



GEOPROCESO PARA LA ESTIMACIÓN DE VALORES DE REFERENCIA DE FUENTES DE CARBONO Y SU VALORACIÓN ECONÓMICA

**Autoridad nacional de Licencias Ambientales
– ANLA**

Actualizó:

Jorge Gualdrón Duarte
Profesional técnico
Grupo de Instrumentos SIPTA
jgualdron@anla.gov.co

Fader Peña Martín
Profesional técnico
Grupo de Instrumentos SIPTA
fpena@anla.gov.co

Revisó:

Guillermo Villamil Mora
Líder grupo
Evaluación y Valoración de Impactos
Grupo de Instrumentos SIPTA
gvillamil@anla.gov.co

Olga Helena Devia Cañar
Coordinadora
Grupo de Instrumentos SIPTA
odevia@anla.gov.co

Lorena Pérez Gutiérrez
Líder Jurídico SIPTA
nlperez@anla.gov.co

Aprobó:

Tomas Restrepo Rodríguez
Subdirector
Subdirección de Instrumentos, Permisos y
Trámites Ambientales (SIPTA)
trestrepo@anla.gov.co



FECHA: 15/NOV/2025

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVO	9
3. ALCANCE	9
4. DEFINICIONES	9
5. NORMATIVA	10
6. DESARROLLO	11
6.1. Sección 1: Sumideros de gases efecto invernadero (GEI)	11
6.2. Sistemas de Información Geográfica en la medición de carbono	14
6.3. Selección de fuentes de información para el geoproceso	17
6.4. Geoproceso para determinar el almacenamiento de carbono	18
6.5. Sección 4: Valoración económica del almacenamiento de carbono	38
6.6. Sección 5: Escenario de Aplicación Hipotético del Instrumento en el contexto del proceso de Licenciamiento Ambiental.	39
6.7. Datos referentes de carbono almacenado por coberturas de la tierra y subcuencas hidrográficas en Colombia	41
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Secciones del instrumento geoproceso: valores de referencia de fuentes de carbono almacenado y su valoración económica para el licenciamiento ambiental.	8
Ilustración 2. Principales fuentes de emisión/absorciones de gases de efecto invernadero y procesos en ecosistemas gestionados.	12
Ilustración 3. Sumideros terrestres de almacenamiento de carbono.	13
Ilustración 4. Fuentes de información espacial para el geoproceso.	17
Ilustración 5. Etapas para el desarrollo del geoproceso de almacenamiento de carbono .	20
Ilustración 6. Diagrama del desarrollo del geoproceso de carbono.	23
Ilustración 7. Descargue del archivo de geoproceso del portal ANLA (imagen modelo).	25
Ilustración 8. Pantalla principal plataforma SIG QGIS.	26
Ilustración 9. Pasos iniciales 1-4 para correr el geoproceso de almacenamiento de carbono.	27
Ilustración 10. Pasos iniciales 5-7 para correr el geoproceso de almacenamiento de carbono.	28
Ilustración 11. Pasos iniciales 8-11 para correr el geoproceso de almacenamiento de carbono.	29
Ilustración 12. Pasos iniciales 1 a 5 para instalar el plugin del geoproceso de carbono.	31
Ilustración 13. Pasos 7 a 9 para instalar el plugin del geoproceso de carbono.	32
Ilustración 14. Pasos 10 a 11 para instalar el plugin del geoproceso de carbono.	33
Ilustración 15. Pasos 12 a 14 para instalar el plugin del geoproceso de carbono.	34
Ilustración 16. Ejemplo del cuadro de resultado del geoproceso (formato Excel).	35
Ilustración 17. Ejemplo del cálculo de valor económico del carbono almacenado transformado a tCO ₂ eq.	40

Índice de tablas

Tabla 1. Normatividad ambiental asociada al instrumento del geoproceso de carbono almacenado y su valoración económica.	10
Tabla 2. Potencial de Calentamiento Global de gases de efecto invernadero comparado al CO ₂	12
Tabla 3. Fuentes geoespaciales de sumideros de carbono usadas para el geoproceso.	19
Tabla 4. Pasos principales de la Etapa 3. Análisis espacial.	21
Tabla 5. Clasificación de los rangos porcentuales de incertidumbre.	36
Tabla 6. Tabla de salida del geoproceso que muestra datos biofísicos y monetarios del contenido de carbono.	41

SIGLAS

AFOLU	Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra (siglas en ingles)
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
BA	Biomasa aérea
C	Carbono
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CERs	Certificados de Reducción de Emisiones
CH ₄	Metano
CLC	Corine Land Cover
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
COS	Carbono Orgánico en Suelo
CORSIA	Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional
DIAN	Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GEI	Gases Efecto Invernadero
IC	Impuesto al carbono
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (siglas en ingles)
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MCOS	Mapa de Stock Carbono Orgánico de Suelo
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés)
NDC	Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (siglas en ingles)
NIR	Reporte Nacional de Inventario
N ₂ O	Óxido nítrico
POA	Proyectos, obras o actividades
SCE	Sistemas de Comercio de Emisiones
SELA	Subdirección de Evaluación y Licencias Ambientales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SSLA	Subdirección de Seguimiento de Licencias Ambientales
VCUs	Utiliza Unidades de Carbono Voluntarias
VEA	Valoración económica ambiental

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas cumplen un papel esencial en la regulación del clima global, al absorber y almacenar gases de efecto invernadero (en adelante, GEI), como el dióxido de carbono (CO_2) desde la atmósfera. Este proceso, reconocido como un **servicio ecosistémico de regulación climática**, contribuye a mitigar el cambio climático al evitar que dichos gases se acumulen en la atmósfera (Lal, 2002; Natural Capital Project, s.f.). Los bosques cubren más de 4.100 millones de hectáreas y actúan como los principales sumideros terrestres de carbono, absorbiendo grandes volúmenes de CO_2 . Su función es decisiva dentro del ciclo global del carbono y en la mitigación del cambio climático (Hisano, Searle, & Chen, 2018)

A nivel terrestre, los principales sumideros de carbono se localizan en: 1) la biomasa aérea, 2) la biomasa subterránea, 3) el suelo y 4) la hojarasca o materia orgánica en descomposición. La biomasa vegetal, tanto aérea como subterránea, constituye un componente clave en la captura y almacenamiento de CO_2 atmosférico (IPCC, 2006).

De acuerdo con el Instrumento de *Estandarización y Jerarquización de Impactos ambientales* (2025), la alteración de coberturas vegetales se identifica como uno de los impactos más frecuentes en proyectos, obras y actividades (en adelante, POA) sujetos a licenciamiento ambiental. Este impacto afecta de manera directa el servicio ecosistémico de regulación climática, cuya función principal es equilibrar los flujos de GEI responsables del calentamiento global.

En términos generales, los GEI de mayor interés para la gestión climática son el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4), cada uno con un potencial de calentamiento global distinto. Para su medición, se utiliza el CO_2 como gas de referencia, expresando las emisiones en dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq).

El calentamiento global, impulsado por el incremento de emisiones de GEI asociadas a actividades humanas, genera consecuencias tales como el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, desastres naturales y degradación acelerada de ecosistemas, lo que repercute de manera directa en el bienestar social de las comunidades (Bagolle et al., 2023).

En este contexto, y dada la relevancia del servicio ecosistémico de regulación climática, resulta fundamental contar con herramientas que permitan cuantificar y valorar económicamente el carbono almacenado en los sumideros terrestres.

Los mercados de carbono son mecanismos donde se comercializan unidades equivalentes a reducciones o absorciones de GEI, cuyo propósito es incentivar acciones de mitigación del cambio climático. Estas unidades pueden corresponder a cupos transables de emisión o Certificados de Reducción de Emisiones (CERs), los cuales se intercambian entre entidades, gobiernos o empresas, ya sea bajo marcos normativos específicos o en esquemas voluntarios. La clasificación de estos mercados depende, principalmente, de si su participación obedece a obligaciones legales o a iniciativas voluntarias.

De manera general, los mercados de carbono se pueden clasificar en dos sistemas (Minambiente, 2020), a saber:

- ➔ **Mercado regulado:** Basado en Certificados de Reducción de Emisiones (CERs). Surgió como mecanismo para dar cumplimiento a metas obligatorias de reducción de emisiones a nivel internacional, nacional o subnacional. Incluye los mecanismos creados bajo el Protocolo de Kioto, como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y la Implementación Conjunta (JI), así como los establecidos en el Acuerdo de París mediante su artículo 6, que habilita la cooperación internacional y la creación de mercados administrados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). También abarca los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE) y programas sectoriales como el Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA), diseñada para compensar las emisiones de CO₂ de la aviación internacional.
- ➔ **Mercado voluntario:** Utiliza Unidades de Carbono Voluntarias (VCUs) y permite que entidades públicas, privadas o sin ánimo de lucro compensen sus emisiones sin estar obligadas por la ley. Su motivación principal se vincula con la responsabilidad social empresarial, la diferenciación de productos y la mejora de la imagen corporativa. En este mercado, las reducciones o absorciones de GEI deben ser certificadas bajo estándares internacionales como VERRA o Gold Standard, garantizando que los resultados sean reales, adicionales, medibles y verificables.

Si bien ambos mercados difieren en su naturaleza y regulación, pueden complementarse para ampliar el alcance y la efectividad de las acciones de mitigación.

En Colombia, como parte de las estrategias nacionales de reducción de emisiones, se estableció el **impuesto al carbono** mediante artículo 221 de la Ley 1819 de 2016. Este tributo aplica en la primera etapa de la cadena de suministro, sobre la venta, importación o autoconsumo de combustibles fósiles gravados. El valor del impuesto se actualiza anualmente por la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) mediante resolución.

A la par con el impuesto al carbono se creó el **Mecanismo de No Causación del Impuesto al Carbono**, el cual se reglamentó en el artículo 1.5.5.3. el Decreto 926 de 2017. Consiste en permitir a los contribuyentes eximirse del pago del impuesto al carbono, siempre que demuestren que las emisiones de CO₂eq (Dióxido de Carbono Equivalente) generadas por el combustible fósil que consumen han sido compensadas a través de la adquisición y cancelación de Certificados de Reducción de Emisiones (CERs).

La compensación se realiza por medio de la adquisición de certificados de reducción de emisiones o remociones de GEI que cumplan con las características necesarias y en la cantidad correspondiente a las emisiones de GEI proyectadas por los combustibles a vender, importar o consumir.

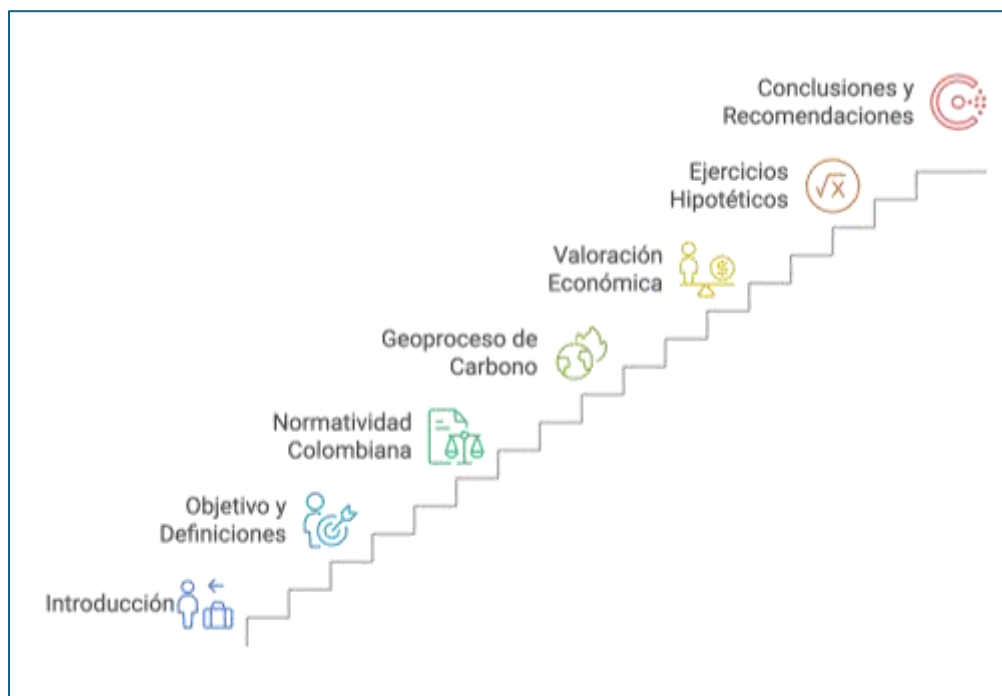
En coherencia con la normativa vigente, este manual adopta como referencia el valor oficial del impuesto al carbono para la estimación económica del carbono almacenado en biomasa aérea, subterránea y en el suelo.

De acuerdo con lo anterior, este manual presenta una herramienta basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permite estimar el carbono almacenado en biomasa aérea, biomasa subterránea y suelo en un área de interés. Además, incluye una matriz con valores referencia promedio de carbono (disponible en los anexos de este documento), elaborada para coberturas Corine Land Cover (CLC) en Colombia, organizadas por subzonas hidrográficas, que pueden emplearse para la cuantificación del carbono.

Es importante señalar que, debido a la disponibilidad de información y a las características de los modelos empleados, existen limitaciones técnicas que deben considerarse. Entre ellas se incluyen: la necesidad de ajustar los factores de almacenamiento de carbono a escalas locales, la simplificación de los flujos de

carbono y el supuesto de linealidad temporal en su almacenamiento. Estos aspectos, junto con el grado de incertidumbre de los resultados, deben ser evaluados cuidadosamente por los usuarios al aplicar el instrumento (Ilustración 1).

Ilustración 1. Secciones del instrumento geoproceso: valores de referencia de fuentes de carbono almacenado y su valoración económica para el licenciamiento ambiental.



Fuente: ANLA, 2025

El documento se organiza en siete secciones, como se presenta en la Ilustración 1. La primera sección corresponde a la introducción general. Las secciones segunda, tercera y cuarta exponen el objetivo general, el alcance y las principales definiciones. La quinta sección recopila la normatividad colombiana en materia de cambio climático. La sexta sección desarrolla el geoproceso para la medición y valoración del carbono terrestre, dividido en seis apartados: 1) conceptos generales de cambio climático, 2) sistemas de información geográfica en la medición de carbono, 3) geoproceso para determinar almacenamiento de carbono, 4) valoración económica del carbono, 5) escenario hipotético para el desarrollo del geoproceso y 6) datos de referencia de almacenamiento de carbono en subzonas hidrográficas por coberturas de la tierra. Por último, la séptima sección presenta conclusiones y recomendaciones.

2. OBJETIVO

Desarrollar una herramienta basada en sistemas de información geográfica para estimar el carbono almacenado en biomasa aérea, subterránea y en el suelo, y calcular su valor económico.

3. ALCANCE

El presente manual se concibe como una herramienta técnica de apoyo en los procesos de licenciamiento ambiental de proyectos, obras o actividades, tanto en la etapa de evaluación como en la de seguimiento. Su uso, de carácter no vinculante, está orientado principalmente a solicitantes y titulares de licencias ambientales, así como a autoridades ambientales de orden nacional, regional y local. Asimismo, puede ser consultado por otros actores, como organizaciones de la sociedad civil o instituciones académicas, con fines de investigación, formación o gestión ambiental.

4. DEFINICIONES

Cambio climático: Variación del clima identificable en sus promedios o variabilidad, causada por procesos naturales o actividades humanas, que persiste durante décadas o más (Minambiente, 2017).

Comunicación nacional de cambio climático: Mecanismo de reporte de la CMNUCC para mostrar avances en mitigación, adaptación y educación, y servir como fuente técnica para decisiones sobre impactos del cambio climático (IDEAM, 2017).

Dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.): Gas natural y subproducto de combustión y procesos industriales, usado como referencia para medir otros GEI, con potencial de calentamiento global igual a 1 (Minambiente, s.f.).

Gases de Efecto Invernadero – GEI: Gases naturales o antropogénicos que absorben y emiten radiación. Incluyen CO₂, N₂O, CH₄, HFC, PFC y SF₆ (Ley 1931, 2018).

Servicios ecosistémicos: Beneficios directos o indirectos de los ecosistemas, como aprovisionamiento, regulación, soporte y servicios culturales no materiales (Minambiente, 2012).

Sumideros: Procesos o mecanismos que absorben GEI, aerosoles o precursores de la atmósfera (Minambiente, 2017).

5. NORMATIVA

La principal normatividad ambiental colombiana asociada a este instrumento se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Normatividad ambiental asociada al instrumento del geoproceso de carbono almacenado y su valoración económica.

Norma	Entidad	Objeto
Ley 99 de 1993	Rama Legislativa	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1076 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.
Resolución 1669 de 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se adoptan los Criterios Técnico para el Uso de Herramientas Económicas en los proyectos, obras o actividades objeto de Licencia Ambiental o Instrumento Equivalente y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 1931 de 2018	Rama Legislativa	Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático.
Resolución 1402 de 2018	Ministerio de Ambiente y	Por la cual se adopta la Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales.

Norma	Entidad	Objeto
	Desarrollo Sostenible	
Resolución 1084 de 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se establecen metodologías de valoración de costos económicos del deterioro y de la conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se dictan otras disposiciones.
Resolución 849 de 2022	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por medio de la cual se establece la Guía para la formulación e implementación de los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales – PIGCCT.

Fuente: ANLA, 2025

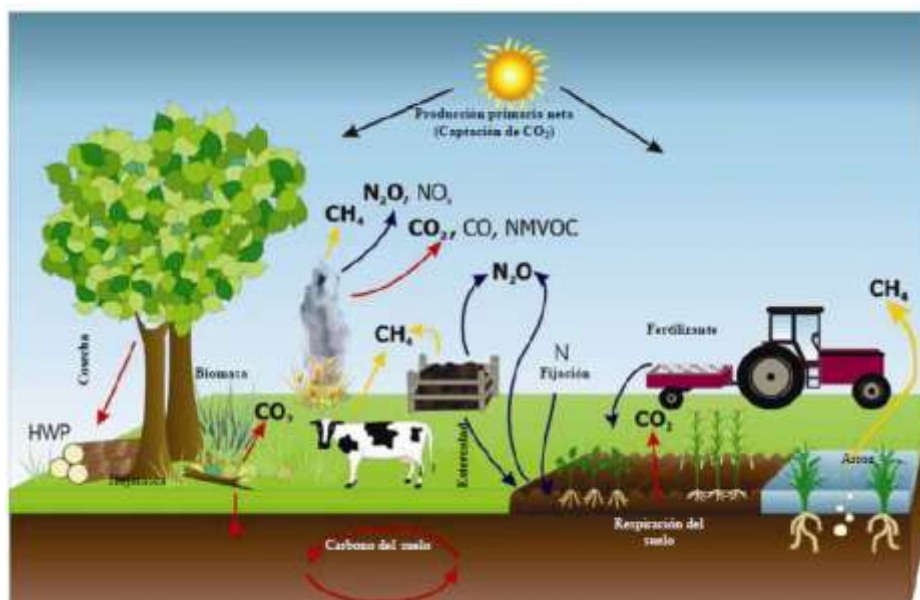
6. DESARROLLO

6.1. Sección 1: Sumideros de gases efecto invernadero (GEI)

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del aprovechamiento forestal y del cambio de uso del suelo incrementan la radiación infrarroja retenida en la atmósfera. La remoción o degradación de coberturas vegetales no solo libera el carbono previamente almacenado, sino que también reduce la capacidad de captura de CO₂.

En los ecosistemas terrestres, la fotosíntesis es el principal mecanismo de captación de CO₂, mientras que su liberación se produce a través de la respiración, descomposición, combustión de materia orgánica, procesos de nitrificación/desnitrificación y fermentación entérica (IPCC, 2006). La Ilustración 2 muestra las principales fuentes de emisión y absorción de GEI, según las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

Ilustración 2. Principales fuentes de emisión/absorciones de gases de efecto invernadero y procesos en ecosistemas gestionados.



Fuente: (IPCC, 2006)

Los GEI de mayor relevancia son: dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4), cada uno con diferente potencial de calentamiento global. El CO_2 se emplea como referencia para expresar las emisiones en dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq) (Tabla 2).

Tabla 2. Potencial de Calentamiento Global de gases de efecto invernadero comparado al CO_2 .

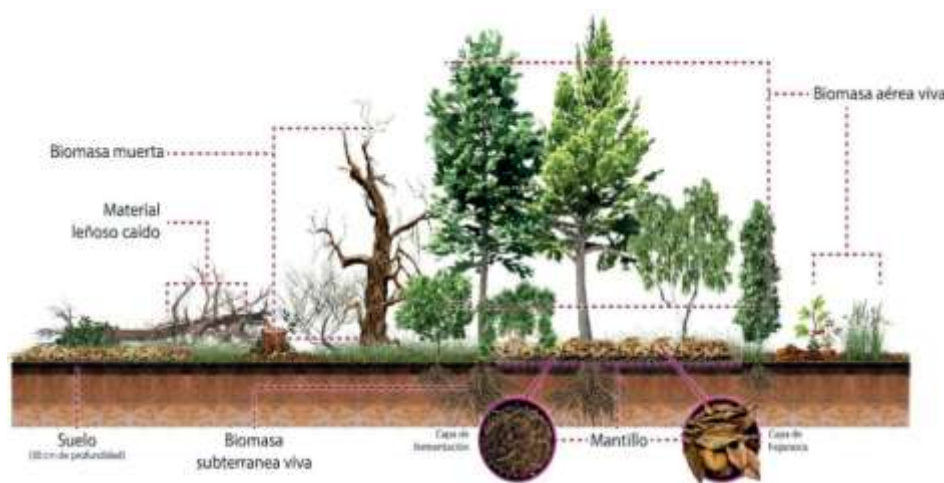
Gas Efecto Invernadero	Potencial de Calentamiento Global
Dióxido de carbono (CO_2)	1
Metano CH_4	25
Óxido nitroso (N_2O)	310

Fuente: Segundo informe de evaluación del IPCC, 1995 (AR2).

En los ecosistemas terrestres, los principales sumideros o depósitos de carbono se localizan en la biomasa aérea y subterránea de la vegetación, en la materia orgánica muerta y en los suelos. La biomasa vegetal, que incluye tanto componentes aéreos como subterráneos, cumple un papel esencial en la captura y almacenamiento de CO₂ atmosférico (IPCC, 2006). Esta comprende vegetación leñosa y herbácea, e incluye tallos, ramas, corteza, hojas, semillas y cepas. La biomasa subterránea está compuesta por raíces vivas con un diámetro mayor a 2 mm.

En la Ilustración 3 se ejemplifican los diferentes depósitos terrestres de almacenamiento de carbono.

Ilustración 3. Sumideros terrestres de almacenamiento de carbono.



Fuente: Casiano-Domínguez, M. 2018

La materia orgánica muerta, constituida por hojarasca y madera leñosa no viva (en pie o caída) con diámetros entre 2 mm y 10 cm, presenta tiempos de descomposición variables que pueden ir de meses hasta décadas, dependiendo del uso del suelo y su combinación con otros detritos.

Finalmente, la materia orgánica del suelo, que comprende el carbono orgánico presente en suelos minerales y las raíces finas (<2 mm), constituye el sumidero de carbono más importante a nivel terrestre. Los suelos representan el mayor reservorio de carbono orgánico del planeta, lo que hace relevante su cuantificación y monitoreo (Jackson et al., 2017).

6.2. Sistemas de Información Geográfica en la medición de carbono

Una metodología efectiva para la evaluación y monitoreo del servicio ecosistémico de almacenamiento de CO₂ es el uso de Sistemas de Información Geográfica (en adelante, SIG), los cuales pueden integrarse con datos recolectados en campo como insumo primario o con el procesamiento de imágenes satelitales, lo que permite estimar y cartografiar la acumulación de carbono en distintos sumideros con mayor precisión y alcance espacial, siendo en algunos casos una manera efectiva de tener información actualizada en áreas de difícil acceso o reduciendo costos operativos para su medición *in situ*.

Iniciativas de medición de carbono a nivel internacional

Plataforma Google Earth Engine. Esta plataforma ofrece un repositorio de datos geoespaciales referenciados bajo el término "carbono", diseñado para analizar dinámicas ambientales relacionadas con el ciclo del carbono. Incluye conjuntos de datos sobre biomasa forestal, emisiones de CO₂, cambios en el uso del suelo y carbono orgánico del suelo, obtenidos mediante sensores satelitales (ej. MODIS, Landsat) y modelos científicos. Los conjuntos de datos cubren una variedad de regiones. Estos recursos permiten monitorear reservas de carbono, evaluar impactos de deforestación y apoyar iniciativas de mitigación climática (Google, s.f.).

Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) presentan estimaciones de biomasa aérea forestal para los años 2010, 2017 y 2018. Se derivan de una combinación de datos de observación de la Tierra, dependiendo del año, procedentes de la misión Copernicus Sentinel-1, del instrumento ASAR del Envisat y del Satélite Avanzado de Observación Terrestre de JAXA (ALOS-1 y ALOS-2), junto con información adicional de fuentes de observación de la Tierra. Los datos han sido producidos como parte del programa de la Iniciativa sobre el Cambio Climático (Climate Change Initiative, CCI) de la ESA por el equipo de Biomass CCI. (Santoro & Cartus, 2021).

La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), basado en el trabajo de Spawn et al., (2020), presenta el conjunto de datos "*Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps for the Year 2010*" cuyo objetivo es proporcionar mapas globales de densidad de carbono en biomasa aérea y subterránea para el año 2010, con una resolución espacial de 300 metros (NASA, 2020).

Por sus características, esta fuente SIG de la NASA resulta idónea para el geoproceso que sustenta el presente documento, dado que no se limita a mostrar almacenamiento de carbono en áreas naturales (por ejemplo, bosques), sino que también ofrece un alcance de información para otro tipo de áreas no naturales (ejemplo: cultivos, pastos y otras áreas con intervención antropogénica), además de incluir datos de incertidumbre que permiten construir rangos de confianza en el uso de la información.

Iniciativas de medición de carbono a nivel Colombia

En Colombia se ha consolidado información a escala nacional y regional para cuantificar el carbono almacenado, la cual se encuentra disponible en dos formatos principales: (1) documentos técnicos publicados, que contienen estimaciones específicas de los sumideros, y (2) plataformas de SIG, las cuales facilitan la visualización, consulta, análisis e interpretación geoespacial de los datos.

La generación de esta información ha sido liderada por entidades adscritas al Sistema Nacional Ambiental (SINA), con especial participación de institutos de investigación vinculados al sector ambiental. Adicionalmente, Organizaciones No Gubernamentales (ONG) han contribuido mediante la producción de datos derivados de proyectos e iniciativas focalizadas en la cuantificación de reservas de carbono.

En este contexto, se destacan las siguientes fuentes clave de información sobre carbono a nivel nacional:

Sistema de Monitoreo de Bosque y Carbono (SMBByC). (IDEAM, sf.) El sistema tiene como objetivo afianzar los lineamientos técnicos, científicos y tecnológicos para el monitoreo de los bosques en el país, realizando las siguientes actividades: identificación y reporte periódico de la superficie de bosque natural, generación de metodologías para la cuantificación anual de la deforestación a nivel nacional, generación trimestral de Alertas Tempranas por Deforestación (AT-D), caracterización, modelación y simulación de las causas y agentes de deforestación y degradación, y monitoreo del carbono almacenado en los bosques (stocks de carbono y emisiones GEI).

Estimación de las reservas actuales de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos (Phillips, J. F., et al. 2010). Este documento aporta información crucial sobre el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de los bosques

colombianos. Presenta un análisis del efecto de diferentes leyendas de estratificación (zonas de vida de Holdridge, LCCS de la FAO, provincias de humedad, ecosistemas de Colombia) en la estimación de la biomasa aérea total y promedio, así como la incertidumbre

MapBiomás Colombia. (MapBiomás, s.f.). El proyecto MapBiomás Colombia tiene como objetivo general el monitoreo de la cobertura y el uso del suelo en todo el territorio continental colombiano. A través de la creación de colecciones de mapas, esta iniciativa busca proporcionar información actualizada y detallada sobre los cambios en el paisaje colombiano, basándose en la experiencia acumulada en el proyecto MapBiomás Amazonía.

Atlas de Carbono 2020. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2020). El objetivo de tener un reporte del contenido de biomasa y los reservorios de carbono, así como los niveles de deforestación histórica en las áreas administradas por Parques Nacionales Naturales (PNN), clasificadas por Dirección Territorial (DT), con un enfoque particular en la Dirección Territorial Pacífico (DTPA). El Atlas se construye utilizando los productos y las metodologías del Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (IDEAM). Este documento aporta información específica sobre el almacenamiento de carbono en las áreas protegidas administradas por PNN, expresado en MtCO₂e. Utiliza factores de emisión por bioma para estimar las emisiones de GEI derivadas de la deforestación y la captura de carbono por regeneración.

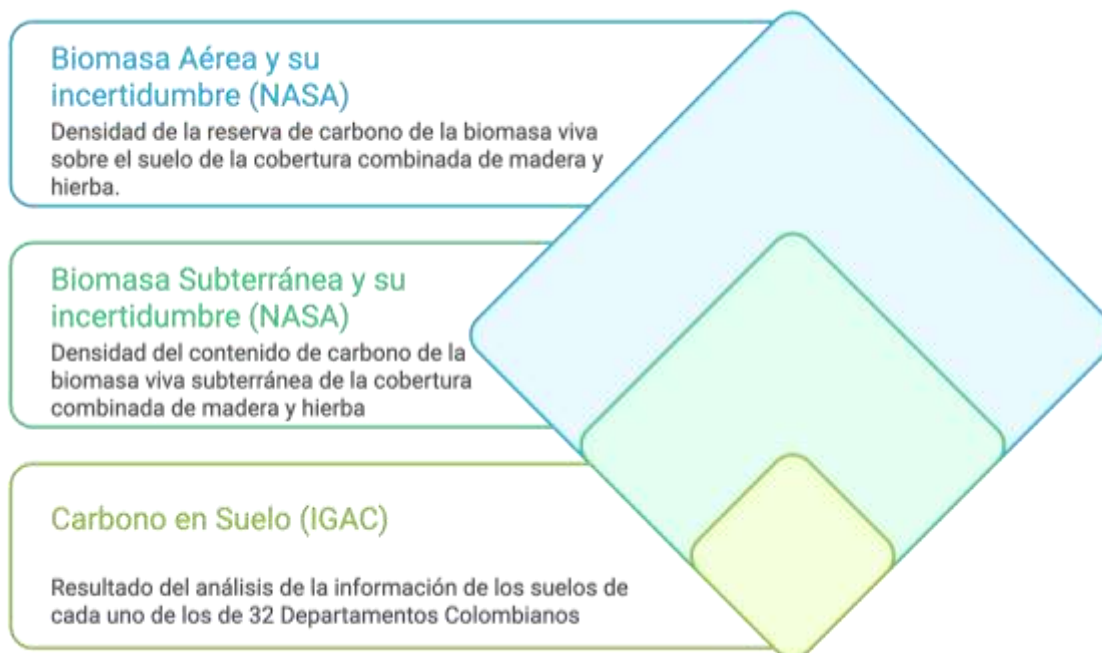
Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) publicó en el año 2017 el Mapa Nacional de Stock de Carbono Orgánico de Suelo (COS) para Colombia. Este mapa estima las existencias de carbono en polígonos de 1 km², proporcionando una matriz que refleja la distribución y cantidad de carbono orgánico en el suelo a lo largo del país. el mapa utiliza 4329 datos de perfiles de suelo recopilados entre 1970 y 2012. Los rangos de CO₂ para Colombia varían entre 10 y 264 tC/ha aproximadamente (Bolívar, A. et al. 2021).

Debido a que esta información fue desarrollada por una entidad nacional, el IGAC, y respaldado con datos oficiales de carácter público, el Mapa Nacional de Stock de COS constituye la referencia más confiable para estimar este sumidero en Colombia. Por tal motivo, dentro del geoproceso se adopta como insumo principal para el componente de carbono en suelo

6.3. Selección de fuentes de información para el geoproceso

Para el geoproceso respaldado por este documento, se eligieron los datos de la NASA e IGAC sobre los sumideros de carbono en Colombia (Ilustración 4). La NASA aporta información sobre el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea, y su incertidumbre, asociadas a coberturas mixtas de madera y herbáceas. Por su parte, el IGAC proporciona estimaciones del carbono orgánico en suelo, a partir del análisis detallado de los suelos en los 32 departamentos del país. Estos tres componentes: (i) carbono en biomasa aérea, (ii) carbono en biomasa subterránea y (iii) carbono en suelo, conforman una base para la cuantificación del carbono almacenado en los ecosistemas terrestres del territorio colombiano.

Ilustración 4. Fuentes de información espacial para el geoproceso.



Fuente: NASA (2020) y Bolivar et al., (2021) ANLA

6.4. Geoproceso para determinar el almacenamiento de carbono

El presente modelo de geoprocesamiento se orienta a estimar el carbono almacenado en distintas coberturas terrestres de Colombia, integrando datos geoespaciales de carbono aéreo, subterráneo y carbono orgánico del suelo (COS). El proceso combina insumos cartográficos armonizados y de alta resolución, análisis espacial multifuente y modelos de interpolación para generar salidas cuantificables tanto biofísicas como económicas, en términos de toneladas de carbono almacenado (tC) y sus de CO₂ equivalentes (tCO₂eq). Las fuentes de información geoespacial utilizadas para los sumideros de carbono de biomasa aérea, biomasa subterránea y suelo son descritas en la siguiente Tabla 3.

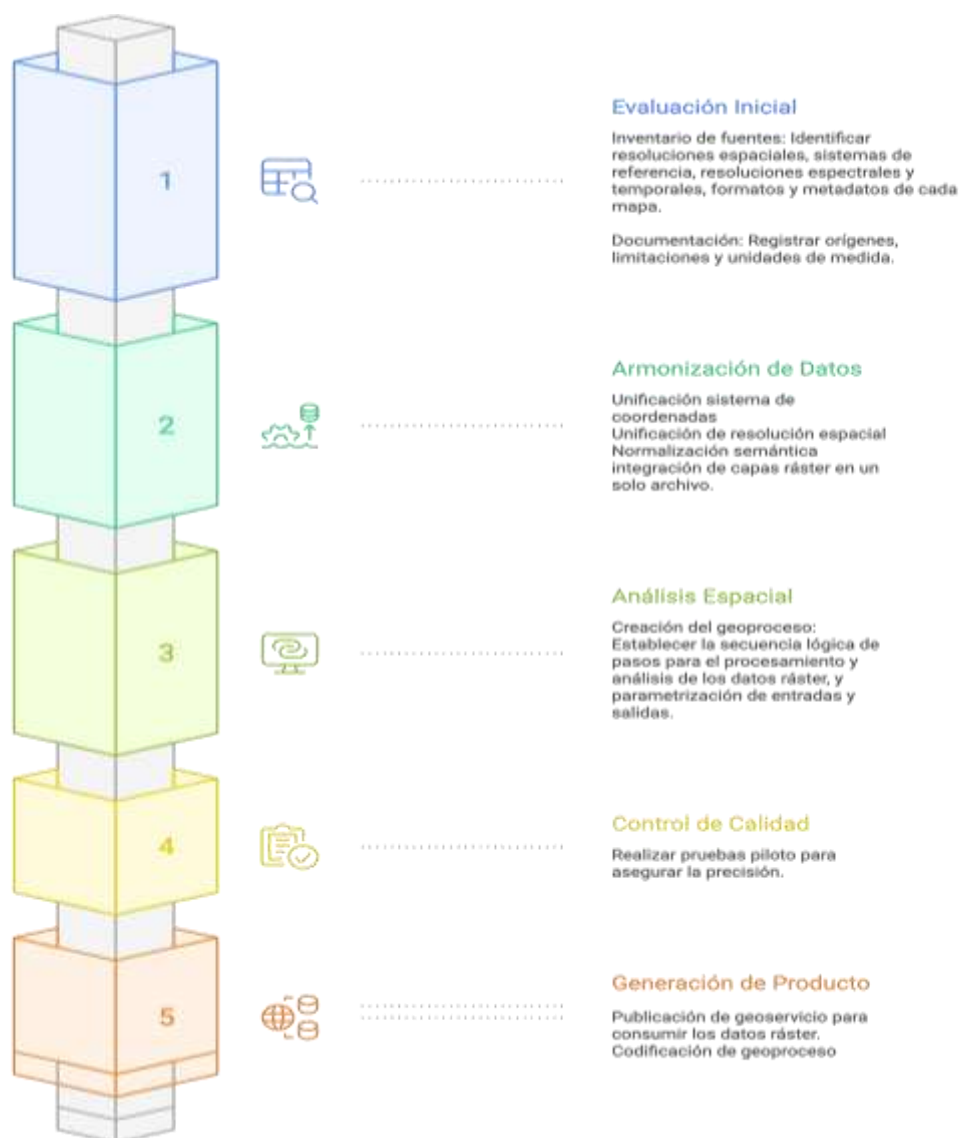
Tabla 3. Fuentes geoespaciales de sumideros de carbono usadas para el geoproceso.

Sumidero	Característica de la capa	Resolución espacial	Unidad de información	Fuente
Biomasa aérea	Densidad de la reserva de carbono de la biomasa viva sobre el suelo de la cobertura combinada de madera e hierba en 2010. Esto incluye el carbono almacenado en los tejidos de las plantas vivas que se encuentran sobre la superficie de la Tierra (tallos, corteza, ramas y ramitas). Esto no incluye la hojarasca o desechos leñosos gruesos no vivos.	310 (m)	tC/ha	https://www.earthdata.nasa.gov/
Incertidumbre biomasa aérea	Incertidumbre de la densidad de carbono estimada de la biomasa viva sobre el suelo de la cobertura combinada de madera y herbácea en 2010. La incertidumbre representa el error estándar acumulativo que se propagó a través del proceso de armonización mediante la suma en cuadratura.	310 (m)	tC/ha	https://www.earthdata.nasa.gov/
Biomasa subterránea	Densidad del contenido de carbono de la biomasa viva subterránea de la cobertura combinada de madera y hierba en 2010. Esto incluye el carbono almacenado en los tejidos de las plantas vivas que se encuentran debajo de la superficie de la Tierra (raíces). Esto no incluye el tejido de raíz muerto o dislocado ni la materia orgánica del suelo.	310 (m)	tC/ha	https://www.earthdata.nasa.gov/
Incertidumbre biomasa subterránea	Incertidumbre de la densidad estimada de carbono de la biomasa viva subterránea de la cobertura leñosa y herbácea combinada en 2010. La incertidumbre representa el error estándar acumulativo que se propagó a través del proceso de armonización mediante la suma en cuadratura.	310 (m)	tC/ha	https://www.earthdata.nasa.gov/
Carbono en suelo	El Mapa Nacional de Stock de Carbono Orgánico de Colombia (2017), se desarrolló mediante la metodología de mapeo digital de suelos propuesta por la FAO, mediante la Alianza Mundial por el Suelo. El mapa elaborado es el resultado del análisis de la información de los suelos de cada uno de los 32 Departamentos que integran el territorio colombiano, los cuales se encuentran a escala general (1:100.000) y fueron recopilados entre los años 1980 y 2012. En total fueron analizados 4.329 perfiles de suelos de toda la geografía nacional a partir de <i>regression kriging</i> (RK). De acuerdo con el modelo RK la distribución espacial de la incertidumbre oscila entre 10 y 15 tC/ha para todo el territorio colombiano.		tC/ha	https://datos.icde.gov.co/search?tags=mapeo%20digital

Procesamiento espacial e integración de datos

El desarrollo del geoproceso conlleva las siguientes etapas generales de trabajo con las fuentes cartográficas utilizadas presentadas en la siguiente Ilustración 5:

Ilustración 5. Etapas para el desarrollo del geoproceso de almacenamiento de carbono



Fuente: ANLA,2025

Dentro de la “Etapa 3. Análisis espacial” sobre el procesamiento y análisis de los ráster para generar las salidas, se desarrollan tres pasos principales: 1) entradas de usuario, 2) procesamiento principal (con cuatro fases) y 3) salidas. Estas se explican en mayor detalle en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4. Pasos principales de la Etapa 3. Análisis espacial

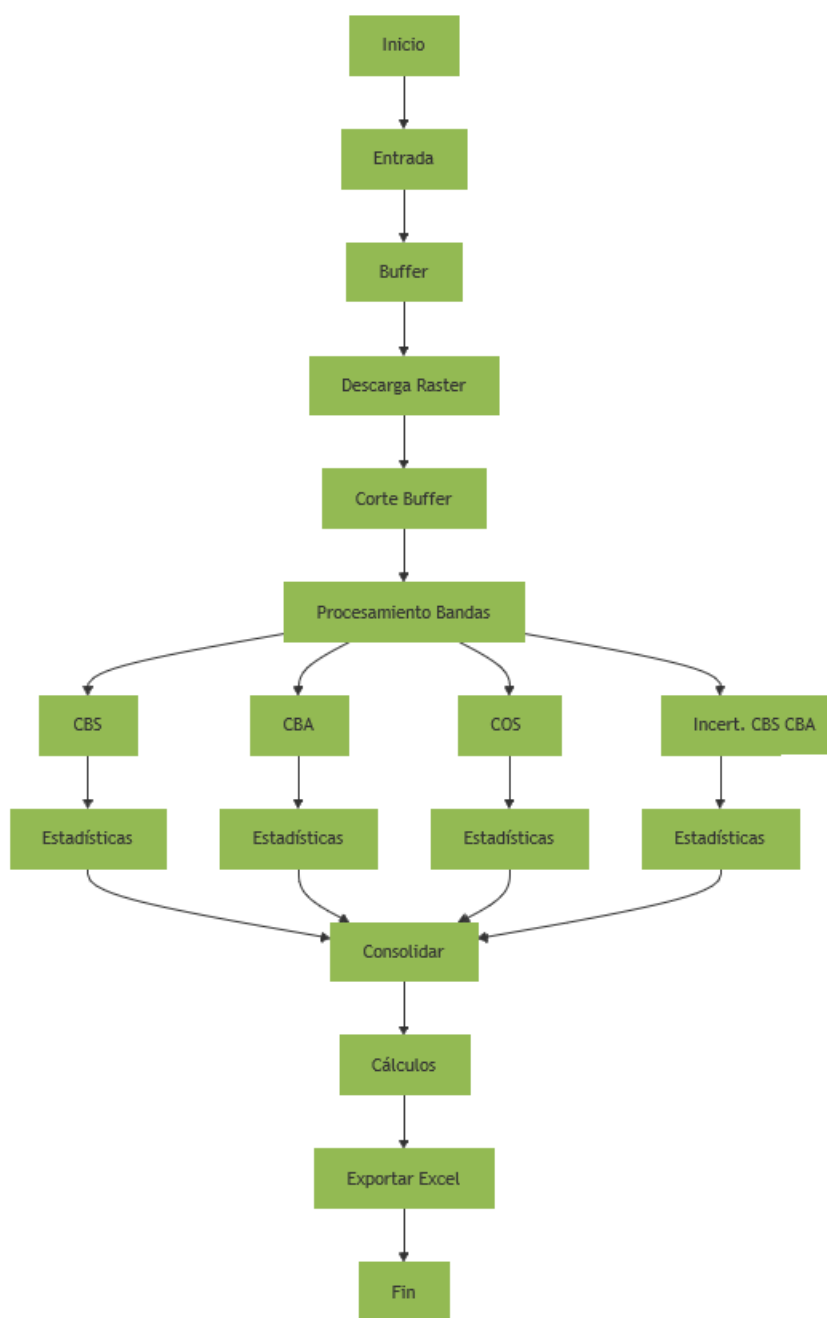
Pasos principales	Análisis
1. ENTRADAS DE USUARIO	Área de estudio: Capa vectorial poligonal (ej.: Área de intervención de una vía, área que tendrá intervención) deberá estar en coordenadas planas MAGNA SIRGAS Origen Nacional.
	Valor económico: Costo por tonelada de carbono equivalente (tCO ₂ eq)
2. PROCESAMIENTO PRINCIPAL	Fase 1: Preparación de datos
	1.Cálculo de buffer (650m): Extiende el área de estudio para evitar errores en el cálculo de carbón en los bordes del área de estudio.
	2.Descarga de ráster multibanda: Autenticación con token en servidor ANLA Descarga de imagen compuesta (5 bandas) con extensión del buffer Bandas: 1: Carbono en biomasa aérea (CBA) 2: Incertidumbre CBA 3: Carbono biomasa subterránea (CBS) 4: Incertidumbre CBS 5: Carbono orgánico en suelo (COS)
	3.Recorte inicial: Corta ráster al área del buffer.
	Fase 2: Procesamiento por componente
	4.Extracción de bandas individuales: CBS (Banda 3) CBA (Banda 1) COS (Banda 5) Incertidumbres (Bandas 2 y 4)
	5.Remuestreo (10m): Se realiza una interpolación de los datos para hacer más fino el cálculo de almacenamiento de carbono -Interpolación bicúbica para homogenizar resolución -Procesado para: CBS, CBA, COS e incertidumbres
	6.Recorte final: Cada capa remuestreada se corta al área de estudio original.
	Fase 3: Cálculo de estadísticas
	7. Análisis por capa: -Cálculo de suma de valores de píxeles -Determinación de área por píxel (ha) -Conversión a toneladas totales: Toneladas = (Suma * Área_píxel) -Capas procesadas: Carbono subsuelo (CBS) Carbono orgánico suelo (COS) Carbono aéreo (CBA) Incertidumbres (CBA y CBS)

Pasos principales	Análisis
	Fase 4: Consolidación de resultados
	8. Cálculos finales: -Carbono total: Total = CBS + COS + CBA -Conversión a CO ₂ eq: $tCO_2eq = Toneladas_Carbono \times 3,67$ (factor de conversión para pasar de tC a tCO ₂ eq) -Valor económico: Valor = tCO ₂ eq × Valor_tonelada (se usa el valor del impuesto al carbono emitido por la DIAN)
	9. Generación de reporte: Tabla consolidada con 14 métricas clave Exportación a Excel con estructura transpuesta
3. SALIDAS	Archivo Excel con: -Área de estudio (ha) -Toneladas de carbono por componente - Tonelada de las Incertidumbres por componente CBA y CBS -Valores en tCO ₂ eq -Valor económico total y por componente

Fuente: ANLA, 2025

Respecto a la información presentada, en el siguiente diagrama (Ilustración 6) se expone de manera esquemática el desarrollo del geoproceso para su entendimiento. En este, se observa los principales pasos, desde el ingreso de la información por parte del usuario (shape del área de interés y datos económicos), pasando por los análisis espaciales de alistamiento y procesamiento (buffer, descarga de ráster, procesamiento de bandas y cálculos), hasta llegar a los resultados finales exportados en un archivo Excel, que constituye la etapa de cierre (Ilustración 6).

Ilustración 6. Diagrama del desarrollo del geoproceso de carbono.



Fuente: ANLA, 2025

PASO A PASO PARA LA USABILIDAD DE LA HERRAMIENTA

a. Descargar el archivo del modelo de geoproceso

El primer paso para correr el modelo es descargar los archivos anexos al **Geoproceso para la estimación de valores de referencia de fuentes de carbono, almacenado y su valoración económica** que se encuentra en la página de la ANLA en el siguiente link: https://www.anla.gov.co/01_anla/proyectos/nuevo-licenciamiento-ambiental/elaboracion-y-evaluacion-eia ¹.

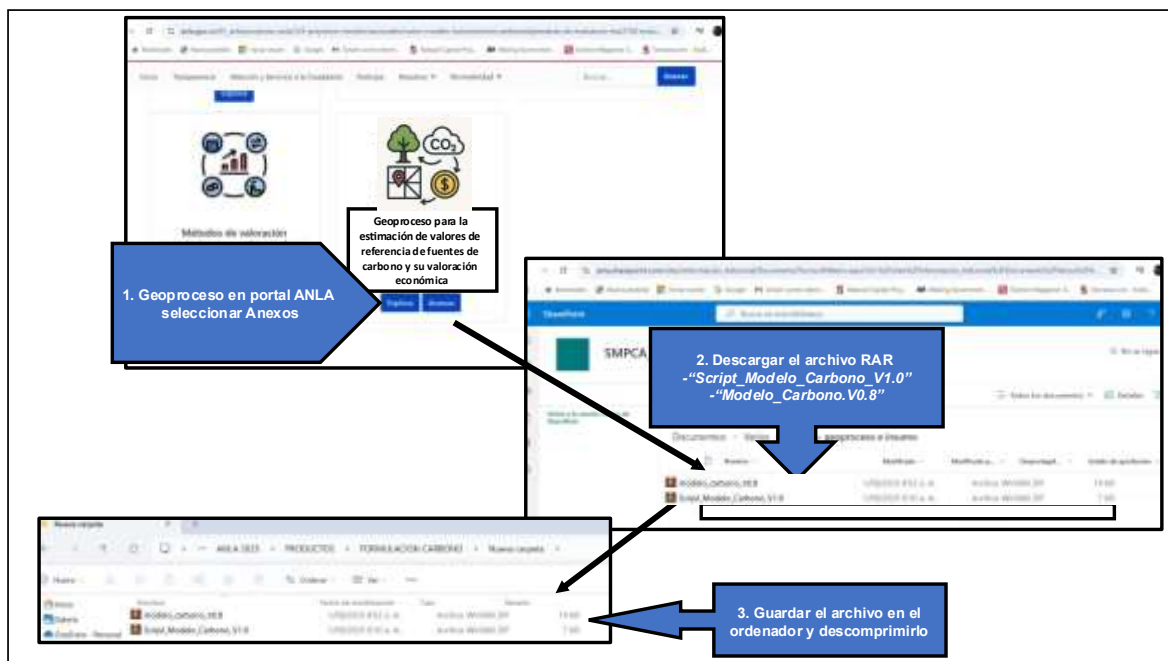
El botón de “Anexos” direccionará al usuario automáticamente a una ventana donde se puede descargar dos archivos, los cuales hacen referencia a dos opciones para ejecutar el geoproceso. Estas son:

- 1) “*Script_Modelo_Carbono_V1.0*”. Es un archivo para la ejecución directa de las instrucciones secuenciales del geoproceso².
- 2) “*Modelo_Carbono.V0.8*”. Es un “*plugin*” para ser utilizado por cualquier usuario de QGIS quien podrá instalarlo, acceder desde el menú y ejecutarlo. Este hace referencia a un archivo de código fuente escrito en el lenguaje de programación Python que contiene la lógica y datos necesarios para realizar el geoproceso.

El esquema de lo anterior se muestra en la siguiente Ilustración 7:

¹Se recomienda que el nombre del “usuario” de la sesión en el computador donde se descarguen los archivos del geoproceso no incluya tildes ni caracteres especiales, ya que estos pueden generar inconvenientes en el momento de su ejecución. Igualmente si tiene problemas con el formato shapefile, la opción es convertirlo a formato GeoPackage (.gpkg).

Ilustración 7. Descargue del archivo de geoproceso del portal ANLA (imagen modelo).



Fuente: ANLA, 2025

b. Cargar el geoproceso “carbono” en el software QGIS:

Para comenzar, es esencial saber que el geoproceso se ejecuta en la plataforma de **QGIS**³. Este programa es versátil, ya que puede ser utilizado en cualquier sistema operativo.

La pantalla principal de QGIS se muestra en la Ilustración 8 .

³ <https://qgis.org/download/thank-you/>

Ilustración 8. Pantalla principal plataforma SIG QGIS



Ya que se descargan dos tipos de alternativas para ejecutar geoproceto, a continuación, se presentan la instalación para cada una de ellas:

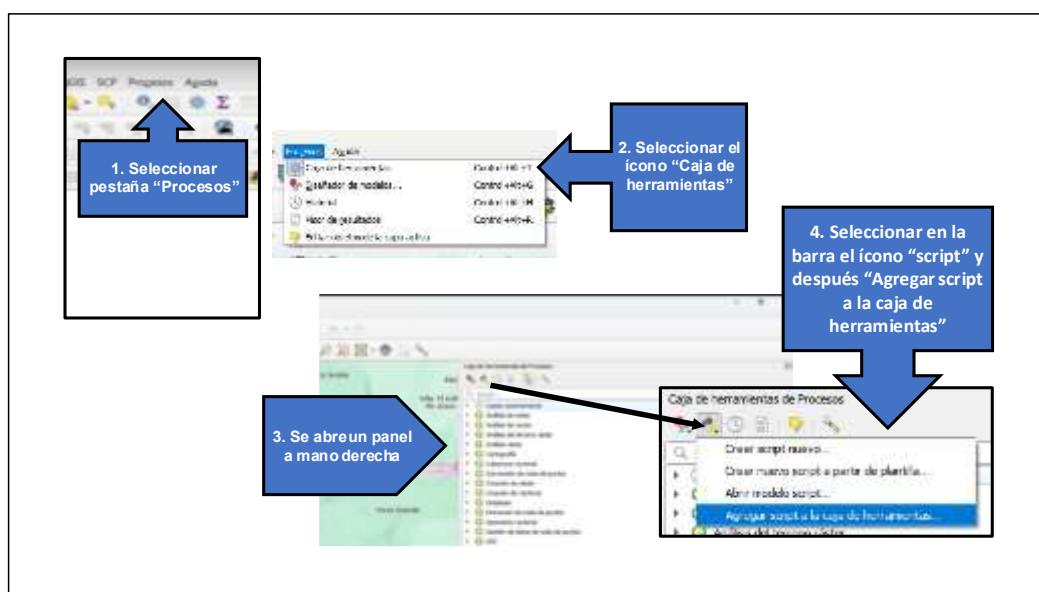
Instalación y ejecución del “Script Modelo Carbono V1.0”

La primera acción es ir al panel de geoprocetamiento, dentro de este, se debe seleccionar la pestaña “procesos”.

- 1) Se despliega un abanico de opciones y se elige “caja de herramientas”.
- 2) Al oprimir, se abrirá un panel a la derecha con varias opciones.
- 3) En la barra de “Caja de herramientas de Procesos”, debe seleccionar el ícono de “scripts” y del menú que se proyecte, escoger la opción, “Agregar script a la caja de herramientas”.

Lo anterior se muestra con ejemplos en la siguiente Ilustración 9:

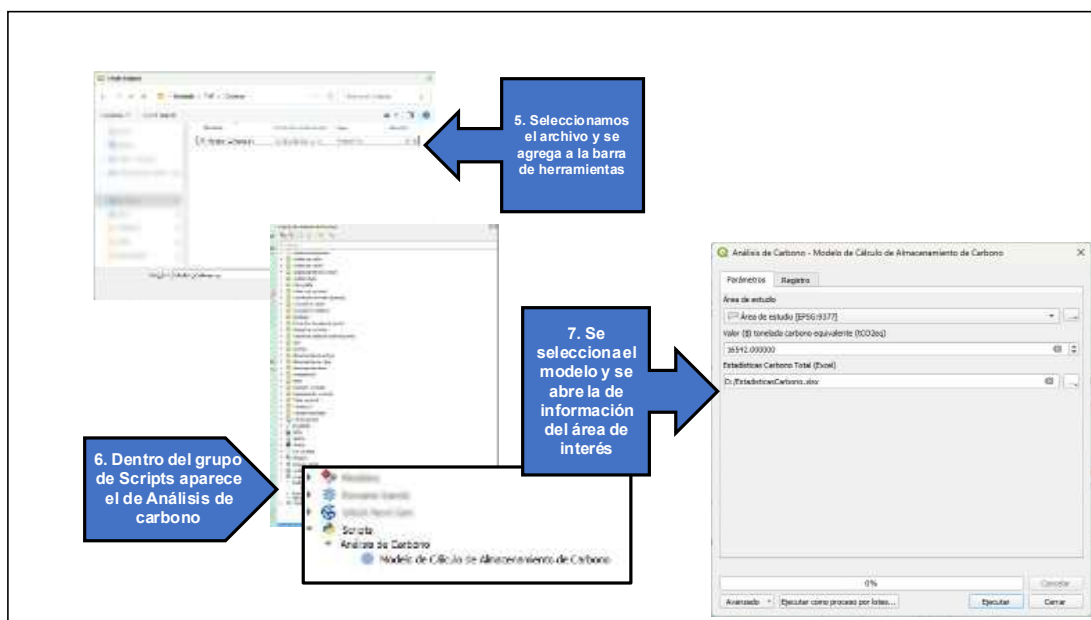
Ilustración 9. Pasos iniciales 1-4 para correr el geoproceso de almacenamiento de carbono.



Fuente: ANLA, 2025

- 4) Dentro del "Agregar script a la caja de herramientas" se carga el archivo "Modelo_Carbono.py" previamente descargado en computador.
- 5) Al seleccionarlo, automáticamente se agrega a la lista de Scripts del panel de la derecha con el nombre de "Modelo de Cálculo de Almacenamiento de Carbono".
- 6) Al seleccionar se abre el cuadro principal del geoproceso donde el usuario ingresa el área de interés y el valor de la tonelada de CO₂eq (Ilustración 10)

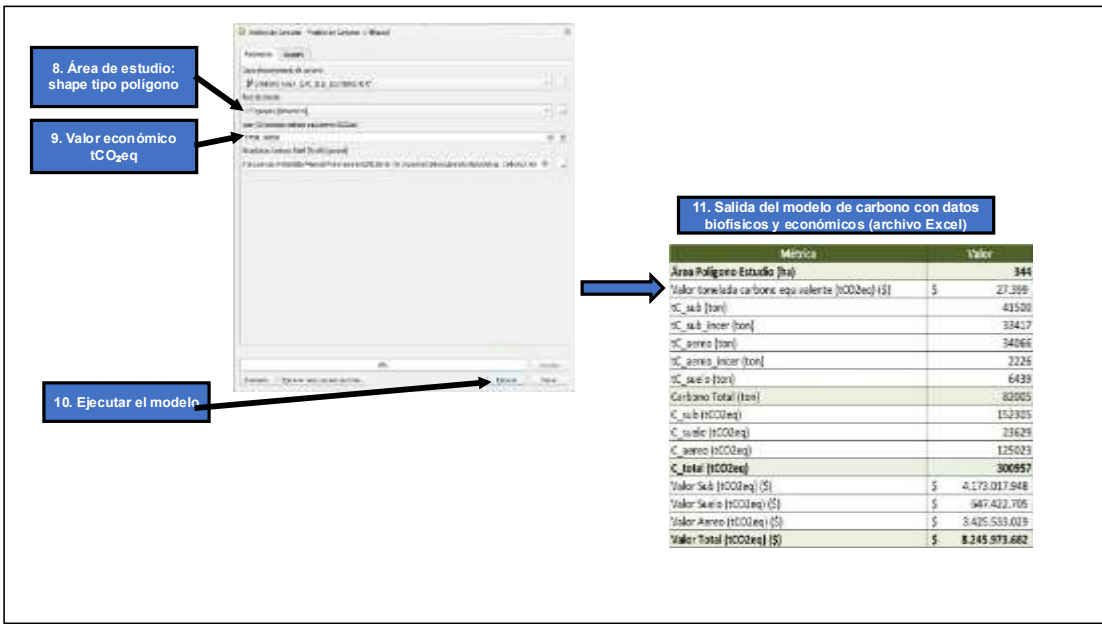
Ilustración 10. Pasos iniciales 5-7 para correr el geoproceso de almacenamiento de carbono.



Fuente: ANLA, 2025

Cargar los insumos para ejecutar el geoproceso “Almacenamiento de carbono”:

Ilustración 11. Pasos iniciales 8-11 para correr el geoproceso de almacenamiento de carbono.



8. Área de estudio:
shape tipo polígono

9. Valor económico
tCO₂eq

10. Ejecutar el modelo

11. Salida del modelo de carbono con datos biofísicos y económicos (archivo Excel)

Métrica	Valor
Área Polígono Estudio (ha)	344
Valor tonelada carbono equivalente (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 27.399
SC_suelo (ton)	43500
SC_suelo_incer (ton)	33427
SC_aereo (ton)	34066
SC_aereo_incer (ton)	2226
SC_suelo (ton)	6439
Carbono Total (ton)	83005
C_suelo (tCO ₂ eq)	153305
C_suelo (tCO ₂ eq)	23629
C_aereo (tCO ₂ eq)	125023
C_total (tCO ₂ eq)	300957
Valor Suelo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 4,173,017,948
Valor Suelo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 987,422,705
Valor Aereo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 3,425,533,019
Valor Total (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 8,345,973,682

Fuente: ANLA, 2025

8) Como se observa en la Ilustración 11, el usuario de la herramienta deberá seguir los siguientes pasos: cargar en la celda “área de estudio” un shape tipo polígono que deberá estar en coordenadas planas MAGNA SIRGAS Origen Nacional.

9) En el caso de ser un proyecto lineal deberá elaborar una franja alrededor de la línea con la distancia que crea pertinente para su análisis. Ingresar el valor económico de la tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂eq) que desee manejarse.

10) ya sea valor nacional o internacional. Para entender más afondo este valor se aconseja revisar el acápite 6.4. Cuando tenga montada la información le da el botón “Ejecutar” para correr el modelo.

11) El modelo genera una tabla salida del polígono del área de interés analizado (shapefile suministrado por el usuario) donde se muestran las siguientes variables:

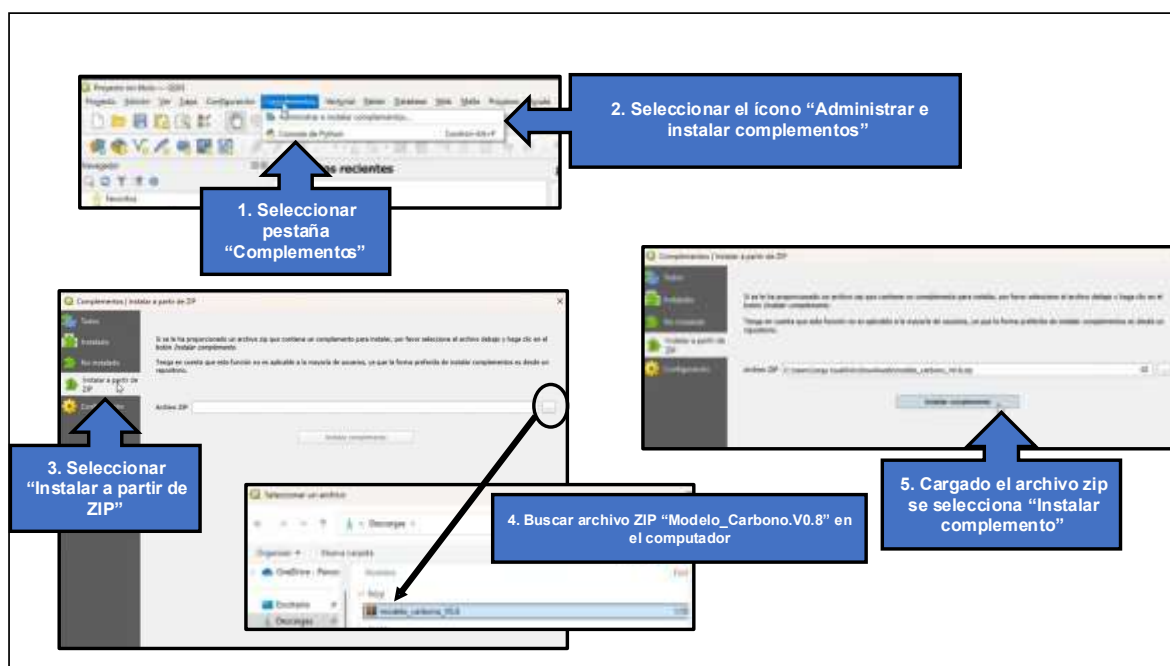
- Área polígono estudio (ha)
- Valor económico del carbono (Ejemplo impuesto vigente de \$27.399 COP/tCO₂eq)
- Toneladas de carbono subterráneo: tC_sub(ton)
- Toneladas de carbono subterráneo incertidumbre: tC_sub_incer(ton)
- Toneladas de carbono aéreo: tC_aereo(ton)
- Toneladas de carbono aéreo incertidumbre: tC_aereo_incer(ton)
- Toneladas de carbono suelo: tC_suelo(ton)
- Toneladas de Carbono total: Carbono total(ton)
- Toneladas de CO₂eq en subsuelo: C_sub (tCO₂eq)
- Toneladas de CO₂eq en suelo: C_suelo (tCO₂eq)
- Toneladas de CO₂eq aéreo: C_aéreo (tCO₂eq)
- Toneladas de CO₂eq total: C_total (tCO₂eq)
- Valor toneladas de CO₂eq en subsuelo: Valor_Sub (tCO₂eq)(\$)
- Valor toneladas de CO₂eq suelo: Valor_Suelo (tCO₂eq)(\$)
- Valor toneladas de CO₂eq aéreo: Valor_Áereo (tCO₂eq)(\$)
- Valor total CO₂eq: Valor Total_Áereo (tCO₂eq)(\$)

Instalación y ejecución del plugin “Modelo Carbono.V0.8” .

- 1) La primera acción es ir al panel de geoprocesamiento, dentro de este, se debe seleccionar la pestaña "**complementos**".
- 2) Se despliega un abanico de opciones y se elige "*Administrar e instalar complementos*".
- 3) Al oprimir, se abrirá una ventana y debe seleccionar en el panel izquierdo la opción “instalar a partir de zip”.
- 4) Luego, seleccionar el botón con los tres puntos [...] al lado de la barra de Archivo zip, y buscar el archivo en la carpeta donde fue guardado.
- 5) Con el archivo cargado, se oprime el botón “Instalar complemento”

Lo anterior se muestra con ejemplos en la siguiente Ilustración 12:

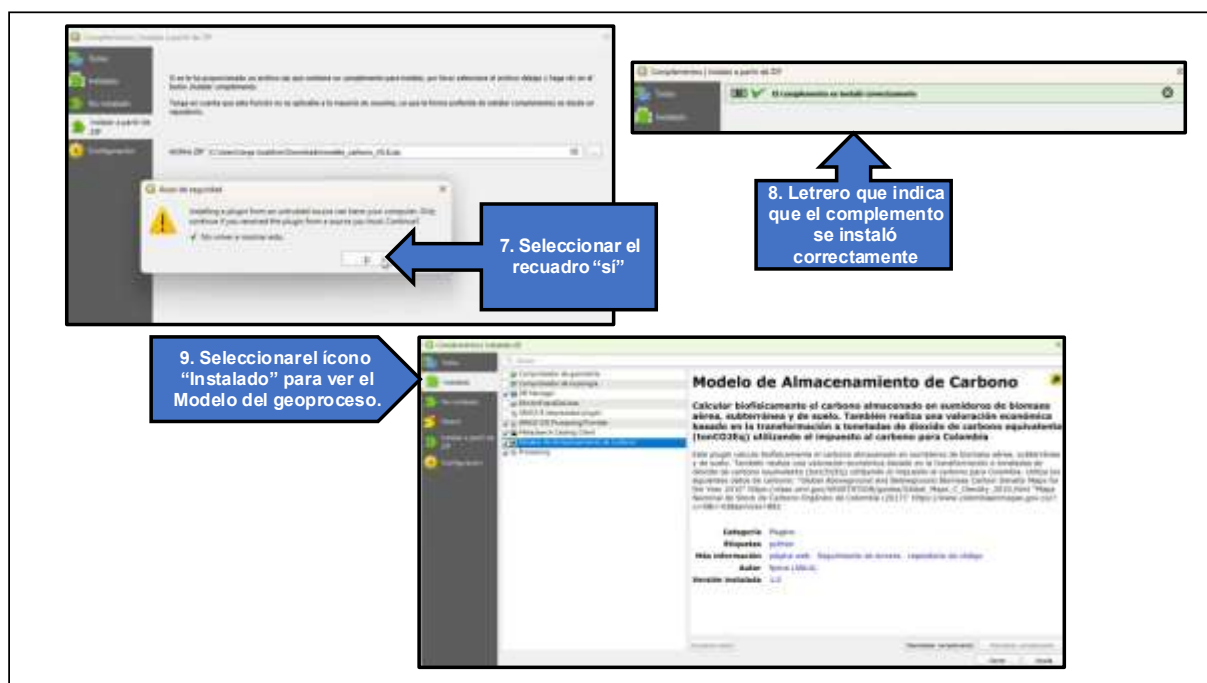
Ilustración 12. Pasos iniciales 1 a 5 para instalar el plugin del geoproceso de carbono.



Fuente: ANLA,2025

- 7) Sale un letrero de “aviso de seguridad” de si confía en la fuente del archivo que está cargado. Seleccionar el recuadro “sí”.
- 8) A continuación, sale un recuadro en color verde donde se indica que el complemento se instaló correctamente.
- 9) Ir al panel izquierda de la ventana en el ícono “Instalado” y en las opciones que se despliegan encontrará el ícono “Modelo de almacenamiento de carbono”. La ventana tiene la opción de “Desinstalar el complemento” por si se genera algún error o se desea borrar. Lo anterior se muestra en la siguiente Ilustración 13.

Ilustración 13. Pasos 7 a 9 para instalar el plugin del geoproceso de carbono

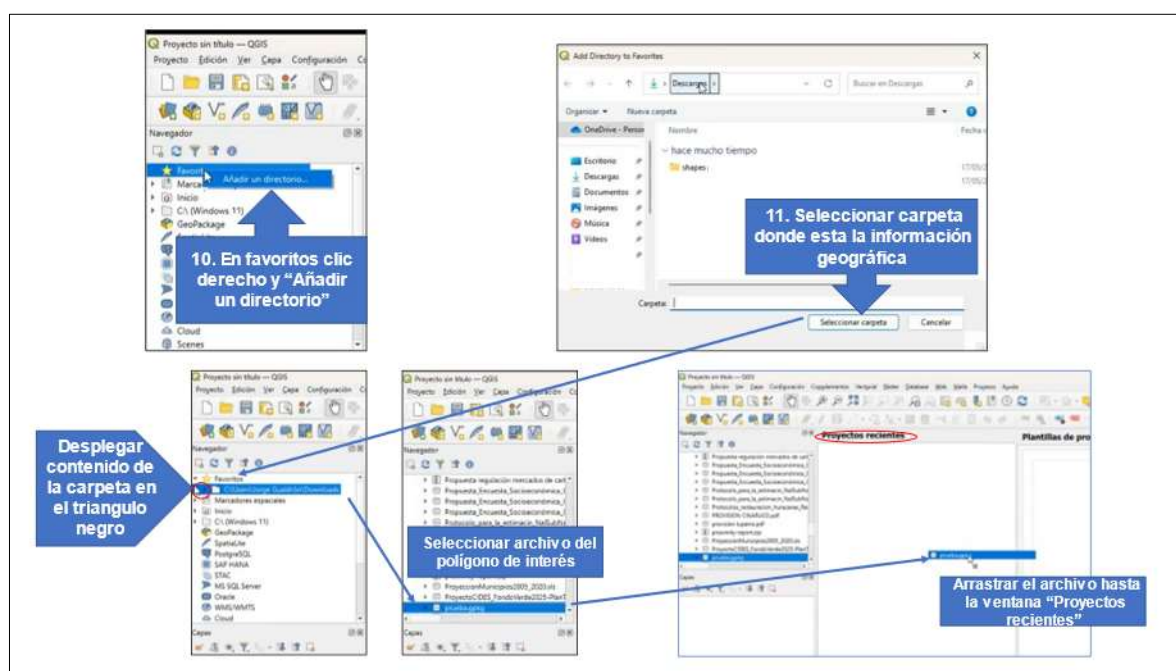


Fuente: ANLA, 2025

- 10) Ahora se carga el shapefile de interés. Para ello, dirigirse a la ventana del “navegador” en la ventana izquierda del programa y dar “clic derecho” sobre el ícono de la estrella “favoritos”, donde se despliega una opción de “añadir directorio” y dar clic sobre esta.
- 11) Se busca **la carpeta** donde está la información geográfica (shape de interés para analizar) y seguido se clic en “Seleccionar carpeta”. Para que quede cargada en el navegador. Entonces se debe desplegar la carpeta (triangulo negro al lado derecho) buscar el archivo, seleccionarlo y arrastrarlo hasta la ventana de al lado “Proyectos recientes”.

Los pasos 10 y 11 se muestran en la siguiente Ilustración 14 para mejor entendimiento.

Ilustración 14. Pasos 10 a 11 para instalar el plugin del geoproceso de carbono



Fuente: ANLA, 2025

12) Saldrá en la ventana "Capas" el polígono de interés a analizar. A su vez, aparecerá el plugin "Modelo de Carbono" como un ícono en la barra de herramienta a mano derecha, se debe ahora dar "CLIC" sobre este.

13) Sale una ventana del "Modelo de Almacenamiento de Carbono" con tres ítems:

-Selecione la capa del área de estudio (Polígono): En esta barra solo aparecerán las capas de archivo poligonal que estén en la carpeta directorio seleccionada en el Numeral 11.

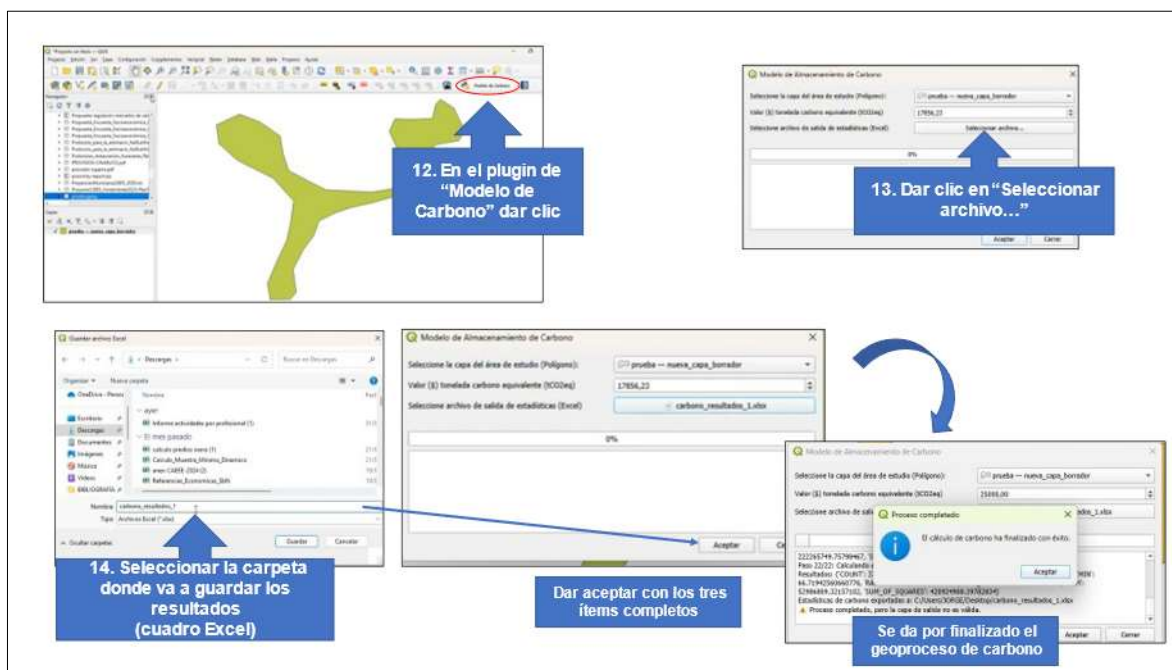
-Valor (\$) tonelada carbono equivalente (tCO2eq): Valor de la tCO2eq que el usuario de la herramienta desee ingresar.

-Seleccione archivo de salida de estadísticas (Excel): Se debe dar clic en la barra de “Seleccionar archivo...” con el fin de ubicar la carpeta donde se guarde el archivo de salida Excel.

14) Al seleccionar la carpeta ya quedan los tres ítems completos para luego oprimir el botón “aceptar”, e inicia el modelo del geoproceso. Cuando termine, sale un aviso “El cálculo de carbono ha finalizado con éxito”, se da aceptar y se va a revisar el archivo resultado.

Los pasos 12 y 14 se muestran en la siguiente Ilustración 15 para mejor entendimiento.

Ilustración 15. Pasos 12 a 14 para instalar el plugin del geoproceso de carbono.



Fuente: ANLA, 2025

15) Revisar el archivo de salida resultado en la carpeta seleccionada el cual hace referencia a una tabla en formato Excel. Las variables de salida son las presentadas

en el paso 11 del proceso de Instalación y ejecución del
“Script_Modelo_Carbono_V1.0” (Ilustración 16)

Ilustración 16. Ejemplo del cuadro de resultado del geoproceso (formato Excel).

Métrica	Valor
Área Polígono Estudio (ha)	344
Valor tonelada carbono equivalente (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 27.399
tC_sub (ton)	41500
tC_sub_incer (ton)	33417
tC_aereo (ton)	34066
tC_aereo_incer (ton)	2226
tC_suelo (ton)	6439
Carbono Total (ton)	82005
C_sub (tCO ₂ eq)	152305
C_suelo (tCO ₂ eq)	23629
C_aereo (tCO ₂ eq)	125023
C_total (tCO ₂ eq)	300957
Valor Sub (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 4.173.017.948
Valor Suelo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 647.422.705
Valor Aereo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 3.425.533.029
Valor Total (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 8.245.973.682

Fuente: ANLA, 2025

Análisis de los valores de incertidumbre

Para los resultados obtenidos, es importante considerar los valores resultantes de almacenamiento de carbono a la luz de los datos que están acompañados de valores de incertidumbre, para este caso los datos de carbono en la biomasa aérea y subterránea se deben considerar lo siguiente:

En los proyectos de carbono, la incertidumbre en la estimación del carbono almacenado o de las emisiones evitadas es un factor crítico que determina la validez, credibilidad y cantidad de créditos certificados. Diversos estándares internacionales como el IPCC, VCS (Verra), Gold Standard y ART-TREES establecen umbrales máximos recomendados, generalmente entre 10% y 30%. Por ejemplo, Verra permite una incertidumbre relativa hasta del 20%, aplicando

descuentos si se excede este límite, mientras que Gold Standard tolera hasta un 30% siempre que se justifique y se apliquen métodos conservadores. En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (IDEAM) busca mantener la incertidumbre por debajo del 15% en reportes nacionales y jurisdiccionales de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal, más la conservación, manejo sostenible y aumento de reservas de carbono en bosques (REDD+)⁴.

Cuando los niveles de incertidumbre superan ciertos umbrales, se reducen los beneficios económicos del proyecto debido a la aplicación de factores de corrección o penalizaciones, como la retención de créditos en un buffer o la reducción del volumen certificado. Se considera aceptable una incertidumbre de hasta el 20% para proyectos que siguen estándares rigurosos, y superior a este umbral solo si se implementan medidas compensatorias. Una incertidumbre superior al 30% indica baja calidad de datos y puede ser causa de rechazo del proyecto o requerimiento de mejoras metodológicas.

Por lo anterior, y para fines específicos que requiera el usuario de la herramienta puede guiarse de los siguientes rangos de porcentaje de incertidumbre, clasificación y alcance presentados en la Tabla 5:

Tabla 5. Clasificación de los rangos porcentuales de incertidumbre.

Porcentaje de Incertidumbre	Clasificación	Alcance
< 10%	Alta precisión	Ideal para monitoreo nacional
10–15%	Precisión aceptable	Puede ser utilizado como referencia en contextos de mercados voluntarios o institucionales
15–20%	Precisión moderada	Aceptable con ajustes conservadores
20–30%	Baja precisión	Requiere aplicación de factores de corrección
> 30%	Muy baja	Alta probabilidad de rechazo o requerimientos técnicos adicionales

⁴ Corresponde a un mecanismo internacional creado bajo la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), para mitigar el cambio climático, que busca a través de diferentes tipos de acciones relacionadas con el fortalecimiento de la gobernanza forestal, la implementación de procesos productivos sostenibles, el manejo forestal comunitario, el monitoreo forestal, la conservación de la biodiversidad y la recuperación de áreas sin cobertura boscosa, abordar las causas subyacentes e incidir en los comportamientos de los agentes y en los motores generadores de la deforestación y degradación forestal.

Fuente: ANLA, 2025

Ahora bien, si analizamos la clasificación de la incertidumbre presentada y el geoproceso desarrollado se evidencia que esta herramienta en sus resultados integra datos de carbono aéreo y subterráneo acompañados de sus incertidumbres, lo que permite evaluar la calidad y la confiabilidad de las estimaciones.

Según la clasificación, valores de incertidumbre inferiores al 10% son ideales para monitoreo nacional, y entre 10% y 15% son de precisión aceptable, mientras que rangos entre 15% y 30% requieren ajustes conservadores o factores de corrección. En el modelo, estos rangos pueden verificarse directamente en las salidas, lo que habilita al usuario para determinar si el dato obtenido es apto para uso en licenciamiento o si demanda validación adicional.

Un aspecto crítico es que el geoproceso analiza incertidumbre diferenciada para biomasa aérea y subterránea, pero en el caso de esta última, el documento reconoce que los valores suelen superar el 70%, debido a las dificultades metodológicas para su medición directa. Este hecho contrasta de forma significativa con los umbrales de aceptación, lo que implica que, en la práctica, la biomasa subterránea presenta datos de baja precisión que limitan su uso para fines regulatorios o de mercados de carbono. Esto sugiere que el componente subterráneo debe interpretarse con precaución, priorizando su función como referencia y no como valor definitivo.

Finalmente, el modelo del geoproceso no solo cuantifica el carbono y su incertidumbre, sino que también traduce estos resultados a términos monetarios mediante el valor del impuesto al carbono. En este punto, la integración de la Tabla 7 permite establecer la relación directa entre la magnitud de la incertidumbre y el impacto económico: a mayor incertidumbre, mayor necesidad de aplicar descuentos, reduciendo el valor económico reportado, o en su caso, solo utilizar valores con baja incertidumbre en carbono aéreo, y el de carbono en suelo que es considerado una fuente oficial para generar un cálculo económico. Esto refuerza la importancia de que, en futuras versiones del instrumento, se incorpore un módulo automático que ajuste el valor final según el rango de incertidumbre detectado, alineando así la salida económica con los estándares internacionales y las mejores prácticas nacionales.

6.5. Sección 4: Valoración económica del almacenamiento de carbono

Desde una perspectiva económica, el valor social asociado al secuestro de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) corresponde al costo del daño ambiental que se evitaría si dicha tonelada no fuera liberada a la atmósfera. Se han realizado estudios de aproximaciones para el valor de un “impuesto óptimo al carbono”, Nordhaus (2007) calculó que para el año 2015 el costo social de no emitir una tonelada de carbono era de USD \$35, incrementándose a USD \$85 en 2050 y USD \$206 a 2100.

En el contexto colombiano, la Ley 1819 de 2016 en su artículo 221, modificado por el artículo 47 de la Ley 2277 de 2022, estableció el impuesto nacional al carbono, en los siguientes términos:

“ARTÍCULO 221. IMPUESTO AL CARBONO. El impuesto nacional al carbono es un gravamen que recae sobre el contenido de carbono equivalente (CO₂eq) de todos los combustibles fósiles, incluyendo todos los derivados del petróleo, gas fósil y sólidos que sean usados para combustión. (...)”

De acuerdo con el artículo 222 de la Ley 1819 de 2016, modificado por el artículo 48 de la Ley 2277 de 2022, y considerando las excepciones previstas en los párrafos 3, 4, 5 y 6 del mismo cuerpo legal, se estableció una tarifa específica basada en el factor de emisión de GEI para cada tipo de combustible. Esta tarifa se expresa en unidades de peso (kilogramos de CO₂ equivalente) por unidad energética (terajulios), calculada según el volumen o peso del combustible.

Para el año 2025, la tarifa corresponde a \$27.399,14 por cada tonelada de CO₂eq emitido, según lo estipulado por la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN)⁵. Es importante señalar que este valor debe ser ajustado anualmente conforme a las tasas de inflación, más un punto porcentual.

⁵ Resolución 000008 del 31 de enero de 2025, por la cual se ajustan las tarifas del Impuesto Nacional a la gasolina, y al ACPM, y del impuesto nacional al carbono, expedida por la DIAN.

6.6. Sección 5: Escenario de Aplicación Hipotético del Instrumento en el contexto del proceso de Licenciamiento Ambiental.

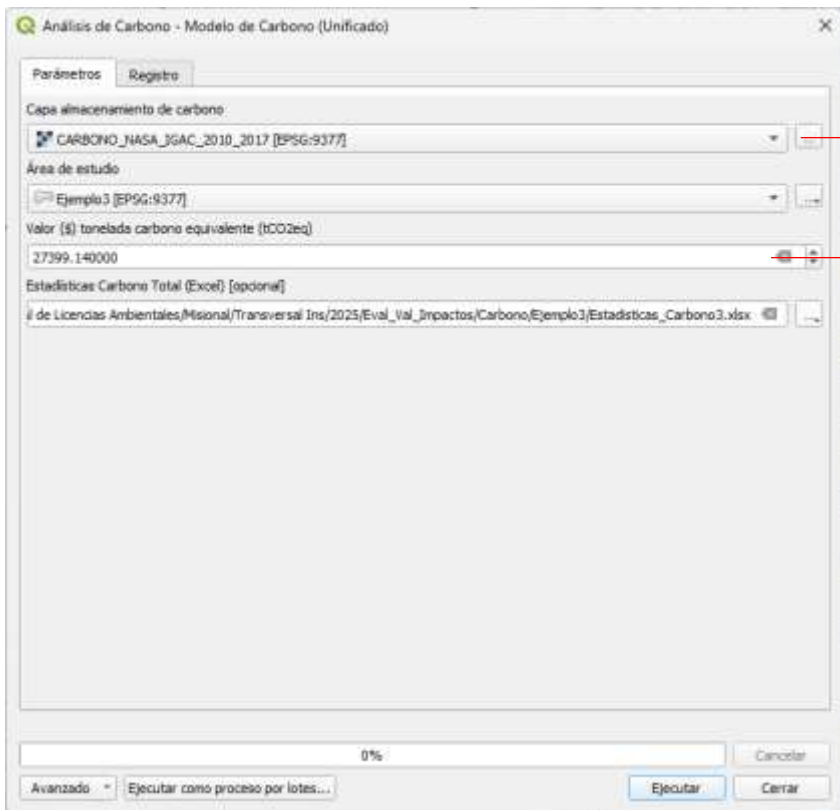
Todos los factores reportados para el cálculo de valor medio de almacenamiento de carbono por hectárea, según tipo de cobertura, son valores de referencia que presentan ciertas limitaciones, como se expuso en la parte introductoria. Estos datos de referencia pueden ser ajustados con cifras más precisas, conforme se recolecte información en campo o se produzca información científica referente al área de estudio.

A continuación, se presenta un ejemplo de la aplicación del presente instrumento para la cuantificación del stock de carbono para un proyecto hipotético (Ilustración 17).

Para el caso del geoproceso el proceso se ha sistematizado siguiendo estos pasos:

- 1- En la ventana de solicitud de información para el análisis en la pestaña “**Parámetros**” se agrega la información espacial en el campo “**área de estudio**”, para este caso hipotético se sube la capa “Ejemplo3” (formato shape polígono) que hace referencia a un área de intervención de 344 hectáreas.
- 2- En la casilla “**Valor (\$) tonelada carbono equivalente (tCO₂eq)**”, que para este caso es el valor de la tCO₂eq del impuesto al carbono del año 2025 que es de \$27.399,14.

Ilustración 17. Ejemplo del cálculo de valor económico del carbono almacenado transformado a tCO₂eq.



Capa “Ejemplo”
344 hectáreas.

tCO₂eq del impuesto
\$27.399,14 año 2025

Fuente: ANLA, 2025

- 3- De forma automática el geoproceso genera una tabla con los valores de almacenamiento de carbono por sumidero que para el caso ejemplo es de 82.005 Tc, su conversión a tCO₂eq que es de 300.957 y su proyección al valor económico utilizando el impuesto al carbono del año 2025, resultando en **\$ 8.245.973.682**. Sin embargo, y ya que se ofrecen los valores discriminados por sumidero, el usuario puede utilizar los valores por separado de acuerdo con sus fines de análisis (Tabla 6).

Tabla 6. Tabla de salida del geoproceso que muestra datos biofísicos y monetarios del contenido de carbono.

Métrica	Valor
Área Polígono Estudio (ha)	344
Valor tonelada carbono equivalente (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 27.399
tC_sub (ton)	41500
tC_sub_incer (ton)	33417
tC_aereo (ton)	34066
tC_aereo_incer (ton)	2226
tC_suelo (ton)	6439
Carbono Total (ton)	82005
C_sub (tCO ₂ eq)	152305
C_suelo (tCO ₂ eq)	23629
C_aereo (tCO ₂ eq)	125023
C_total (tCO₂eq)	300957
Valor Sub (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 4.173.017.948
Valor Suelo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 647.422.705
Valor Aereo (tCO ₂ eq) (\$)	\$ 3.425.533.029
Valor Total (tCO₂eq) (\$)	\$ 8.245.973.682

Fuente: ANLA, 2025

6.7. Datos referentes de carbono almacenado por coberturas de la tierra y subcuencas hidrográficas en Colombia

En el contexto de fortalecer y ampliar la información sobre los factores de almacenamiento de carbono para coberturas CLC, se desarrolló un análisis que arroja un valor de referencia promedio del carbono almacenado en diferentes coberturas del suelo, con respecto a las cuencas hidrográficas del territorio colombiano.

Para ello, el ráster de carbono del geoproceso fue cruzado con dos capas vectoriales para estructurar las unidades espaciales de análisis: las Subzonas hidrográficas de Colombia realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2013) (Minambiente, 2014), y el mapa de coberturas Corine Land Cover (CLC) Colombia 2010–2012 (IDEAM, 2014).

La matriz resultante que integra estos datos se presenta en el Anexo 1.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El geoproceso desarrollado permite cuantificar el carbono almacenado tanto en coberturas vegetales naturales como en zonas intervenidas (cultivos, pastos, entre otros), integrando datos geoespaciales de biomasa aérea, subterránea y carbono orgánico del suelo. Esto proporciona una base técnica sólida para estimaciones biofísicas y económicas a distintas escalas territoriales.
- El modelo incorpora valores de incertidumbre asociados al carbono aéreo y subterráneo, fundamentales para evaluar la calidad de los datos. La clasificación de incertidumbre guía el grado de confiabilidad y permite establecer la toma de decisión sobre el alcance y usos a la información obtenida.
- La metodología integra de manera explícita el precio oficial del impuesto al carbono emitido por la DIAN y expresado en términos de costo por tonelada de CO₂ equivalente. Este vínculo directo entre la valoración física y la monetaria simplifica la comprensión de los resultados, facilita su uso en evaluaciones económicas y genera un marco objetivo para incorporar el costo del carbono en procesos de licenciamiento.
- La integración del ráster de carbono con coberturas CLC y subzonas hidrográficas permite obtener valores promedio específicos por unidad espacial (CLC–subcuenca), facilitando la construcción de valores de referencia nacionales para la valoración económica del carbono

Recomendaciones

- Se recomienda considerar los resultados del geoproceso tanto en la formulación de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) que estén en proceso de evaluación, así como en el cumplimiento de obligaciones durante la etapa de seguimiento a licencias ambientales, enfocados a temas de

carbono, siempre que los niveles de incertidumbre sean aceptables (<20%) y se apliquen ajustes conservadores cuando sea necesario.

- Para mejorar la confiabilidad del análisis, los usuarios deben priorizar áreas con incertidumbre menor al 20%, o en su defecto, aplicar ajustes conservadores en zonas con mayor error, según estándares internacionales como VCS o IPCC.
- Actualizar periódicamente la matriz de referencia utilizando versiones recientes del CLC y datos mejorados de carbono de la misma fuente NASA, otras fuentes internacionales, o fuentes nacionales con un alcance de medición de varias coberturas de la tierra que pueda ser utilizada como fuente principal, como se tiene para el COS nacional.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bagolle, A., Costella, C., y Goyeneche, L. 2023. Protección social y cambio climático: ¿cómo proteger a los hogares más vulnerables frente a las nuevas amenazas climáticas? División de Protección Social y Salud. Banco Interamericano de Desarrollo. Resumen de Políticas No. IDB-PB-00375.

Bolívar, A., Camacho, C., Ordoñez, N., Gutiérrez, J., Alvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G. F., Bunning, S., & Vargas, R. (2021). Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio. *Ecosistemas*, 30(2), 1–11.

Casiano-Domínguez, M. 2018. El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques* vol. 24, núm. especial, e2401894 Invierno 2018

Google. (s.f.). *Google Earth Engine datasets: Carbon*. Recuperado de <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/carbon?hl=es-419>

IDEAM (2013). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, noviembre de 2013, Bogotá, D. Colombia.

IDEAM. (2014). Mapa de coberturas de la tierra: Corine Land Cover (CLC) Colombia 2010–2012 [Base de datos geográfica].

IDEAM. (s.f.). Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono para Colombia SMBByC. Recuperado de <http://www.siac.gov.co/smbyc>

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (1995). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC (AR2). Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

Hisano, M., Searle, E. B., & Chen, H. Y. H. (2018). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 93 (1), 439–456.

Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G., & Piñeiro, G. (2017). The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 419–445.

Lal, R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304:1623-1627.

Minambiente. (2012). Política Nacional Para La Gestión Integral De La Biodiversidad Y Sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE). República de Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Departamento Nacional de Planeación (DNP) y Pontificia Universidad Javeriana (PUJ).

Minambiente. (2014). Subzonas hidrográficas de Colombia: Guía para su identificación y delimitación. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Minambiente. (2017). Política nacional de cambio climático / Luis Gilberto Murillo, Ministro (2016 - :); [Eds.] Dirección de Cambio Climático: Florián Buitrago, Maritza; Pabón Restrepo, Giovanni Andrés; Pérez Álvarez, Paulo Andrés; Rojas Laserna, Mariana; Suárez Castaño, Rodrigo. Bogotá, D. C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017. 290 pp. ISBN: 978-958-8901-65-7

Minambiente. (2020). Ficha informativa #4: Los mercados de carbono. Programa PMR Colombia.

https://www.minambiente.gov.co/images/abc_carbono_final29ago.pdf

MapBiomass Colombia. (s.f.). *Proyecto MapBiomass Colombia*. Recuperado de <https://colombia.mapbiomas.org/proyecto/>

NASA Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center. (2020). Global aboveground and belowground biomass carbon density maps for the year 2010.(Dataset ORNL_DAAC 1763). <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/ornl-cloud-global-maps-c-density-2010-1763-1>

Natural Capital Project. (s.f.). Carbon Storage and Sequestration: Module. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/carbonstorage.html>

Nordhaus, W. D. (2007). A review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45(3), 686–702.

Spawn, S. A., Sullivan, C. C., & Lark, T. J. et al. (2020). Harmonized global maps of above- and below-ground biomass carbon density for the year 2010 [Data set]. NASA Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1763>

Subdirección de Sostenibilidad y Negocios Ambientales. (2021). *Atlas de Carbono 2020 - DTPA* (DTPA - 202107). Parques Nacionales Naturales de Colombia.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2020). *Atlas de Carbono 2020*. Recuperado de <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/subdireccion-de-sostenibilidad-y-negocios-ambientales/sostenibilidad-financiera/beneficios-ecosistemas/regulacion-climatica/atlas-de-carbono/atlas-de-carbono-2018/>

Phillips, J. F., Duque, A. J., Yepes, A. P., Cabrera, K. R., García, M. C., Navarrete, D. A., Álvarez, E., & Cárdenas, D. (2011). *Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos*. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales -IDEAM-.

Santoro, M.; Cartus, O. (2021): ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2017 and 2018, v2. Centre for Environmental Data Analysis, 17 March 2021. doi:10.5285/84403d09cef3485883158f4df2989b0c. <https://dx.doi.org/10.5285/84403d09cef3485883158f4df2989b0c>