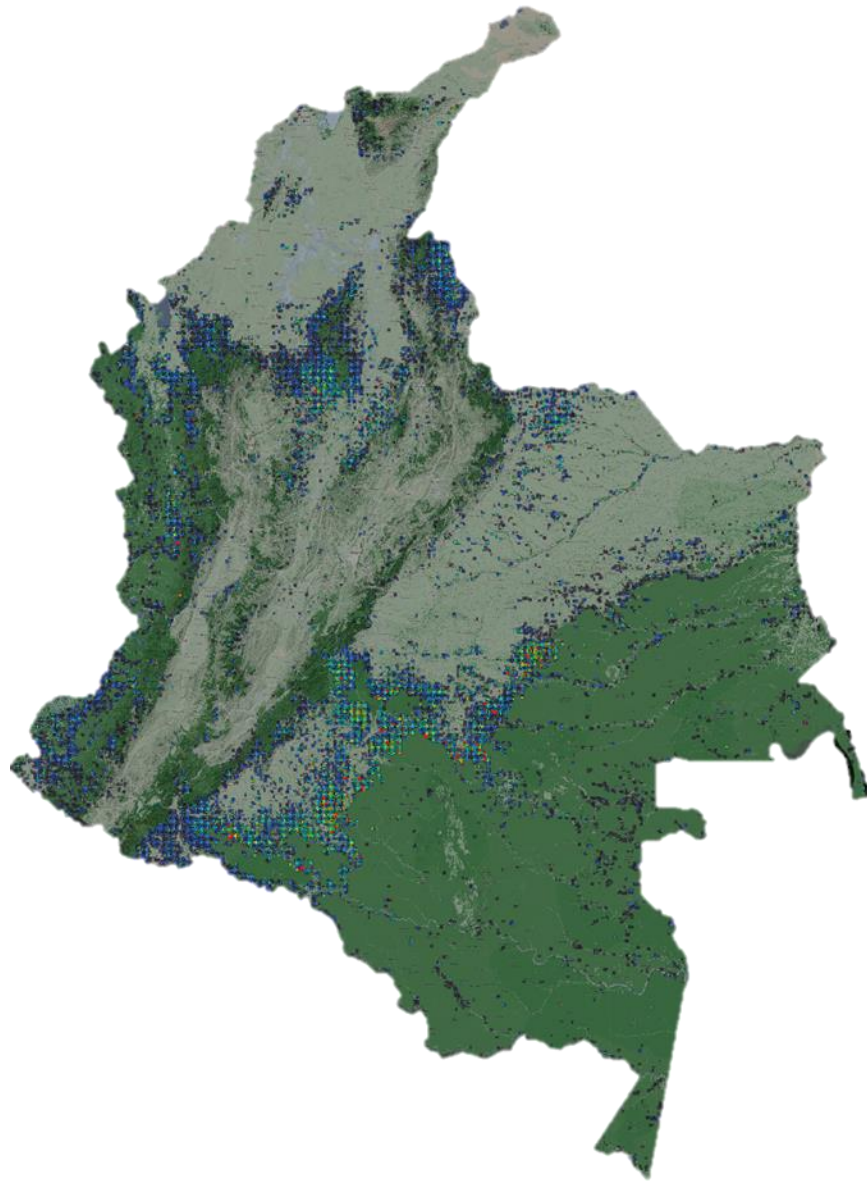


Figura 177. Dinámica de los tamaños de parches deforestados 2022.

Para el periodo 2014-2022 se identifica un comportamiento variable de la dinámica de la superficie deforestada asociada al tamaño de los parches deforestados mayores de 30 ha; asimismo, se evidencia que la mayor proporción de importancia coincide con el pico de deforestación de 2017, cuando representó cerca del 40 % de la deforestación nacional, con 53.406 ha, como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

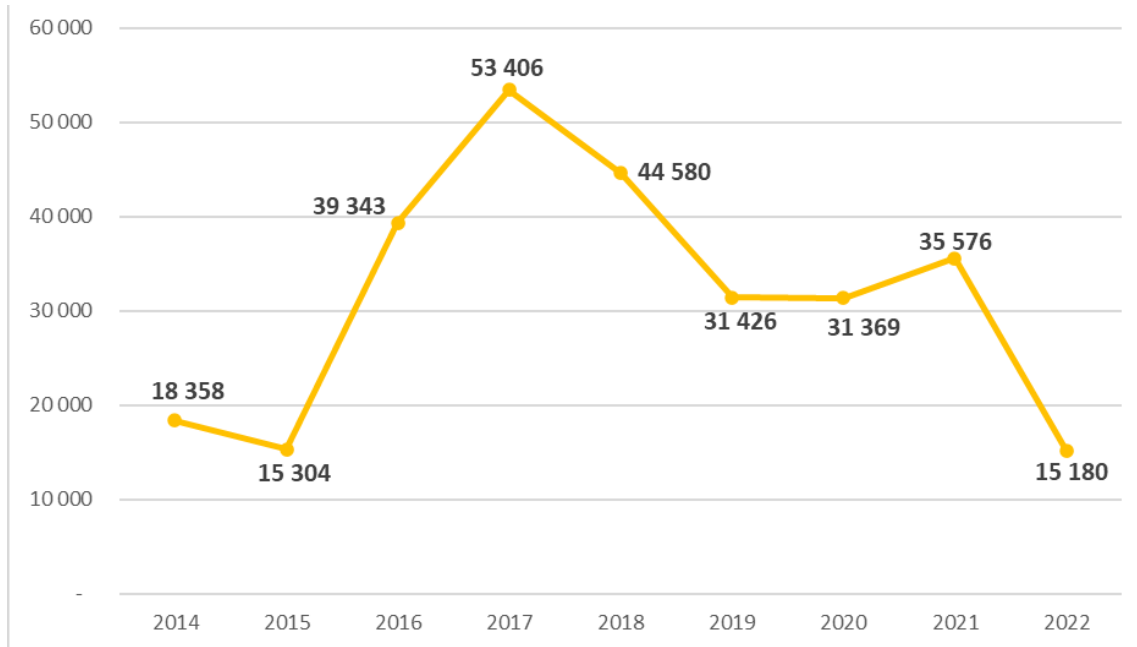


Figura 188. Dinámica de la superficie deforestada. Parches > 50 ha.

A partir de entonces, su participación ha disminuido ostensiblemente hasta llegar a su mínimo histórico en 2022, cuando solo representaron el 19 % del total de la deforestación distribuida en 276 parches.

Pérdidas de bosque asociadas a fenómenos naturales

Para algunas áreas forestales, los resultados de monitoreo identifican un aumento del efecto de fenómenos naturales asociados a la pérdida de bosque natural, principalmente asociado a deslizamientos de tierra y la ocurrencia de las denominadas “Chagras de viento”⁴, (Figura 19). Para 2022, estos fenómenos estuvieron relacionados con el 2,3 % de la deforestación nacional, indicando un leve aumento respecto de 2021, cuando representaron el 1,7 %.

Respecto de su localización espacial, se identificaron procesos de deslizamientos en el piedemonte de la cordillera Oriental, en el municipio de La Montañita (Caquetá), donde en el primer trimestre de 2022 se presentaron numerosos deslizamientos que generaron pérdidas de bosque natural, y que en su momento fueron reportados en el boletín trimestral # 31 de detecciones tempranas de deforestación⁵ del segundo trimestre de 2022.

⁴ Corresponden al volcamiento o derribo masivo de árboles por efecto de vientos de alta intensidad que pueden provocar grandes parches de bosque “derribado” (PCA, 2021).

⁵ Todos los boletines pueden ser consultados en <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/alertas-tempranas-por-deforestacion>

Respecto de las chagras de viento, se destaca una ocurrida en el municipio de Puerto Colombia (Guainía), donde el impacto de vientos de alta velocidad afectó una extensa área boscosa en diciembre de 2022.

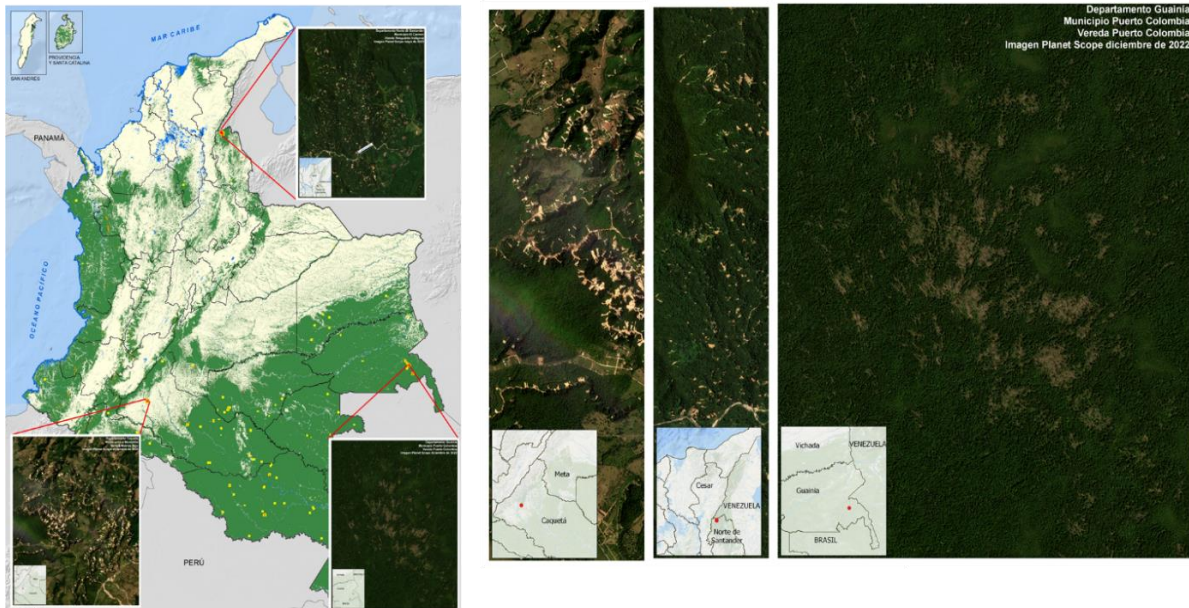


Figura 19. Pérdidas de bosque natural asociadas a fenómenos naturales 2022.

Relación de dinámica de puntos de calor vs. deforestación. Año 2022

El SMByC del Ideam realiza un monitoreo permanentemente, cada 8 horas, de los puntos de calor detectados por los sensores satelitales Modis Aqua, Modis Terra y Viirs. Para facilitar el acceso a esta información, incluso los datos georreferenciados, se diseñó y puso en operación la plataforma web <http://incendiosactivos.ideam.gov.co/>, donde se puede acceder a la información cartográfica de monitoreo de puntos de calor a escala nacional, regional, departamental, autoridades ambientales y Parques Nacionales Naturales.

Es importante mencionar que una alta densidad de puntos de calor detectados por estos satélites es una buena aproximación a la ocurrencia de quemados o incendios, lo que permite reconocer un vínculo entre la ocurrencia de incendios y el cambio de cobertura terrestre, en especial con la deforestación en las temporadas secas del año. En la mayoría de los casos, estos puntos identifican fuegos en áreas con algún tipo de vegetación, pero también pueden ser llamas por combustión de gases, tormentas eléctricas, etc. Para una adecuada utilización de los datos, y de acuerdo con las recomendaciones del equipo técnico de la NASA, el SMByC efectúa filtrajes utilizando la información de diferencial de temperatura superficial y los valores de radiación registrados por el sensor, para seleccionar solamente los datos de puntos de calor con mayor relación con quemados.

Para 2022 se realizaron 52 reportes semanales de puntos de calor, cuyo resultado reveló que el primer trimestre del año fue el que presentó los principales picos de puntos de calor, desde la primera semana de enero hasta la tercera semana de febrero; el resto del año estuvo influenciado por efectos del fenómeno de La Niña, que genera una menor ocurrencia de puntos de calor. La última semana de enero (enero 26 - febrero 2) fue la más crítica en cuanto a la ocurrencia de puntos de calor, coincidiendo con el pico de alertas tempranas de deforestación del año, como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

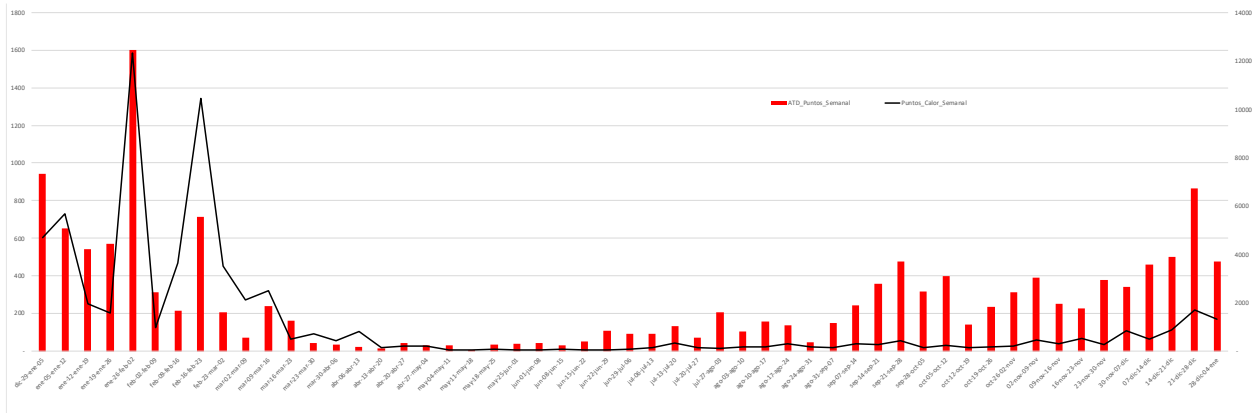


Figura 20. Alertas tempranas de deforestación y puntos de calor semanales por departamentos 2022.

Para 2022, la mayor densidad de puntos de calor detectados en el país estuvo asociada a prácticas rutinarias de “mantenimiento” de pastizales o rastrojos, quemas de residuos de diferentes cultivos o quemas estacionales de las sabanas naturales. Solo un porcentaje bajo de los puntos de calor están asociados a eventos de deforestación, y usualmente se asocian a dinámicas de quemas que se presentan semanas o meses después de la tala, principalmente en el sur del departamento del Meta y en Caquetá, en el bioma de la Amazonia, como se observa en la Figura 21 (izquierda).

Para 2023 se identifica una reducción del 38,3 % en la ocurrencia de puntos de calor filtrados (mayor relación con quemas e incendios), como se muestra en la Figura 21 (derecha).

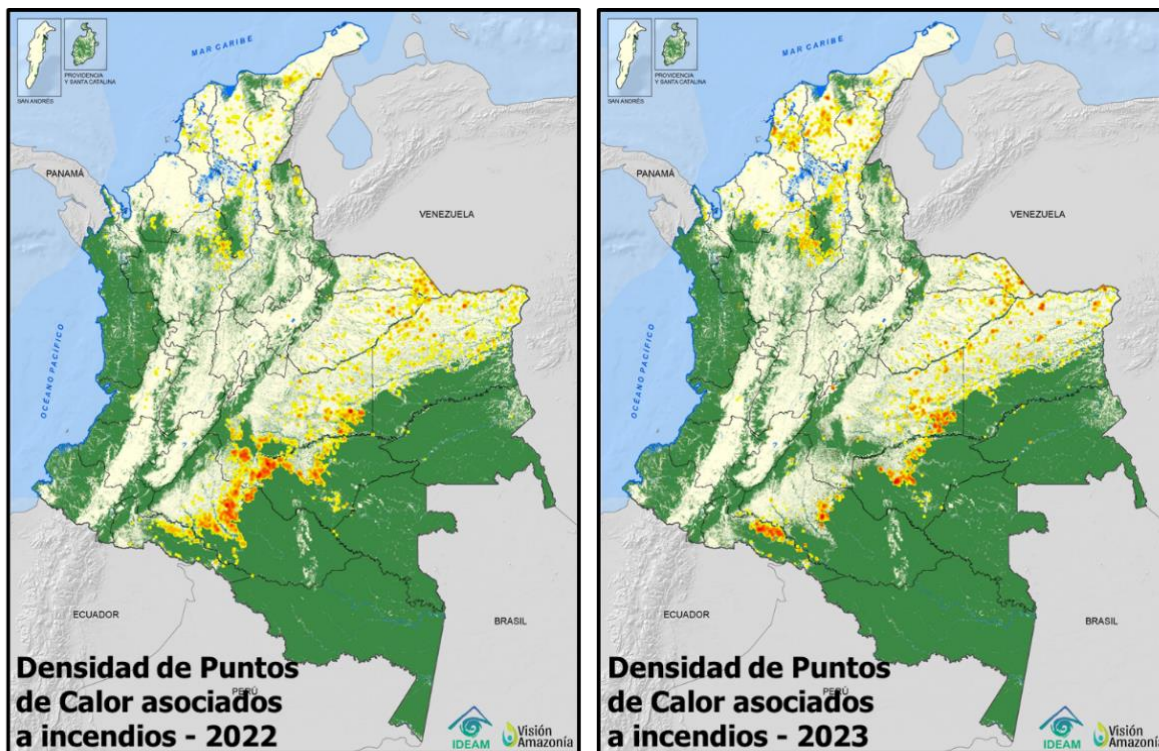


Figura 21. Incidencia de puntos de calor asociados a quemas e incendios 2022 vs. 2023.

2.3 Principales causas y agentes de la deforestación en Colombia durante 2022

La actualización de cifras anuales de monitoreo de la deforestación del SMByC incorpora información del componente técnico para la identificación de causas y agentes de la transformación del bosque.

Las principales causas directas de la deforestación durante 2022, a escala nacional, fueron la praderización orientada al acaparamiento de tierras, las prácticas no sostenibles de ganadería extensiva, el desarrollo de infraestructura de transporte no planificada, los cultivos de uso ilícito, la extracción ilícita de minerales, la tala ilegal y la ampliación de la frontera agrícola en áreas no permitidas (Figura 22).

2.3.1 Identificación de principales núcleos activos de deforestación

La pérdida de bosque natural (52,5 % de la deforestación nacional) se concentró en nueve núcleos de activos o de alta deforestación (NAD) que se describen en la Figura 23. A excepción del NAD Pacífico Norte, los núcleos que permanecen de 2021 redujeron su área total entre el 15 % y el 62 %, presentándose la mayor reducción en el NAD Sabanas del Yarí-Caguán. Únicamente se identificó un NAD en 2022 que no se encontraba en 2021, denominado NAD Paramillo.



Figura 22. Principales causas directas de deforestación en Colombia 2022.

A continuación, se describen cada uno de los NAD identificados para el año 2022:

1. Guaviare (Marginal de la Selva) (12,3 % de la deforestación nacional): La mayor proporción de este núcleo se encuentra en el departamento del Guaviare, con importantes áreas dentro de sus cuatro municipios: Calamar, El Retorno, Miraflores y San José del Guaviare. El extremo occidental del núcleo se encuentra en el municipio de La Macarena (departamento del Meta), teniendo como principal eje de transformación el río Guayabero. Dentro de este NAD se ubican áreas de los resguardos indígenas El Itilla, La Yuquera, Llanos del Yarí-Yaguara II y Nukak-Makú, altamente afectados por la deforestación. El límite norte del PNN Serranía de Chiribiquete forma parte del núcleo, al igual que pequeñas áreas del PNN Sierra de La Macarena y la RNN Nukak (Figura 24).

La expansión y consolidación de infraestructura de transporte no planificada es la principal causa de la deforestación en el núcleo, con especial relevancia de los ejes Calamar-Miraflores, Marginal de la Selva y sus conexiones que se internan en el PNN Serranía de Chiribiquete y en el resguardo Llanos del Yarí - Yaguará II, así como en las vías que llegan al límite occidental del resguardo Nukak-Makú y la RNN Nukak. Estos accesos facilitan la conversión de los bosques hacia pastizales, tanto para acaparar tierras como para la expansión de prácticas ganaderas no sostenibles. Adicionalmente, persisten zonas para el cultivo de coca, con mayor concentración en el extremo occidental de la RNN Nukak y el resguardo Nukak-Makú.

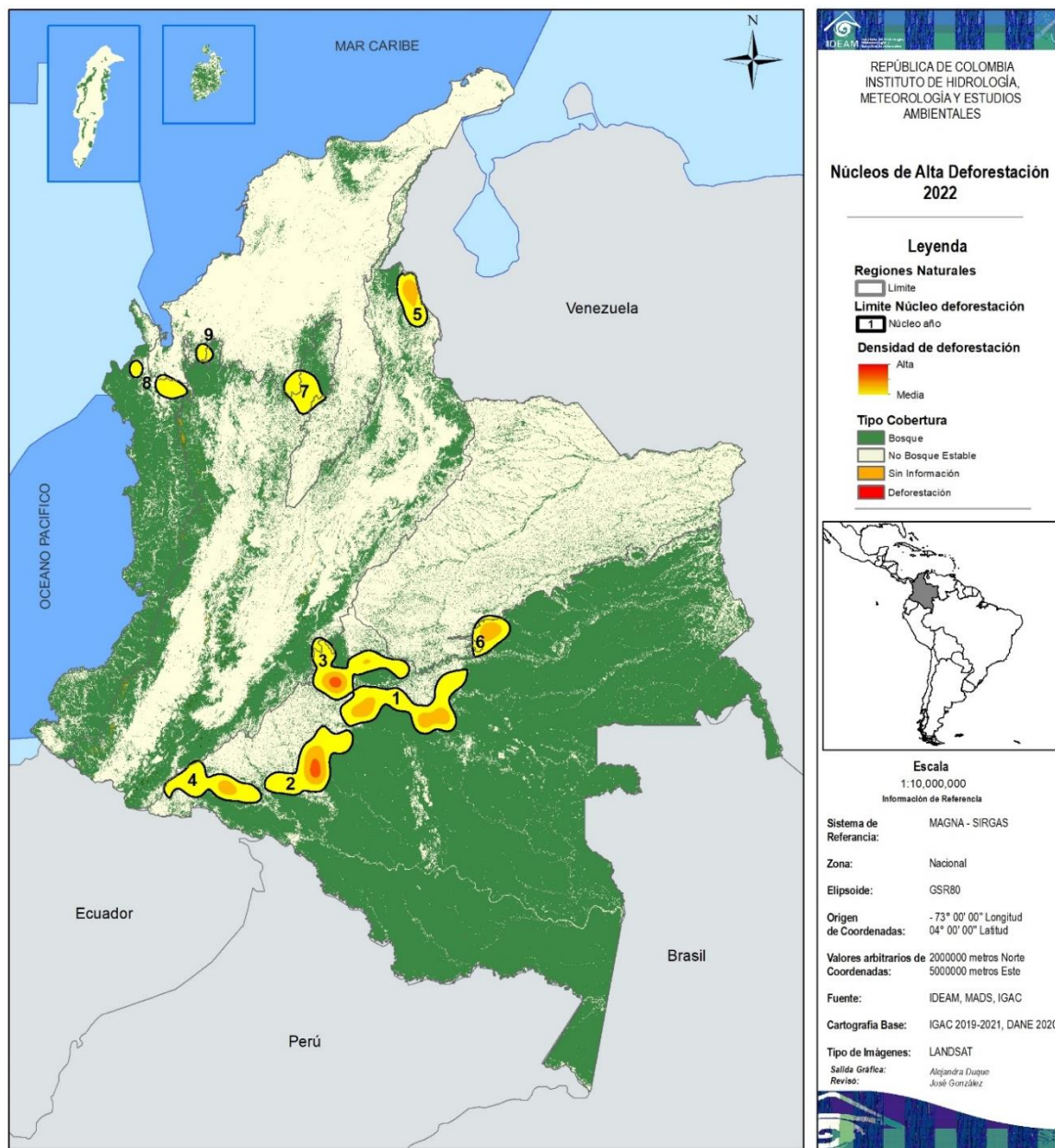


Figura 23. Núcleos de alta deforestación (NAD) 2022.

- Sabanas del Yarí-Caguán (10,6 %):** Este núcleo se encuentra en su totalidad en el departamento del Caquetá, en los municipios de San Vicente del Caguán, Cartagena del Chairá y Solano, y está atravesado por los ríos Caguán, Camuya, Cuemaní, Suncillas y Yarí. Dentro del núcleo se encuentran áreas de los resguardos indígenas El Guayabal, El Quince, Jericó-Consaya, Puerto Naranjo-Peñas Rojas-Cuerazo-El Diamante y La Libertad 2. El extremo oriental del NAD se encuentra dentro del PNN Serranía de Chiribiquete (Figura 25).

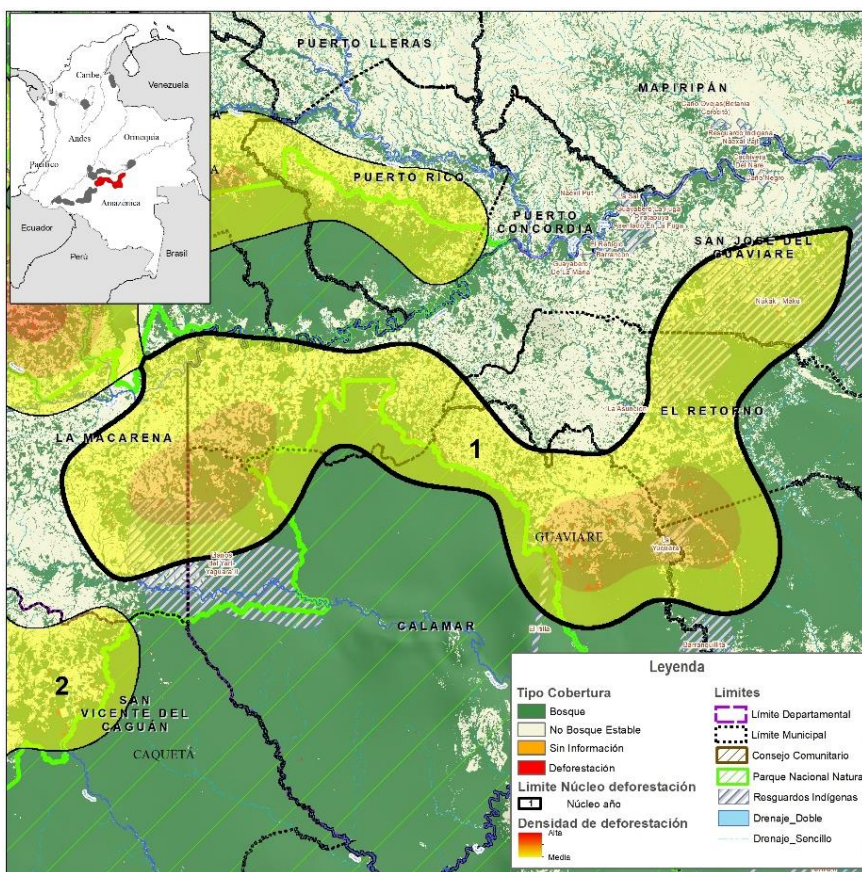


Figura 24. Núcleo de alta deforestación Guaviare (Marginal de la Selva) 2022.

La deforestación es causada principalmente por la praderización con fines de acaparamiento de tierras y para la expansión de prácticas ganaderas no sostenibles. Este proceso de transformación está fuertemente asociado con la expansión de infraestructura de transporte no planificada, que se interna hasta el extremo noroccidental del PNN Serranía de Chiribiquete, además de las conexiones con los ríos Caguán, Yarí y Orteguzaza. Adicionalmente, se identifican otros factores como la tala ilegal con fines de autoconsumo y comercio en diferentes escalas.

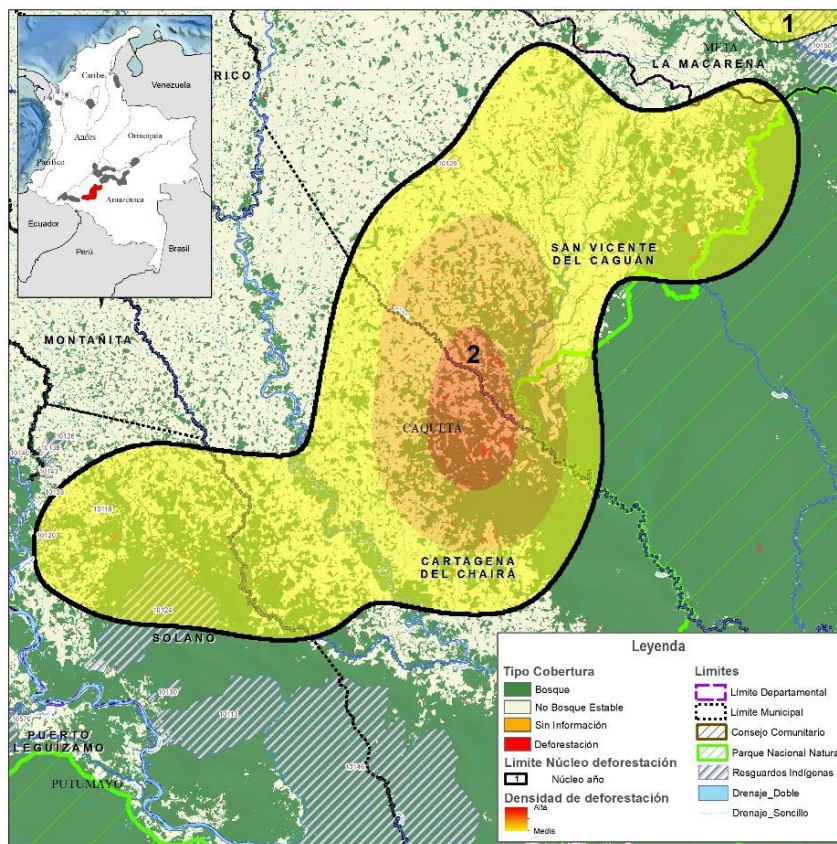


Figura 25. Núcleo de alta deforestación Sabanas del Yari-Caguán 2022.

3. Sur del Meta (9,2 %): Está localizado en mayor proporción en el departamento de Meta, en los municipios de La Macarena, Mesetas, Puerto Concordia, Puerto Lleras, Puerto Rico, Uribe y Vistahermosa. Un menor porcentaje del área del núcleo se ubica en el departamento del Guaviare, municipio de San José del Guaviare. Los ríos importantes de esta zona incluyen El Duda, Guayabero, Güejar, La Reserva (Rico), Leiva (Guaduas), Losada y Perdido. El NAD se encuentra en una alta proporción en áreas de los PNN Sierra de La Macarena, Tinigua y cordillera de Los Picachos, además del resguardo indígena La Julia (Figura 26).

La principal causa de deforestación son las prácticas insostenibles de ganadería extensiva y el acaparamiento de tierras a través de la praderización, incluso al interior de las áreas protegidas. Los cultivos de uso ilícito y la tala ilegal se consideran causas con menor impacto sobre el bosque, y se concentran en algunas áreas de los municipios de Vistahermosa, Puerto Rico y La Macarena. Todo lo anterior se encuentra dinamizado por la expansión de la infraestructura de transporte no planificada sobre los límites de los PNN presentes en el NAD y las trochas que los atraviesan de norte a sur.

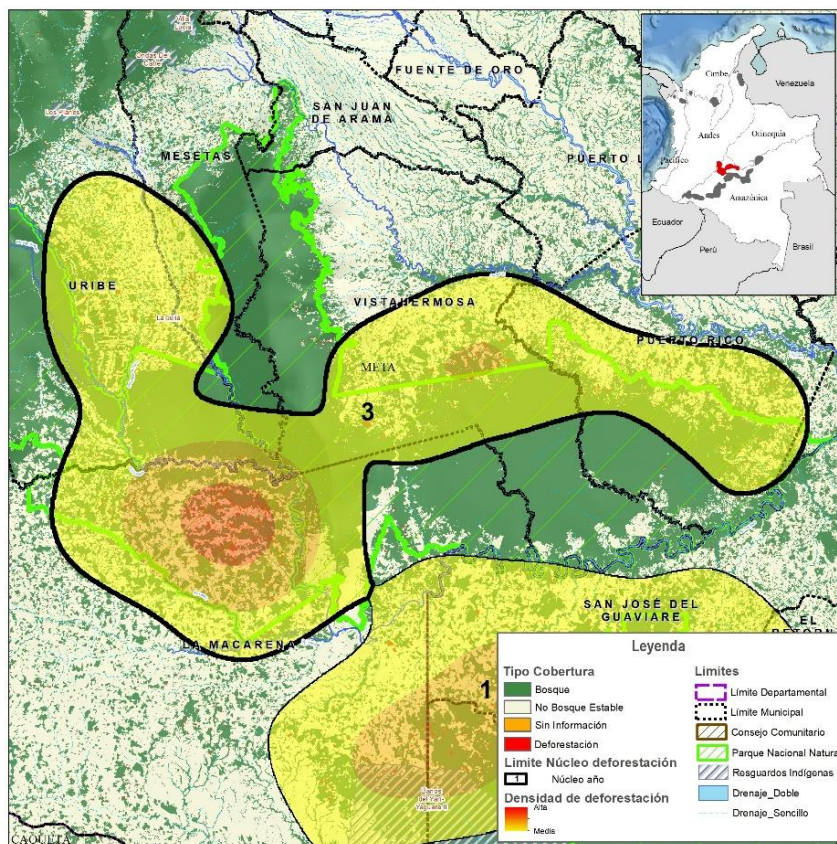


Figura 26. Núcleo de alta deforestación Sur del Meta 2022.

4. Putumayo (6,1 %): El núcleo se concentra en el departamento del Putumayo, en los municipios de Leguízamo, Mocoa, Orito, Puerto Asís, Puerto Caicedo, Puerto Guzmán y Villagarzón, e incluye una pequeña parte en el departamento de Cauca, al sur del municipio de Piamonte. En el departamento del Caquetá se encuentran áreas pertenecientes a los municipios de Curillo, San José del Fragua, Solano y Solita. Algunas pequeñas áreas del extremo noroccidental del PNN La Paya y del extremo suroriental del PNN Serranía de Los Churumbelos-Auka Wasi forman parte del NAD. Se destacan como ejes importantes de la transformación, los ríos Caquetá, Caquetá (Brazo Sardinas), Guineo, Mandur, Mecaya, Orito, Picudo, Putumayo, Sabilla, San Juan, Vides, Yurilla y Brazuelo Mangalpa. Dentro del núcleo se encuentran afectadas áreas de varios resguardos indígenas, con mayor relevancia del resguardo Villa Catalina de Puerto Rosario (Figura 27).

La pérdida de bosques es causada principalmente por la expansión de la frontera agropecuaria para la implementación de prácticas ganaderas extensivas no sostenibles, la praderización orientada al acaparamiento de tierras y los cultivos de uso ilícito sobre el curso de los ríos mencionados. Otras causas de menor relevancia son la tala ilegal para el autoconsumo y el comercio de madera en diferentes escalas, y la extracción ilícita de minerales en algunos de los ríos presentes. Estas actividades están dinamizadas por la

expansión de la infraestructura de transporte no planificada, especialmente sobre los límites occidental y norte del NAD.

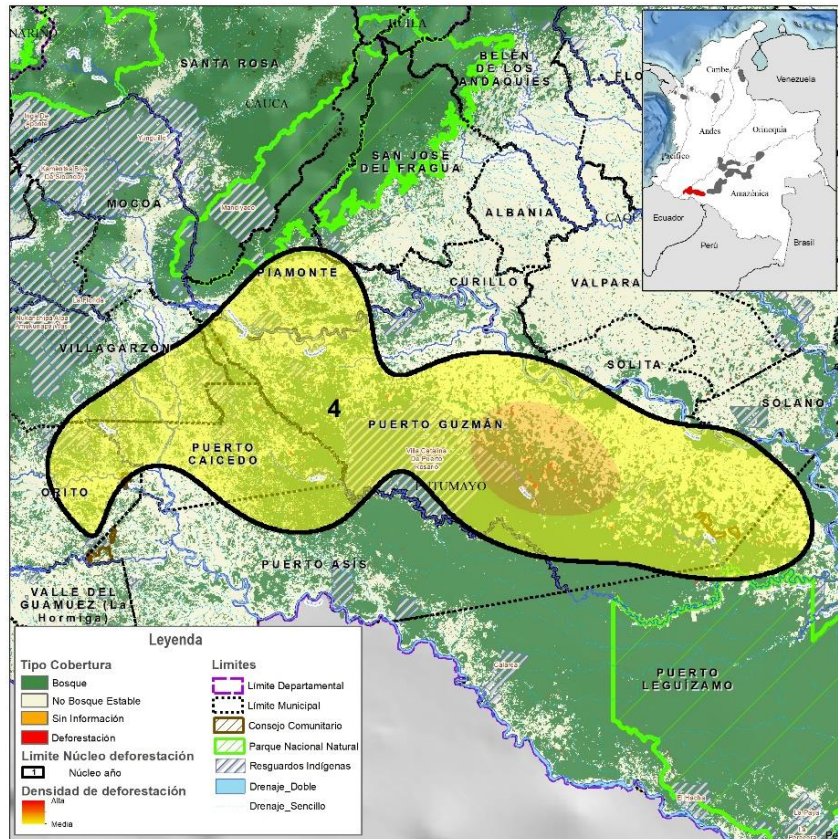


Figura 27. Núcleo de alta deforestación Putumayo 2022.

5. Andina Norte - Catatumbo (4,4%): Este núcleo se ubica en su totalidad en el departamento de Norte de Santander, e incluye áreas de los municipios de Tibú, Convención, Cúcuta, El Tarra, Sardinata y Teorama. En el extremo noroccidental se encuentra sobre áreas del PNN Catatumbo-Barí y parte de los resguardos indígenas Motilón-Barí y Gabarra-Catalaura. Dentro del núcleo se encuentran como ejes de transformación los ríos Catatumbo, Oro, Nuevo, Sardinata y Tibú (Figura 28).

A pesar de la contracción del mercado de la coca y de la caída en los precios, la expansión de los cultivos de uso ilícito continúa no solo generando impactos directos sobre las coberturas boscosas en el núcleo, sino también dinamizando el avance de las prácticas insostenibles de ganadería extensiva y agricultura en áreas no permitidas. A lo anterior se suma la tala ilegal, por la alta demanda de madera para uso en la actividad agropecuaria (tutores para cultivos, trapiches, cercas, guías, cajas) y la infraestructura de los socavones en las minas de carbón, así como la extracción ilícita de minerales en

algunos sectores del NAD. Estas actividades también se dinamizan por la expansión de la infraestructura de transporte no planificada en la zona rural.

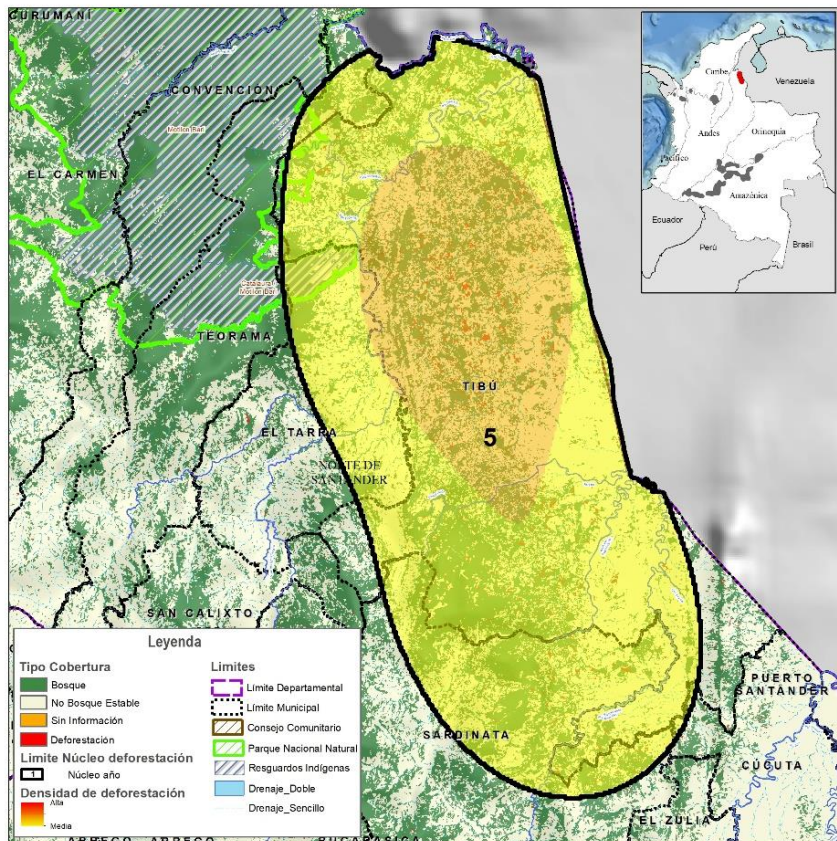


Figura 28. Núcleo de alta deforestación Andina Norte - Catatumbo.

6. Mapiripán (Meta) (4,0 %): Se ubica al oriente del municipio de Mapiripán y al suroriente de Puerto Gaitán (Meta), con una pequeña parte (extremo sur del núcleo) en el municipio de San José del Guaviare, sobre el margen del río Guaviare. Dentro de este núcleo se encuentran áreas de los resguardos indígenas Alto Unuma, Barranco Colorado, Caño Jabón y El Tigre, teniendo como principales afluentes los ríos Iteviare y Siare (Figura 29).

Corresponde a una zona en el límite entre el bioma amazónico y la Orinoquia, donde se consolidan presiones relacionadas con la praderización para el acaparamiento de tierras y la expansión de prácticas no sostenibles de ganadería extensiva. Estas actividades están altamente dinamizadas por el crecimiento reciente de la infraestructura de transporte no planificada. Los cultivos de uso ilícito presentan una tendencia de reducción, pero aún amenazan algunos bosques naturales en la zona.

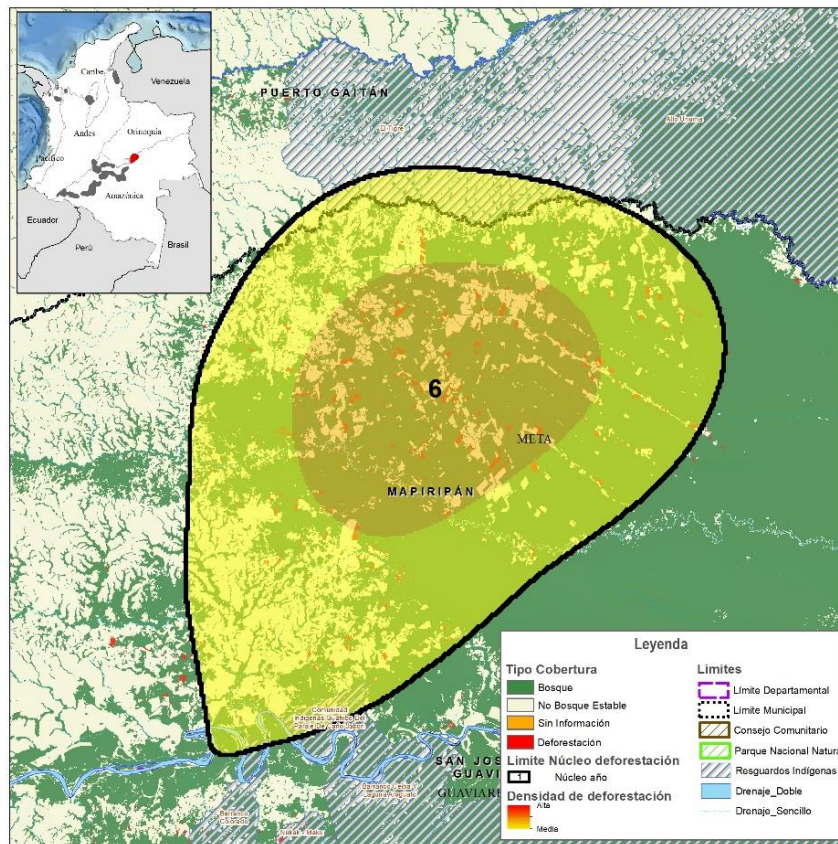


Figura 29. Núcleo de alta deforestación Mapiripán (Meta) 2022.

7. Andina Centro Norte - Nororiente de Antioquia/Sur de Bolívar (2,9 %): El núcleo se encuentra principalmente en el departamento de Antioquia (municipios de Amalfi, El Bagre, Remedios, Segovia, Vegachí y Zaragoza), y en menor proporción al sur del departamento de Bolívar (municipios de Cantagallo, Montecristo, San Pablo y Santa Rosa del Sur). Esta zona tiene como principales ejes de transformación los ríos Bagre, Ité, Pescador, Tamar y Tigüí. En el NAD se encuentran áreas de los resguardos indígenas Pablo Muera, El Noventa, Los Almendros, La Chinita y Tagual-La Po (Figura 30).

La extracción ilícita de oro a cielo abierto sobre el curso de los ríos presentes, así como la praderización con fines de acaparamiento de tierras y expansión de prácticas ganaderas no sostenibles (generalmente a partir de áreas previamente transformadas), representan las causas directas con mayor impacto sobre los bosques en el núcleo. La expansión de los cultivos de uso ilícito y la tala ilegal afectan la cobertura de bosque en áreas más reducidas y generan impactos más puntuales en el área del NAD.

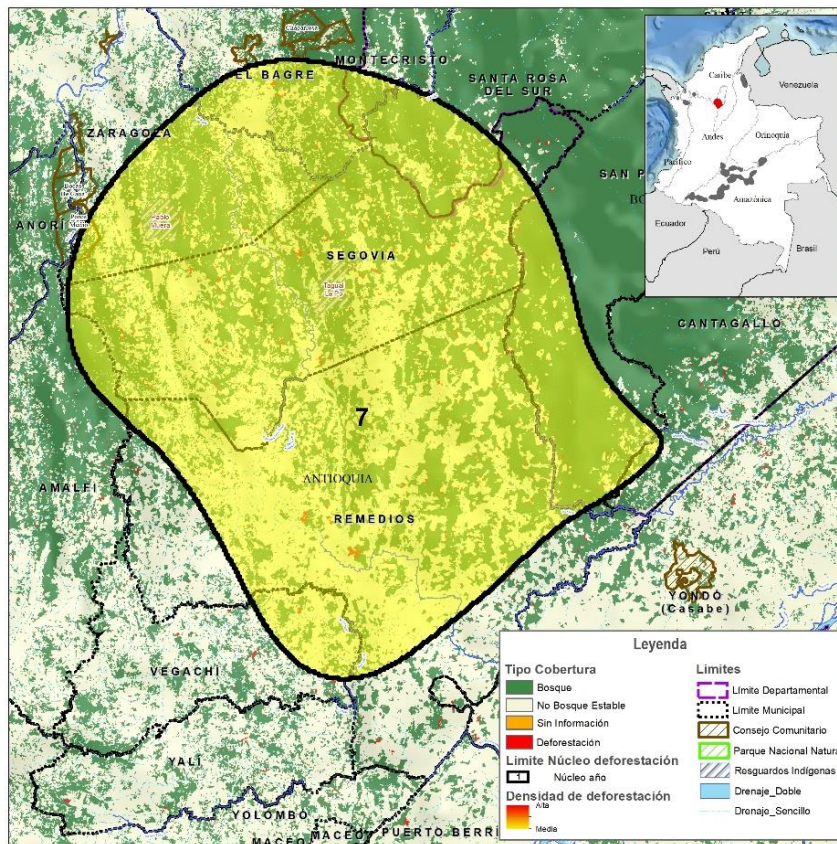


Figura 30. Núcleo de alta deforestación Andina Centro Norte - Nororiente de Antioquia/Sur de Bolívar 2022.

8. Pacífico Norte (2,4 %): Este núcleo está conformado por dos focos de concentración de la deforestación. El más grande se ubica principalmente en el departamento de Chocó, municipios de Carmen del Darién y Riosucio, y una pequeña porción en el municipio de Mutatá, Antioquia. Los afluentes que se encuentran en esta área son los ríos Antadía, Curvaradó, Jiguamiandó y Sucio. El extremo oriente se localiza sobre áreas de los resguardos indígenas Uradá Jiguamiandó, Chontadural Cañero, Pavarandó y Amparradó Medio. El segundo foco se encuentra ubicado en su totalidad en el municipio de Riosucio, Chocó. Tiene como eje de transformación el río Salaquí, y se identifican los resguardos indígenas Perancho y La Raya (Figura 31).

La deforestación en el núcleo es causada principalmente por la ampliación de la frontera agropecuaria (prácticas no sostenibles de ganadería extensiva y agricultura de diversas escalas en áreas no permitidas), a partir de áreas previamente transformadas. La tala ilegal para el comercio de maderas finas a gran escala también se considera una causa de deforestación relevante. En la zona se registra un incremento reciente de los cultivos de uso ilícito, con afectación de la cobertura boscosa. El desarrollo vial aún es incipiente, pero facilita el acceso de los agentes de deforestación a nuevas áreas de intervención.

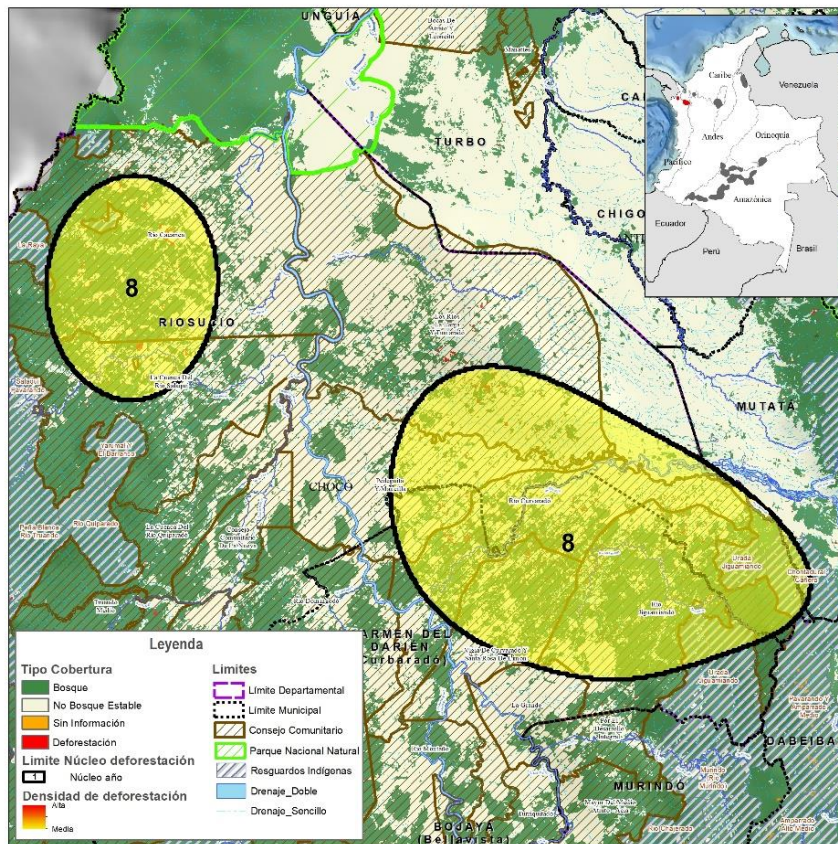


Figura 31. Núcleo de alta deforestación Pacífico Norte 2022.

9. Paramillo (0,6 %): Se localiza al sur del departamento de Córdoba, en el municipio de Tierralta, y está atravesado por los ríos Sinú, Esmeralda y Verde. Dentro de este núcleo se encuentran áreas de los resguardos indígenas Alto Sinú, Esmeralda Cruz Grande e Iwagado. El NAD incluye áreas importantes de la zona noroccidental del PNN Paramillo (Figura 32).

La expansión de la frontera agropecuaria es la principal causa de la deforestación en el núcleo, especialmente por el establecimiento de prácticas ganaderas no sostenibles, el crecimiento de los cultivos de uso ilícito sobre el límite noroccidental del PNN Paramillo y, en menor medida, la producción agrícola en áreas no permitidas. La extracción de madera (tala ilegal) se realiza con fines de autoconsumo, uso productivo y comercio de especies valiosas en diferentes escalas.

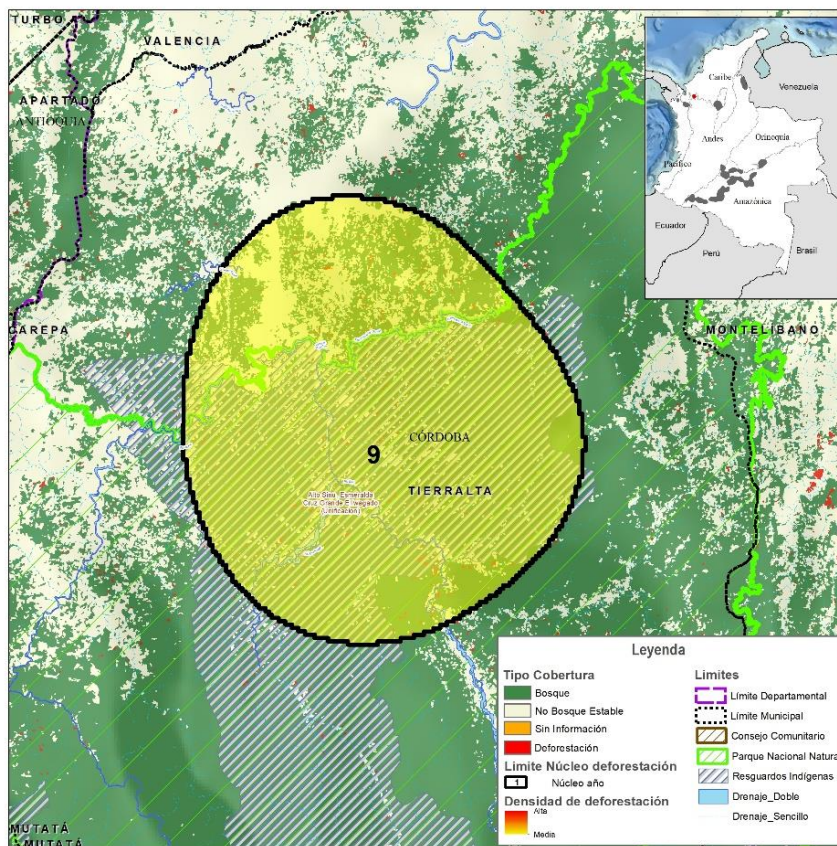


Figura 32. Núcleo de alta deforestación Paramillo 2022.

2.3.2 Análisis de la aceleración/desaceleración de la deforestación en Colombia 2022

El análisis de la aceleración y desaceleración de la deforestación compara la reducción o aumento del fenómeno en el territorio nacional para 2022, frente a lo observado en 2021 (Figura 33). Permite identificar patrones espaciales relacionados con la dinámica regional de crecimiento o contención de la deforestación, así como ofrecer elementos para analizar la necesidad de ajuste y la efectividad de las medidas y acciones implementadas en el territorio (Figura 34).

En general, la región de la Amazonia presenta una fuerte desaceleración en sus principales núcleos (sabanas del Yarí-Caguán, Guaviare-Marginal de la Selva, Sur del Meta y Mapiripán) y en los frentes de deforestación. El límite noroccidental del departamento del Putumayo constituye la principal excepción a esta tendencia regional, con áreas que presentan un comportamiento más concentrado hacia la aceleración de la deforestación.

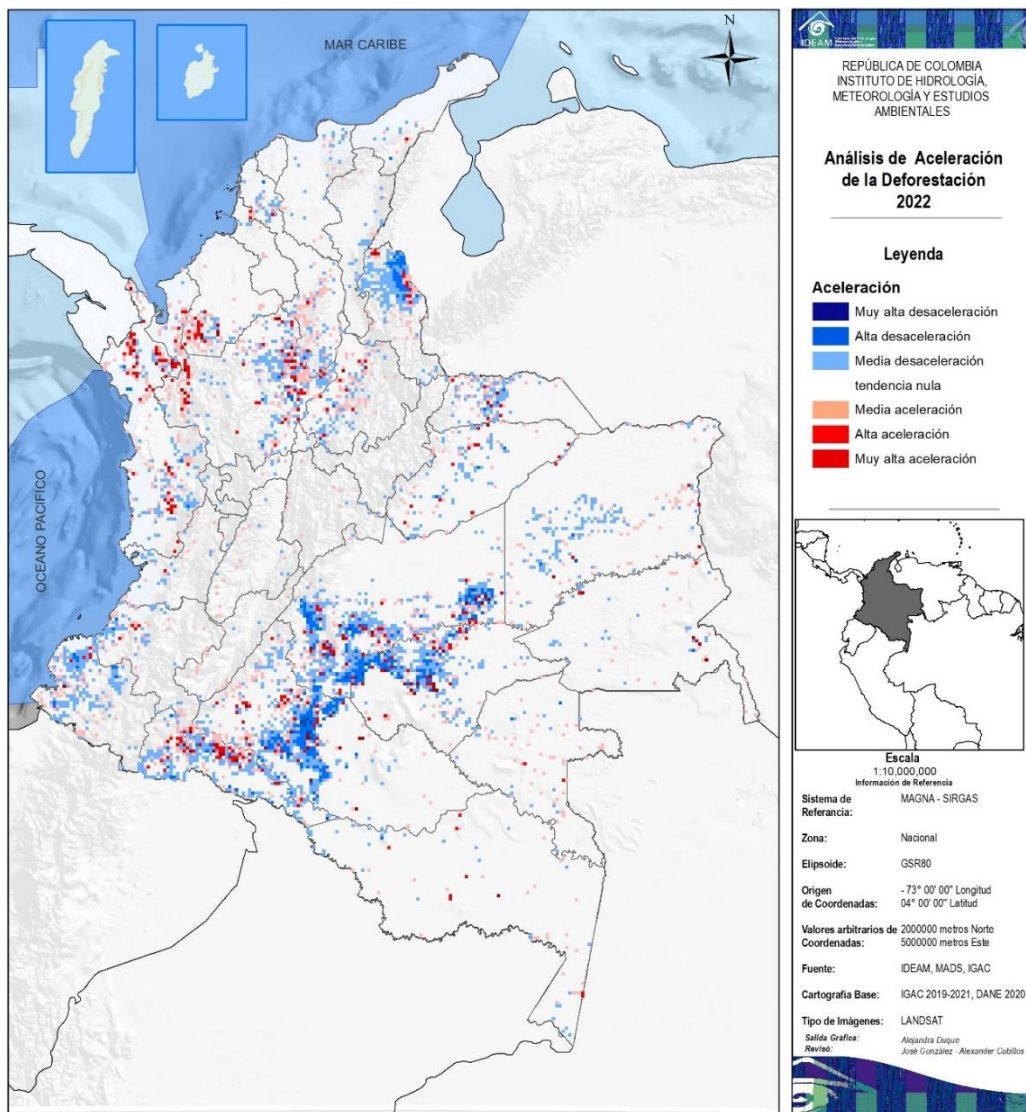


Figura 33. Análisis de aceleración de la deforestación 2022.

La Orinoquia presentó una tendencia general de desaceleración (Arauca y río Vichada). La región Andina también presentó una tendencia de desaceleración, principalmente en el núcleo Andina Norte-Catatumbo, así como en áreas mixtas con aceleración y desaceleración leve en el núcleo Andina Centro Norte-Nororiente de Antioquia/Sur de Bolívar.

Las regiones Caribe (límite noroccidental del PNN Paramillo) y Pacífico (norte y centro del departamento del Chocó) presentaron importantes áreas de aceleración, mientras que al sur del Pacífico (Nariño y Cauca) la tendencia fue la desaceleración. En parques nacionales naturales, resguardos indígenas y territorios colectivos de comunidades negras (TCCN), el comportamiento general fue de desaceleración de la deforestación frente a los resultados de 2021, pero con importantes excepciones en el PNN Paramillo, los resguardos Bajo Río Guainía y Alto Sinú, y TCCN ubicados al norte del departamento del Chocó.

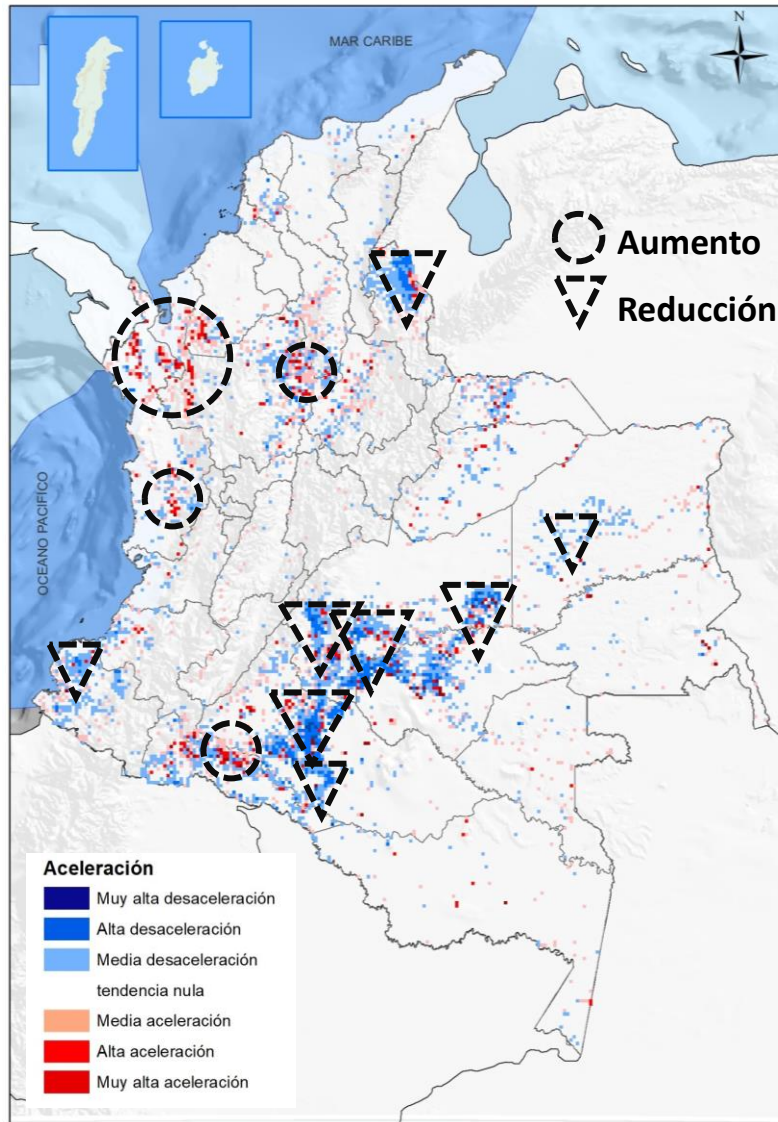


Figura 34. Zonas de aceleración y desaceleración de la deforestación 2022.

Entre los posibles factores que explican las áreas con mayor desaceleración durante 2022 están:

- Priorización de áreas donde se requiere una acción integral y articulada contra la deforestación.
- Acciones de contención de la deforestación con trabajo articulado entre instituciones y comunidades locales (acuerdos sociales, acuerdos de conservación, forestería comunitaria, entre otros).
- Expectativas a escala local por el cambio en la política de intervención del Estado para controlar la deforestación.
- Contracción del mercado de la coca y sus derivados (reducción del precio) en las principales zonas de producción.

- Inclusión de los temas ambientales, específicamente de reducción de la deforestación, en la agenda de los acercamientos e inicio de las negociaciones de paz total con grupos armados ilegales.
- Fortalecimiento normativo y operativo de las acciones contra delitos relacionados con deforestación (focalizado en los grandes financiadores y determinadores).
- Factores climáticos regionalizados (fenómeno de La Niña).

Entre los posibles factores que explican las áreas con mayor aceleración durante el periodo en cuestión están:

- Persistencia de actividades ilegales que generan deforestación (acaparamiento de tierras, cultivos de coca, extracción ilícita de minerales y madera).
- Acciones de grupos armados ilegales que fomentan o controlan directamente actividades que generan deforestación.
- Mercados informales de tierras, incluso al interior de reservas forestales, áreas protegidas, resguardos y territorios colectivos de comunidades negras.
- Incremento del hato ganadero en municipios que se encuentran en núcleos de alta deforestación.
- Incidencia de los incendios como eventos asociados a deforestación, principalmente en la región de la Amazonia, durante el primer trimestre del año.
- Migración de cultivadores de coca hacia otras actividades que generan deforestación, como la extracción ilícita de minerales y madera.

2.3.3 Monitoreo comunitario participativo de los bosques en Colombia

En Colombia, aproximadamente el 57 % de los bosques naturales se localiza en áreas de resguardos indígenas, territorios colectivos de comunidades negras y ZRC. Desde el SMBByC, se trabaja en la articulación de las acciones de monitoreo comunitario adelantadas por iniciativas locales con el monitoreo nacional a cargo del Ideam, con el fin de fortalecer el conocimiento sobre los bosques y la dinámica de la deforestación en el país, y con miras a la entrega de información consistente y oportuna para la toma de decisiones a escala nacional, regional y local.

Para 2022, se logró la identificación de 359 organizaciones comunitarias que avanzan en procesos de conservación y monitoreo comunitario de bosques y otros recursos naturales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

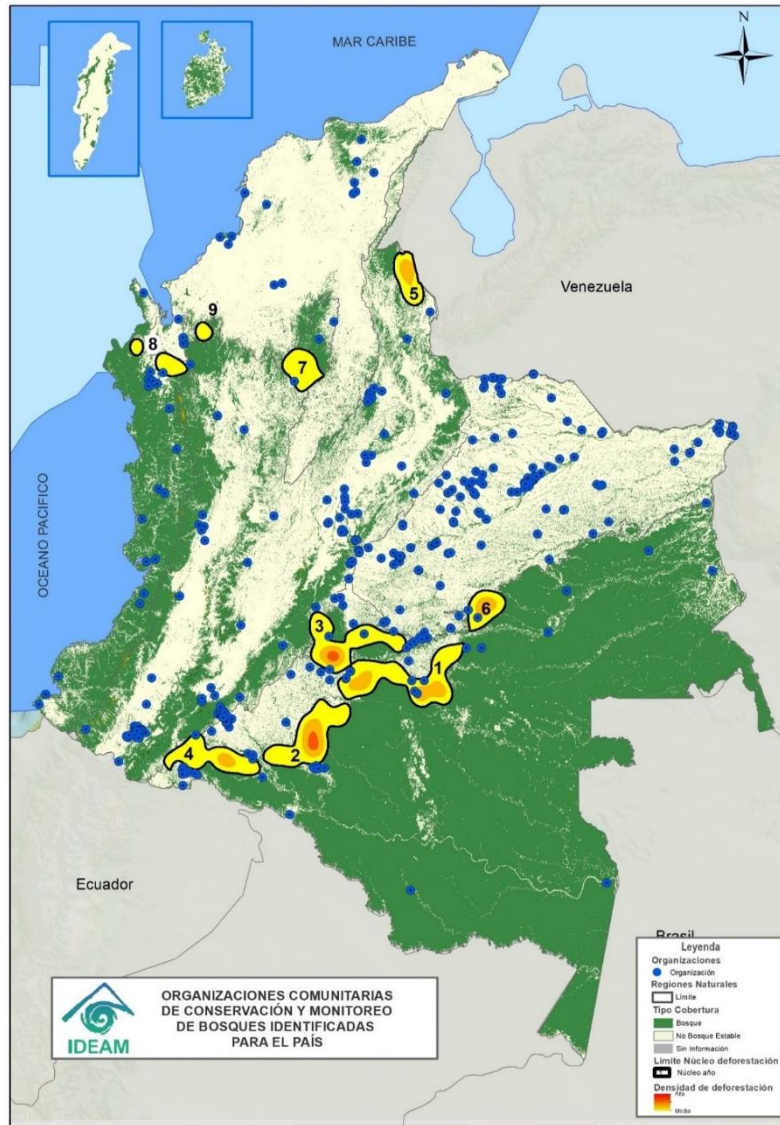


Figura 35. Diagnóstico de iniciativas comunitarias que desarrollan procesos de monitoreo local y su localización con respecto a los núcleos de alta deforestación de 2022 (Ideam, 2023).

En el marco del proceso de acompañamiento técnico que adelanta el SMByC del Ideam, durante 2022 se avanzó en la consolidación del documento de presentación de resultados en los seis pilotos de Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) articulado al SMByC, con organizaciones comunitarias localizadas en Chocó, Santander, Bolívar, Caquetá y Huila (biomas Andino, Amazónico y Pacífico).

Respecto a la articulación con actores comunitarios, el equipo del SMByC socializó los objetivos y actividades del monitoreo de los bosques a escala nacional, con diversos actores locales de la región de la Orinoquia. Igualmente, se acompañó el espacio comunitario de intercambio, efectuado en el marco del VI Seminario Anual de Monitoreo de la Cobertura

Forestal (junio de 2022), en el cual se abordaron las propuestas de las organizaciones comunitarias que realizan acciones de monitoreo relacionadas con el bosque, y que forman parte de la red de MCP articulada con el SMyC del Ideam y otros actores institucionales que apoyan el proceso.

3. ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN BOSQUES NATURALES⁶

En los últimos sesenta años, numerosas investigaciones tanto a escala nacional como internacional han generado información de ciencia sobre la distribución del almacenamiento del carbono en bosques tropicales (Asner *et al.*, 2012; Duque *et al.*, 2014; Gibbs *et al.*, 2007; Girardin *et al.*, 2013; Kitayama y Aiba 2002; Moser *et al.*, 2007; Sullivan *et al.*, 2017; Yepes *et al.*, 2015), así como su relación con parámetros meteorológicos que covarían con la altitud (p. ej.: temperatura, radiación solar, presión atmosférica, radiación UV-B) y otros factores climáticos (p. ej.: humedad, precipitación, estacionalidad) que responden a variaciones regionales o locales (p. ej.: orografía, vientos) (Körner, 2007).

Los inventarios forestales nacionales corresponden a la recolección sistemática de datos sobre los recursos forestales de un país, que permiten actualizar de manera periódica la información sobre el estado de sus recursos forestales, y garantizar una gestión forestal sostenible. Asimismo, los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN) pueden ser usados para estimar tanto las existencias de carbono y sus cambios en el tiempo como los factores de emisiones y absorciones.

En el marco de las decisiones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Colombia ha sometido y evaluado positivamente los Niveles de Referencia de Emisiones Forestales (NREF) para optar al mecanismo de pagos basados en resultados por efecto de la reducción de emisiones. Estos NREF incluyen el cálculo de los factores de emisión que corresponden a la estimación del almacenamiento y las reducciones de GEI asociadas a la conservación o transformación del bosque en Colombia, así como para calcular el potencial de mitigación de proyectos forestales relacionados, entre otros. Estos factores de emisión permiten presuponer el efecto que podrían tener las medidas de reducción de emisiones de GEI asociadas a la conservación del bosque natural en Colombia. El factor de emisión estima el almacenamiento de carbono por hectárea y las emisiones de GEI que se liberan por la deforestación de una hectárea, y se expresa en toneladas de CO₂ equivalente por hectárea (t CO₂ eq /ha).

3.1 Factores de emisión

El IFN de Colombia cuenta con un riguroso diseño del marco geoestadístico y una metodología estandarizada para la toma de datos en campo (Ideam, 2018; Olarte *et al.*, 2021). Inició su fase formal de campo en 2015, el cual se formalizó normativamente a través del Decreto 1655 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que lo define como la operación estadística que mediante procesos, metodologías, protocolos y herramientas, realiza la recopilación, almacenamiento, análisis y difusión de datos cuantitativos y cualitativos que permiten conocer el estado actual y la composición de los bosques del país y sus cambios en el tiempo.

⁶ Adaptado de MADS e Ideam, 2020.

Los factores de emisión se estimaron a partir de la información del avance en la implementación del IFN, calculando el almacenamiento de carbono para tres depósitos forestales: biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono orgánico en suelos, cuyas previsiones se obtienen a escala nacional y por biomas. En la Figura 36 se muestra la distribución de los 303 conglomerados levantados durante el periodo 2015-2018, a partir del marco geoestadístico del IFN⁷, correspondientes al 30 % de la muestra total, y que en la actualidad continúa en implementación.

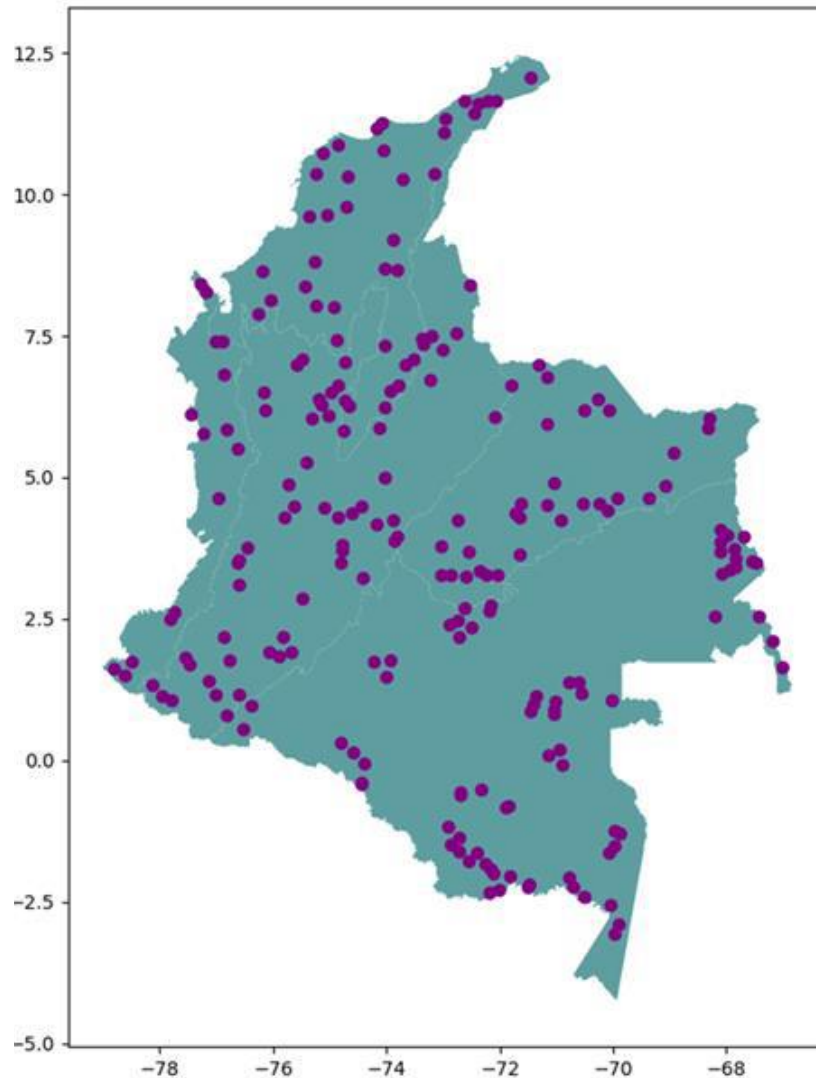


Figura 36. Distribución de conglomerados del IFN en Colombia (MADS e Ideam, 2020).

⁷ Es importante recalcar que estos factores de emisión son calculados con un porcentaje bajo de conglomerados del IFN, por lo cual se espera una actualización una vez se alcance un porcentaje significativo de implementación.

La biomasa aérea de cada individuo fue estimada empleando las ecuaciones alométricas propuestas por Chave *et al.* (2014), para árboles, helechos y palmas, como se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa aérea para árboles, palmas y helechos

Hábito	Ecuación alométrica	Fuente
Árboles	$AGB = 0,0673 * ((DAP^2) * H * WD)^{0,976}$	Chave <i>et al.</i> (2014)
Helechos	$AGB = -4266348 / (1 - (2792284 * \exp(-0,313677 * (H))))$	Tipeolo <i>et al.</i> (2002)
Palmas	$AGB = \exp(0,360 + (1,218 * \ln(H)))$	Sierra <i>et al.</i> (2007)

Fuente: MADS e Ideam (2020).

Donde: AGB = Biomasa aérea en kilogramos

WD = Densidad de madera

DAP = (cm)

H = Altura estimada (m)

Para estimar los contenidos de carbono orgánico en el suelo, se calcula la densidad aparente (g/cm^3), este valor representa la densidad promedio de todos los materiales presentes en suelo.

$$Densidad = \frac{Peso\ de\ masa\ seca\ de\ suelo\ (g)}{Volumen\ (cm^3)}$$

Como resultado, los contenidos de carbono en suelos se calculan a partir de la relación entre los resultados de la concentración de carbono en las muestras de suelo (obtenidas en el laboratorio), la densidad aparente del suelo y la profundidad hasta la cual se tomó la muestra.

$$C = Concentración \times (Densidad \times 100) \times Profundidad$$

Una vez se realizan las estimaciones a nivel de individuo, se agregan a nivel de conglomerado, y estos valores son extrapolados a hectárea (t/ha). Para el cálculo de la biomasa subterránea (raíces) se utiliza la ecuación propuesta por Cairns *et al.* (1997), como se muestra a continuación:

$$BRG = \exp(-1.085 + 0.9256 \log(AGB))$$

Donde BRG = Biomasa subterránea (t/ha)

AGB = Biomasa aérea (t/ha)

El IFN fue diseñado bajo un esquema posestratificado de muestreo sistemático y aleatorio, dado el marco geoestadístico establecido. Como estratos se emplearon la capa de superficie de bosque natural de 2017, producida por el SMyC, y la distribución de los biomas de Colombia. A partir de dichas fuentes, se estiman los pesos específicos de cada estrato, que corresponden a la proporción del área del país que ocupa cada estrato. Con esta información se calcula la biomasa total (BT), a partir de la suma de la biomasa aérea (BA) y la biomasa subterránea (BS) por hectárea para cada uno de los cinco biomas, que se convierte a valores de carbono contenido de la biomasa total (CBF) utilizando la fracción de carbono de la materia seca (f) sugerida por las directrices del IPCC (2006), según la siguiente ecuación:

$$CBF_i = f * BT_i$$

Donde: CBF_i = Carbono contenido de la biomasa total del bioma i

BT_i = Biomasa total del bioma i

f = Fracción de carbono de la materia seca (0,47)

Finalmente, el dióxido de carbono equivalente por hectárea (CBFeq) es el producto entre el CBF y la constante de la proporción molecular entre el carbono (C) y el dióxido de carbono (CO_2), igual a 44/12, según la siguiente ecuación:

$$CBFeq_i = CBF_i * (44/12)$$

La tabla 7 presenta los resultados de las estimaciones de carbono para los tres compartimientos de carbono a nivel de biomas para Colombia.

Tabla 7. Estimación de contenidos de carbono en la biomasa aérea (BA), biomasa subterránea (BS), carbono orgánico en suelos (COS), biomasa total (BT) y carbono en biomasa forestal (CBF) por bioma

Bioma	BA (t C/ha)	BS (t C/ha)	BT (t C/ha)	COS (t C/ha)	CBF (t C/ha)
Amazonia	121,19	26,78	147,97	73,76	221,73
Andes	72,21	16,41	88,62	124,65	213,27
Caribe	61,22	14,13	75,35	101,34	176,69
Orinoquia	40,22	9,82	50,05	64,51	114,56
Pacífico	65,91	15,06	80,98	92,49	173,47

Fuente: MADS e Ideam (2020).

3.2 Estimación de contenidos de carbono

El promedio de carbono almacenado en los bosques naturales en Colombia (BA, BS y COS) varió entre 114,56 t C/ha y 221,73 t C/ha, como se presenta en la Tabla 8. Estos resultados, combinados con los resultados de monitoreo de la superficie de natural para 2022, permiten estimar que el carbono almacenado en los bosques naturales de Colombia asciende a 12.491.444.923 t, es decir, los bosques en Colombia almacenan 45.801.964.717 t CO₂eq.

Tabla 8. Almacenamiento de carbono en bosques naturales de Colombia y a nivel de bioma

Bioma	CBF (t C/ha)	Superficie de bosque natural 2022 (ha)	Stock de carbono (t C eq)	Stock de carbono (t CO ₂ eq)
Amazonia	221,73	38.911.990	8.627.955.636	31.635.837.332
Andes	213,27	11.241.655	2.397.507.785	8.790.861.879
Caribe	176,69	1.617.477	285.791.927	1.047.903.731
Orinoquia	114,56	2.069.501	237.061.354	869.224.965
Pacífico	173,47	5.436.838	943.128.221	3.458.136.810
TOTAL		59.277.461	12.491.444.923	45.801.964.717

A escala regional, los estimados obtenidos permiten identificar que los biomas de la Amazonia y los Andes son las regiones que presentan las mayores reservas de carbono en bosques, con 8,7 petagramos y 2,4 petagramos, respectivamente. Asimismo, se evidencia que los biomas del Caribe y la Orinoquia son las regiones que presentan las menores reservas de carbono en bosques, con 1 petagramo y 0,9 petagramo, respectivamente, como se presenta en la tabla 8.

La estimación realizada en el presente estudio, empleando el nivel Tier 2, da cumplimiento a los requerimientos propuestos por el IPCC (2006), y se constituye como insumo de referencia para el desarrollo de proyectos de carbono forestal (p. ej.: proyectos REDD+) y el cálculo de emisiones de GEI derivadas del cambio en el uso de la tierra y de las prácticas silviculturales en el país (p. ej.: módulo USCUS).

3.3 Estimación de emisiones

Para la estimación de las emisiones de GEI se asume que todo el carbono contenido en el depósito de biomasa aérea y subterránea se emite el mismo año que ocurre el evento de deforestación. Para el caso de la estimación de las emisiones por deforestación del depósito de suelos, no se incluye la emisión de este compartimiento de carbono, ya que para esto se debe tener en cuenta la emisión progresiva del carbono en el suelo, que se da durante veinte años luego de ocurrido el evento de deforestación.

A partir de lo anterior, se calcularon las emisiones de CO₂ eq a escala nacional y por biomas en Colombia. Y de los resultados de monitoreo de la superficie deforestada para 2022, así como de los contenidos de carbono de la biomasa establecidos por el IFN, se estima que la emisión de GEI generada por la pérdida de bosques naturales en Colombia es de 53.841.129 t CO₂ eq, como se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Emisiones de GEI por deforestación en Colombia y a nivel de bioma

Bioma	CBF (t C/ha)	Superficie deforestada 2022 (ha)	Emisiones (t CO ₂ eq)
Amazonia	221,73	71.185	38.621.982
Andes	213,27	22.163	7.202.220
Caribe	176,69	10.483	2.896.229
Orinoquia	114,56	6.387	1.171.918
Pacífico	173,47	13.299	3.948.780
TOTAL		123.517	53.841.129

A escala regional, los estimados obtenidos permiten identificar que los biomas de la Amazonia y los Andes son los que presentan las mayores emisiones de GEI por deforestación, con 38,7 millones t CO₂ eq y 7,2 millones t CO₂ eq, respectivamente. Asimismo, se identifica que el bioma de la Orinoquia es la región que presenta la menor emisión de GEI, con 1,2 millones t CO₂ eq.

REFERENCIAS

- Asner, G. P., Clark, J. K., Mascaró, J., Galindo-García, G. A., Chadwick, K. D., Navarrete-Encinales, D. A., Páez-Acosta, G., Cabrera-Montenegro, E., Kennedy-Bowdoin, T., Duque, Á., Balaji, A., Hildebrand, P. von, Maatoug, L., Phillips-Bernal, J. F., Yepes-Quintero, A. P., Knapp, D. E., García-Dávila, M. C., Jacobson, J., & Ordóñez, M. F. (2012). High-resolution mapping of forest carbon stocks in the Colombian Amazon. *Biogeosciences*, 9(7), 2683-2696. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2683-2012>
- Canty, M. J., & Nielsen, A. A. (2007, October). Investigation of alternative iteration schemes for the IR-MAD algorithm. In *Image and Signal Processing for Remote Sensing XIII*. Vol. 6748 (pp. 62-71). SPIE.
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, et al. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob Chang Biol*; 20(10):3177-3190. doi:10.1111/gcb.12629.
- Cochran, W.G. (1977). *Sampling Techniques*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York. New York, USA. 417 p.
- Datos Abiertos. (2022). *Departamentos y municipios de Colombia*. <https://www.datos.gov.co/Mapas-Nacionales/Departamentos-y-municipios-de-Colombia/xdk5-pm3f>
- Duque, A., Feeley, K. J., Cabrera, E., Callejas, R., & Idárraga, A. (2014). The dangers of carbon-centric conservation for biodiversity: a case study in the Andes. *Tropical Conservation Science*, 7(2), 178-191. [http://tropicalconservationscience.mongabay.com/content/v7/TCS-2014-Vol7\(2\) 178-191-Duque et al.pdf](http://tropicalconservationscience.mongabay.com/content/v7/TCS-2014-Vol7(2) 178-191-Duque et al.pdf)
- Galindo, G., Espejo, O., Rubiano, J., Vergara, L., & Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. V 2.0. Ideam. http://www.ideam.gov.co/documents/11769/44688974/Protocolo+de+PDI+para+a+cuantificacion+de+la+deforestacion+en+colombia+v2_1_.pdf/00b95004-53dd-49f9-ab09-16d8803ccd92?version=1.0
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environ. Res. Lett.*, 2(4). doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045023
- Girardin, C. A. J., Farfán-Ríos, W., García, K., Feeley, K. J., Jergensen, P. M., Araujo, A., Cayola-Pérez, L., Seidel, R., Paniagua, N., Fuentes-Claros, A. F., Maldonado, C., Silman, M., Salinas, N., Reynel, C., Neill, D. A., Serrano, M., Caballero, C. J., La Torre Cuadros, M. de los A., Macía, M. J., Killeen T. J., & Malhi, Y. (2013). Spatial patterns of above-ground structure, biomass and composition in a network of six Andean elevations

- transects. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 1-13. doi: 10.1080/17550874.2013.820806
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IGES.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018). *Manual de Campo Inventario Forestal Nacional*. MADS.
- Kitayama, K., & Aiba, S. I. (2002). Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Ecology*, 90(1), 37-51. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00634.x>
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569-574. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [MADS e Ideam]. (2020). *Propuesta de nivel de referencia de las emisiones forestales por deforestación en Colombia para pago por resultados de REDD+ bajo la CMNUCC*. MADS - Ideam.
- Moser, G., Hertel, D., & Leuschner, C. (2007). Altitudinal change in LAI and stand leaf biomass in tropical montane forests: A transect study in Ecuador and a pan-tropical meta-analysis. *Ecosystems*, 10(6), 924-935. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9063-6>
- Olarte-Villanueva, C. P., Merchán-López, O. F., Linares-Prieto, R., Quintero-Cardozo, F., León-Cruz, R., Rodríguez-León, A. y Montealegre, J. O. (2021). *Marco rector para la implementación del Inventario Forestal Nacional*. Ideam.
- Olofsson, P., Foody, G., Herold, M., Stehman, S., & Woodcock, C. (2013). Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129, 122-131. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.031
- Olofsson, P., Foody, G., Herold, M., Stehman, S., Woodcock, C., & Wulder, M. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.015
- Olthof, I., Pouliot, D., Fernandes, R., & Latifovic, R. (2005). Landsat-7 ETM+ radiometric normalization comparison for northern mapping applications. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 388-398. doi: 10.1016/j.rse.2004.06.024
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Principales resultados*. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>

- Panel Científico por la Amazonía -PCA. 2021. Informe de evaluación sobre la Amazonía 2021. Capítulo 6 En Resumen. Ciclos Biogeoquímicos en la Amazonia. Yadvinder Malhia, John Melack, Luciana V. Gatti, Jean Ometto, Jürgen Kesselmeier, Stefan Wolff, Luiz E.O. Aragão, Marcos Costa, Scott Saleska, Sunitha R. Pangala, Luana S. Basso, Luciana Rizzo, Alessandro C. de Araújo, Natalia Restrepo-Coupe (eds.) Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, Nueva York, EE. UU. 13 páginas.
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, I., & Justice, C. (2012). Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 106-116. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.027
- Stehman, S. (2012). Impact of sample size allocation when using stratified random sampling to estimate accuracy and area of land-cover change. *Remote Sensing Letters* 3(2), 111-120. doi: 10.1080/01431161.2010.541950
- Sullivan, M. J., Talbot, J., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., Begne, S. K., Chave, J., Cuni-Sanchez, A., Hubau, W., Lopez-Gonzalez, G., Miles, L., Monteagudo-Mendoza, A., Sonké, B., Sunderland, T., Steege, H. ter, White, L. J. T., Affum-Baffoe, K., Aiba, S., Cristo de Almeida, E., & Zemagho, L. (2017). Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific Reports*, 7(1), 39102. <http://dx.doi.org/10.1038/srep39102>
- Yepes, A., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., Duque, Á., Barbosa, A., Olarte, C. y Cardona, M. (2015). Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 69-82. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442015000100007&lng=en&tlng=es