

Este documento responde a una versión preliminar del proceso de construcción del Protocolo para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo; documento que será publicado en el segundo semestre de 2024.

No está autorizada su reproducción total o parcial, solo se entrega para lectura como parte de la consulta pública para soportar la revisión de la metodología de carbono.



Protocolo

para la estimación de contenidos
de carbono en humedales del
Magdalena medio y bajo



HOJA LEGAL EN CONSTRUCCIÓN

Protocolo para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo

Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible (MADS)

Susana Muhamad González
Ministra de Ambiente y Desarrollo sostenible

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Ghisliane Echeverry Prieto
Directora general

Lina María Caballero
Subdirectora de ecosistemas e información ambiental

Elizabeth Patiño Correa
Subdirectora de estudios ambientales

Apoyo al convenio:
Liz Johana Díaz Cubillos
Juan David Turriago García
Diana Patricia Ramírez Aguilar
Maria Cecilia Cardona

Ecopetrol

Ricardo Roa Barragán
Presidente

Mauricio Jaramillo
Vicepresidente HSE

Gerencia de Sostenibilidad y Descarbonización
Equipo de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos

Santiago Martínez Ochoa
Gerente de Sostenibilidad y Descarbonización

Xiomara Sanclemente
Lider de Capital Natural

Apoyo al convenio:
Claudia Lorena Ortiz Melo
Maria Juliana Salcedo Hernández
María Farfán Plazas
Viviana Romero Ramírez

Centro de Innovación y Tecnología - ICP
Nidya Virginia Medina Novoa
Marlon Serrano Gómez
Oscar Mauricio Casas Leuro

Gerencia de Excelencia y Administrativa
Adriana Patricia Velandia
Sergio Denis Gonzalez Rojas

Fundación Natura Colombia

Clara Ligia Solano Gutierrez
Directora ejecutiva

Nancy Vargas
Subdirectora técnica
Lorena Franco
Subdirectora técnica

Sandra Galán
Subdirectora técnica

Mauricio Rosas
Jefe financiero y contable

Andrea Gutiérrez de Piñeres
Jefe administrativa y de gestión humana

Eliana Marcela Garzón Fierro
Jefe de comunicaciones

Gustavo Segura
Jefe de proyecto CO2 Humedales

Autores

Equipo técnico CO2 Humedales

Claudia Patricia Andramunio-Acero
Profesional monitoreo de carbono
Lider técnica del protocolo

Yesid Fernando Rondón-Martínez
Profesional de apoyo transversal

Yennifer García Murcia
Profesional de biomasa y materia orgánica muerta

Yenny Beatriz Mendoza Plazas
Profesional de suelos y sedimentos

Mónica Tatiana López-Muñoz
Profesional de biodiversidad

Luis Alfredo Moreno Pérez
Profesional de apoyo local

Jhenny Liliana Salgado
Profesional estadístico y gestión de la información

Lina María Parada Alzate
Profesional SIG agua y biodiversidad

Patricia Téllez
Sidney Adriano Pérez
Luz Patricia Hernández Arango
Profesionales SIG Datos de Actividad

Colaboradores técnicos

Profesionales de campo y análisis:
José Andrés Posada-García
Nathalie Morales García
Javier Sunyer MacLennan
Liliana Ospina Calle
Carolina Bustamante-Gil
Osvar Cupitra
Santiago Cañón Escobar

Profesionales Fundación Natura de apoyo en el proceso de formulación e implementación:
Michelle Hernández Fernández
Cristhian Alfonso Pimiento Ordóñez
José Manuel Pantoja
Sandra Milena Palacio Taborda
Nicolas Romero-Peña

Diseño y diagramación

Dannyth Fandiño
Lider de comunicaciones CO2 humedales

Diego Alejandro Quintero Candela
Diseñador gráfico CO2 Humedales

Alejandro Peña García
Comunicaciones Fundación Natura Colombia

Corrección de estilo

Por definir.

Cítese como:

Andramunio-Acero, et al (2024). Protocolo para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo. Fundación Natura Colombia, Ecopetrol e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Colombia.

ISBN: XXX-XXX-XXXXXX-X-X
ISBN digital: XXX XXX XXX

Aviso legal

© Fundación Natura Colombia
Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de esta cartilla para fines educativos u otros fines no comerciales, con previa autorización de los titulares de los derechos de autor y citando la fuente. Se prohíbe la reproducción de este documento para fines comerciales.

ACRÓNIMOS, SIGLAS Y CONVENCIONES

AFOLU	Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra
AUNAP	Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca.
AVC	Alto Valor de Conservación
BA	Biomasa Aérea
BARA	Biomasa Arbórea Aérea
BARS	Biomasa Arbórea Subterránea
BNAA	Biomasa No Arbórea Aérea
BNAS	Biomasa No Arbórea Subterránea
BUR	Informe Bienal de Actualización
C	Carbono
CAR	Corporación Autónoma Regional
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CIFOR	The Center for International Forestry Research
CLC	Corine Land Cover
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DA	Datos de Actividad
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho
EE	Enraizada Emergente
EF	Enraizada con hojas Flotantes
EH	Enraizada en Zonas Húmedas
ENA	Estudio Nacional del Agua
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
FC	Factor de conversión de carbono
FSC	Forest Stewardship Council
GEE	Google Earth Engine
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPS	Sistema de Posicionamiento Global a partir de satélites
GDB	Geodatabase de archivos
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MCP	Monitoreo Comunitario Participativo
MCPPe	Monitoreo Comunitario Participativo Pesquero
MEC	Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia
MO	Materia Orgánica
MOM	Materia Orgánica Muerta
MOS	Materia Orgánica del Suelo
MRV	Medición/Monitoreo, Reporte y Verificación

SIAC	Sistema de Información Ambiental de Colombia
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINA	Sistema de Información Ambiental
SINGEI	Sistema Nacional de Inventario de Gases de Efecto Invernadero
SMBYC	Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono
SWAMP	Proyecto Mainstreaming Wetlands into the Climate Agenda: A multi-level approach
TS	Transparencia Secchi
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
EPA	Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
Zeü	Zona fótica
ZM	Zonas de Muestreo

TABLA DE CONTENIDO

CONTEXTO GENERAL

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES Y CONTEXTO GENERAL

OBJETIVOS

ALCANCE

MARCO DE REFERENCIA

IMPORTANCIA DE ESTE PROTOCOLO

METODOLOGÍA

ETAPA DE PREMUESTREO

CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS
DE CARBONO DESDE DATOS DE ACTIVIDAD DA Y FACTORES DE
EMISIÓN FE

ETAPA DE MUESTREO

ETAPA DE ANÁLISIS

INDICADORES AMBIENTALES

ESTRATEGIA PARA LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN

RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS TÉCNICOS

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DEFINICIONES EMPLEADAS EN LAS SUBCATEGORÍAS DE USO Y CAMBIO DE USO DE LA TIERRA PARA HUMEDALES EN EL BUR-3 (2022).....	26
TABLA 2. CRITERIOS DE COMPARACIÓN Y VALORES NUMÉRICOS DEL PAJ. TOMADO Y AJUSTADO DE (SAATY, 2008).	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 3. REPRESENTATIVIDAD DE ECOSISTEMAS SÍNTESIS ACUÁTICOS PARA EL ÁREA HIDROGRÁFICA DEL MAGDALENA-CAUCA (MEC, 2017).	40
TABLA 4. EXTENSIÓN DE ECOSISTEMAS DE HUMEDAL POR TIPO DE AMBIENTE SEGÚN EN MEC PARA LA CUENCA MAGDALENA MEDIO Y BAJO (MEC, 2017).....	40
TABLA 5. DETALLE POR TIPO DE COBERTURA PARA LOS ECOSISTEMAS DE HUMEDAL DE LA CUENCA MAGDALENA MEDIO Y BAJO (MEC, 2017).....	41
TABLA 6. HUMEDALES DECLARADOS COMO SITIOS RAMSAR DE COLOMBIA PARA EL ÁREA HIDROGRÁFICA MAGDALENA-CAUCA.	42
TABLA 7. PLANES DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (POMCAS) PARA LA CUENCA DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. ZH: ZONA HIDROGRÁFICA, SZH: SUBZONA HIDROGRÁFICA	43
TABLA 8. CRITICIDAD POR SUBZONAS POR ÁREA HIDROGRÁFICA Y POR CATEGORÍA DE ANÁLISIS SEGÚN EL ENA (2018).	45
TABLA 9. SITIOS SUBPRIORITARIOS DEL PORTAFOLIO DE AGUA DULCE CON NIVEL DE IMPORTANCIA DEL SITIO DE CONSERVACIÓN CON PRIORIDAD A CORTO PLAZO (TNC Y CORMAGDALENA, 2011).	47
TABLA 10. CATEGORÍAS DE ESCALAS Y SU RESPECTIVO NIVEL DE DETALLE CARTOGRÁFICO (IGAC, 2018).....	55
TABLA 11. LISTADO DE ENTIDADES Y PLATAFORMAS WEB EN LAS QUE SE REALIZA LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA RELACIONADA CON HUMEDALES PARA COLOMBIA.	55
TABLA 12. HOMOLOGACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE SUELOS A CLASES IPCC.....	59
TABLA 13. HOMOLOGACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE USOS A CLASES IPCC.....	61
TABLA 14. IMÁGENES DE SATÉLITE ADECUADAS PARA LAS DIFERENTES ESCALAS CARTOGRÁFICAS...	65
TABLA 15. CÓDIGO DESARROLLADO EN GOOGLE EARTH ENGINE PARA LA DESCARGA DE COMPUESTOS DE MEDIANAS DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1.	66
TABLA 16. CÓDIGO DESARROLLADO EN GOOGLE EARTH ENGINE PARA LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA CON EL ALGORITMO RANDOM FOREST.	70
TABLA 17. EJEMPLO DE LA ASIGNACIÓN DE ZONAS DE MUESTREO IDENTIFICADAS A PARTIR DEL PROCESO DE HOMOLOGACIÓN EN UN HUMEDAL DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO (COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA).....	77
TABLA 18. COMPARTIMIENTOS DE CARBONO. MODIFICADO DEL IPCC (2003) Y BIOCARBON FUND (2008). ADAPTADO PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO*	79
TABLA 19. BANDAS ESPECTRALES DE LAS IMÁGENES SENTINEL-2 (GATTI ET AL., 2015).	83

TABLA 20. RELACIÓN DE COLORES EN LA COMBINACIÓN RGB:8/4/2 Y LAS COBERTURAS DE LA TIERRA.	86
TABLA 21. INTERPRETACIÓN DEL ÍNDICE DE PROMEDIO ANUAL DE LA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE POR TIPO DE COBERTURA.....	100
TABLA 22. CÓDIGO DESARROLLADO EN GOOGLE EARTH ENGINE PARA LA DESCARGA DE COMPUESTOS DE MEDIANAS DE IMÁGENES ÓPTICAS SENTINEL-2.	105
TABLA 23. ECUACIONES Y FUNCIONALIDAD DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES PROPUESTOS PARA EL MONITOREO DE LOS HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. NIR: INFRARROJO CERCANO, SWIR: INFRARROJO DE ONDA CORTA.	106
TABLA 24. CÓDIGOS DESARROLLADOS EN GOOGLE EARTH ENGINE PARA EL CÁLCULO DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES.....	107
TABLA 25. DEFINICIÓN DE DEPÓSITOS DE CARBONO ASOCIADOS A LA BIOMASA. MODIFICADO DE YEPES ET AL., (2011); CISNEROS-DE LA CRUZ ET AL (2021).	114
TABLA 26. COMPONENTES DE VEGETACIÓN PARA LA CAPTURA DE CO ₂ EN HUMEDALES.....	115
TABLA 27. DEFINICIÓN DE DEPÓSITOS DE CARBONO ASOCIADOS A LA BIOMASA. DEFINICIÓN DE VARIABLES PARA LA DETERMINACIÓN DE BIOMASA EN COBERTURA TIPO BOSQUE, NO BOSQUE Y MATERIA ORGÁNICA MUERTA (MOM).	118
TABLA 28. CLAVE SIMPLIFICADA DE LOS ÓRDENES DE SUELOS DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DEL USDA (SSS, 2010).	131
TABLA 29. CLASIFICACIÓN DE SUELOS ORIENTADO AL MONITOREO DE SUELOS PARA ESTIMACIONES DE GEI (IPCC, 2006).	132
TABLA 30. DETALLE PARA LA DEFINICIÓN DEL SUELO SEGÚN MATERIA DE ORIGEN.	134
TABLA 31. ORDEN DE LOS SUELOS PARA PROCESOS DE HOMOLOGACIÓN.	134
TABLA 32. TIPOS DE ARCILLAS PARA PROCESOS DE HOMOLOGACIÓN DE SUELOS.....	134
TABLA 33. PROPUESTA DE HOMOLOGACIÓN DE SUELOS PARA EL PROTOCOLO DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO (C)	137
TABLA 34. VARIABLES A MONITOREAR PARA LA ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO EN SUELOS Y SEDIMENTOS.....	138
TABLA 35. VARIABLES BIOLÓGICAS PROPUESTAS PARA EL LEVANTAMIENTO DE LA LÍNEA BASE Y EL MONITOREO.	147
TABLA 36. VARIABLES COMPLEMENTARIAS PROPUESTAS PARA EL LEVANTAMIENTO DE LA LÍNEA BASE Y EL MONITOREO.....	148
TABLA 37. MÉTODOS PROPUESTOS PARA EL LEVANTAMIENTO EN CAMPO DE LAS VARIABLES CONSIDERADAS PARA CADA GRUPO.	150
TABLA 38. MODELOS ALOMÉTRICOS GENERALES A CONSIDERAR PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA ÁREA DE ÁRBOLES Y PALMAS DE HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO.....	154
TABLA 39. ECUACIONES ALOMÉTRICAS GENERALES PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA SUBTERRÁNEA.	154
TABLA 40. EJEMPLO DE REPORTE DE CONTENIDOS DE CARBONO DE LA COBERTURA POR SITIO DE MUESTREO (ESTRATO).....	157

TABLA 41. VALORES POR INTENSIDAD DE LA ESCALA DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (PAJ) (SAATY, 2008).	172
TABLA 42. EJEMPLO DE MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS CON LA ESCALA DE VALORES DEL PAJ.	173
TABLA 43. EJEMPLO DE INICIATIVAS PARA MEDIDAS DE MITIGACIÓN/ADAPTACIÓN EN HUMEDALES.	182

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MARCO NORMATIVO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	16
FIGURA 2. LEY 1931 DE 2018: DIRECTRICES PARA LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA (TOMADO DE RENARE, 2019).	17
FIGURA 3. MARCO NORMATIVO DE SUELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO EN COLOMBIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	18
FIGURA 4. MARCO NORMATIVO DE LA BIODIVERSIDAD EN COLOMBIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024)	19
FIGURA 5. MATRIZ DE INFLUENCIAS DIRECTAS (MID) PARA LA CAPTURA DE DATOS DE INFLUENCIA Y DEPENDENCIA DE LOS MOTORES DE TRANSFORMACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024)	36
FIGURA 6 INTERPRETACIÓN PARA EL RESULTADO DEL ANÁLISIS PROSPECTIVO MICMAC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	37
FIGURA 7. ETAPAS DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE LA VENTANA DE MONITOREO PARA LA ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO EN HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	39
FIGURA 8. MAPA DE RIESGO MUNICIPAL FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CUENCA DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	46
FIGURA 9. ETAPA DE PREPROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL ANÁLISIS DE EXTENSIÓN DE HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	66
FIGURA 10. FASES PARA LA EJECUCIÓN DE RANDOM FOREST EN GOOGLE EARTH ENGINE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	69
FIGURA 11. EJEMPLO DE LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENTRENAMIENTO PREVIO A LA EJECUCIÓN DEL ALGORITMO RANDOM FOREST EN GEE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	70
FIGURA 12. SUMA ALGEBRAICA DE LOS RÁSTER CLASIFICADOS PARA EL PERIODO SECO DE LAS TEMPORALIDADES DE 2016 Y 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	73
FIGURA 13. RECLASIFICACIÓN DEL RÁSTER RESULTADO DE LA SUMA POR TEMPORALIDADES. EJEMPLO PERÍODO SECO (DICIEMBRE A FEBRERO) DE LOS AÑOS 2016 Y 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	73

FIGURA 14. FILTRADO DEL RÁSTER RESULTADO DE LA RECLASIFICACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	74
FIGURA 15. CONVERSIÓN DE RÁSTER A POLÍGONO Y SU TABLA DE ATRIBUTOS CON EL CÁLCULO DEL ÁREA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	74
FIGURA 16. PROCESO DE ELIMINACIÓN DE POLÍGONOS CON ÁREAS MENORES A 25 HA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	75
FIGURA 17. PROCESO DE DIFERENCIACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE HUMEDAL Y NO HUMEDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	76
FIGURA 18. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA LA DETECCIÓN DE DATOS DE ACTIVIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	82
FIGURA 19. EJEMPLO DE IMAGEN DE SATÉLITE SENTINEL 2-A, MAPA DE PUNTOS DE ENTRENAMIENTO DE LAS CLASES DE COBERTURA Y SU TABLA DE ATRIBUTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	86
FIGURA 20. TABLA DE ATRIBUTOS DEL RÁSTER RESULTANTE DE APLICAR LA HERRAMIENTA "COMBINE". FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	97
FIGURA 21. TABLA DE ATRIBUTOS COMPARATIVA DEL RÁSTER COMBINE DE LAS COBERTURAS EN EL 2016 Y 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	98
FIGURA 22. TABLA DE ATRIBUTOS DEL RÁSTER DE CAMBIOS DE COBERTURAS DE LA TIERRA (GANANCIAS, PÉRDIDAS Y ESTABLE). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	98
FIGURA 23. TABLA DE ATRIBUTOS DEL <i>SHAPEFILE</i> (POLÍGONO) DE CAMBIOS DE COBERTURA ENTRE LOS AÑOS 2016 A 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	99
FIGURA 24. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE ÍNDICES ESPECTRALES PARA EL MONITOREO DE HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	104
FIGURA 25. ARCHIVOS DE ENTRADA Y ARCHIVO DE SALIDA PARA EL PROCESO DE CÁLCULO DE ESTADÍSTICOS ZONALES COMO TABLA. FUENTE: TOMADO Y AJUSTADO DE HTTPS://DESKTOP.ARCGIS.COM/ES/ARCMAP/LATEST/TOOLS/SPATIAL-ANALYST-TOOLBOX/HOW-ZONAL-STATISTICS-WORKS.HTM	111
FIGURA 26. ZONIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	116
FIGURA 27. DISEÑO DE LA PARCELA PARA LA ESTIMACIÓN DE DEPÓSITOS DE CARBONO ASOCIADOS LA VEGETACIÓN EN HUMEDALES CONTINENTALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	121
FIGURA 28. SUBPARCELAS PARA MOM (HOJARASCA) EN PARCELA PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	121
FIGURA 29. PRINCIPALES TRANSFORMACIONES DE CARBONO EN LOS HUMEDALES MODIFICADO DE (HERNÁNDEZ, 2010).	123
FIGURA 30. MUESTREO DE BIOMASA DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	125
FIGURA 31. MUESTREO DE BIOMASA DE HERBÁCEAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	126

FIGURA 32. MUESTREO DE BIOMASA DE COBERTURA TIPO BOSQUE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	127
FIGURA 33. METODOLOGÍA PARA EL LEVANTAMIENTO EN CAMPO DE INFORMACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBÓREA Y NO ARBÓREA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024)...	128
FIGURA 34. MUESTREO DE MATERIA ORGÁNICA MUERTA (MOM). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	129
FIGURA 35. SUBPARCELAS PARA MOM (HOJARASCA O MANTILLO) EN PARCELA PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	129
FIGURA 36. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL BOTÁNICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	130
FIGURA 37. PROPUESTA DE HOMOLOGACIÓN DE SUELOS USDA-IPCC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	136
FIGURA 38. CÁMARA DE MEDICIÓN DE FLUJO DE CO ₂ EN SUELOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	140
FIGURA 39. DETALLE DE LA PARCELA Y UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO A: SUELOS Y B: SEDIMENTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	142
FIGURA 40. TÉCNICA PARA TOMAR MUESTRAS DE DENSIDAD APARENTE DEL SUELO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	143
FIGURA 41. EJEMPLO DE ALGUNOS DE LOS MÉTODOS DE CAMPO PROPUESTOS PARA LOS GRUPOS Y VARIABLES BIOLÓGICOS. FOTOGRAFÍAS: EQUIPO BIODIVERSIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	153
FIGURA 42. PROCESO PARA LA ESTIMACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO PARA LOS COMPARTIMIENTOS DE BIOMASA Y MOM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	156
FIGURA 43. PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CONTENIDOS DE CARBONO DE CADA COMPARTIMIENTO (BIOMASA Y MOM). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).....	158
FIGURA 44. EJEMPLO DE ALGUNOS DE LOS PROCEDIMIENTOS NECESARIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA DE ALGAS (FITOPLANCTON Y FICOPERIFITON) Y MACROINVERTEBRADOS. FOTOGRAFÍA: LILIANA MARCELA OSPINA-CALLE Y JOSÉ ANDRÉS POSADA-GARCÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	164
FIGURA 45. MODELO JERÁRQUICO DISEÑADO PARA IDENTIFICAR ZONAS CON ALTOS VALORES DE CONSERVACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	171
FIGURA 46. PROPUESTA DE ESTRUCTURA DE BASE DE DATOS DE CARBONO EN HUMEDALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	177
FIGURA 47. PASOS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	178
FIGURA 48. RUTA PROPUESTA PARA LA IDENTIFICACIÓN, PLANTEAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE INICIATIVAS DE CONSERVACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	182
FIGURA 49. LINEAMIENTOS METODOLÓGICOS PARA EL MCP. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2024).	185

INTRODUCCIÓN

De manera natural, un ecosistema tiene la capacidad de autorregularse a partir de procesos que año tras año han moldeado su estado, dando con esto posibilidades para el desarrollo de la vida en todas sus expresiones. Esto depende en gran medida de interacciones entre factores físicos, químicos y biológicos que terminan expresando un sinnúmero de ambientes alrededor del planeta, con condiciones tan particulares como extremas.

La alteración de esta naturalidad es en esencia un proceso arraigado a la ineludible necesidad de la vida misma por hacerse fuerte, el principio de la evolución; con ello, cada ser vivo pone a prueba sus habilidades para mantener la historia de su especie en el tiempo, expresando adaptaciones que les permitan perpetuarse, pese a las posibles adversidades que esto conlleve. El cambio climático, es por supuesto un evento natural; la historia del planeta tierra describe procesos extremos que han llevado inclusive a extinciones masivas, imperceptibles para el ojo humano, pero que dan cuenta de la inclemencia de la naturaleza en sí. En la actualidad, el planeta atraviesa por un proceso de calentamiento debido a la modificación en la inclinación de su propio eje con relación al sol, alterando con esto la temperatura habitual de cada región y, por tanto, las condiciones de la vida misma.

El antropoceno, como se le conoce a la era geológica del hombre, trajo consigo un efecto catalizador al calentamiento global, producto de acciones que van desde el uso de recursos para subsistencia, pasando por el incremento de la población y con ello la creciente demanda de consumo, hasta procesos de asentamientos e industrialización.

La sumatoria de estos impactos locales genera efectos a diferentes escalas, comprometiendo no solo la viabilidad del hombre como especie, sino también la de todo el planeta; el uso de combustibles fósiles genera, por ejemplo, la emisión de sustancias como el dióxido de Carbono (CO_2) a la atmósfera, creando una cortina que impide la salida de los rayos del sol, aumentando la temperatura del planeta.

Esto genera un fenómeno conocido como “efecto invernadero”, lo que a su vez modifica las condiciones locales del clima, alterando por ejemplo el régimen de lluvias y los ciclos biogeoquímicos de los diferentes elementos, desencadenando una gran cantidad de alteraciones y afectaciones a las dinámicas naturales en los ecosistemas, que van desde

cambios en la estructura y composición del suelo, pasando por sequías e inundaciones, hasta eventos de extinción local de la biodiversidad.

Algunos ecosistemas son considerados estratégicos, no sólo por su aporte en la mitigación y adaptación al cambio climático, sino también por la amplia oferta de servicios ecosistémicos con los que cuentan, tal es el caso de los humedales. Dentro de sus grandes bondades, se encuentra la amortiguación de inundaciones, reduciendo la velocidad del agua y la cantidad de material que con ella deriva, la oferta de agua y alimento por la diversidad que albergan, y la capacidad para almacenar carbono que no será emitido a la atmosfera; sin embargo, las acciones que actualmente se presentan en estos ecosistemas pasan por la modificación hidráulica que desconoce su función ecológica, lo que supone un reto enorme de articulación entre los diferentes actores encargados de tomar decisiones para su adecuada gestión.

La visión a escala de cuenca a partir de un análisis multicriterio, puede resultar en un mecanismo que permita tomarle ventaja al cambio climático en una carrera que transcurre a gran velocidad, y que de momento nos deja en una posición de desventaja; vincularnos como sociedad, conocedores de nuestro impacto en el corto, mediano y largo plazo es un excelente punto de partida, avanzando en la generación de conocimiento que permita proponer acciones cada vez más robustas.

Colombia es un país de humedales, el agua moldea y conecta los ecosistemas, de modo que es posible encontrar humedales en tierras medias y bajas, así como también en la alta montaña. En particular, la región Andina, concentra los centros poblados más importantes del territorio nacional, aporta más del 70% del PIB y a su vez se baña con las aguas de la cuenca del Río Magdalena, lo que la convierte en la arteria fluvial más importante del país; esta zona cuenta además con una gran extensión de bajos inundables al interior de sus valles interandinos, que reciben y amortizan los impactos generados tras su recorrido hasta su descarga en el Mar Caribe.

La geografía de la región define en el tramo alto de la cuenca la mayor actividad erosiva, lavando material en su continuo, siendo los tramos medio y bajo las zonas de mayor depósito por medio de los pulsos de inundación anual que se generan por los dos momentos de lluvias. Esto en particular resalta la fragilidad de los humedales ante el cambio climático, ya que la alteración del patrón hidroclimatológico, sumado a la cantidad de presiones generadas por el hombre, comprometen su viabilidad.

Los avances generados para el entendimiento de estos ecosistemas se han concentrado en aspectos ligados a las dinámicas de conectividad hídrica, la oferta de servicios ecosistémicos, la gestión del riesgo y algunos aspectos ecológicos, particularmente de las comunidades biológicas que los habitan; sin embargo, en materia de cambio climático no es clara su función, y tampoco existe desde el sector ambiental un lineamiento concreto para su manejo.

Siendo Colombia un país adscrito a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ha generado avances en la medición de Gases Efecto Invernadero (GEI) a partir Comunicaciones Nacionales y los Informes Bienales de Actualización (BUR) para los módulos que establece el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) que constante mente buscan mejorar la exactitud y medición y con esto, proponer estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.



Con base en esto, este Protocolo pretende entregarle una herramienta al país para generar reportes de depósitos de Carbono para los ecosistemas de humedal, a partir de una metodología que incluye información para los compartimientos de suelo, sedimentos, biomasa, Materia Orgánica Muerta (MOM) y biodiversidad, de modo que pueda ser replicable en zonas que cuenten con condiciones aquí contempladas para su implementación.

DRMI-Ramsar Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fotografía: Cristhian Pimiento.

IMPORTANCIA DE ESTE PROTOCOLO

En materia de mediciones de GEI, el CMNUCC estableció un esquema de reportes para los países firmantes, el Sistema de Medición/Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV), lo que en Colombia fue establecido por medio de la Resolución 1447 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Gracias a este instrumento, el país cuenta con una herramienta para hacer seguimiento a las emisiones de GEI, actividad liderada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), quien de acuerdo a los módulos que plantea el IPCC establece los lineamientos nacionales y

además hace seguimiento al esquema de mediciones que actualmente se generan por medio de los BUR y anteriormente las Comunicaciones Nacionales (CN).

El proceso que ha llevado el MRV en Colombia ha dejado ver con el paso del tiempo mejoras en las metodologías utilizadas y así mismo el robustecimiento del esquema por medio de actualizaciones y nuevos reportes que abastecen el Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (INGEI), además de procesos de gestión relacionados con vincular a diferentes sectores socioeconómicos que contribuyan a su vez con información y con esto, proponer acciones concretas para la reducción de emisiones de GEI, tarea del Registro Nacional de Reducción de GEI (RENARE), organismo vigente desde septiembre de 2020 y que indirectamente mide los avances del país de cara a los compromisos adquiridos ante la CMUNCC por medio de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), donde Colombia proyectó para 2030 reducir su emisiones un 20% (IDEAM et al., 2021).

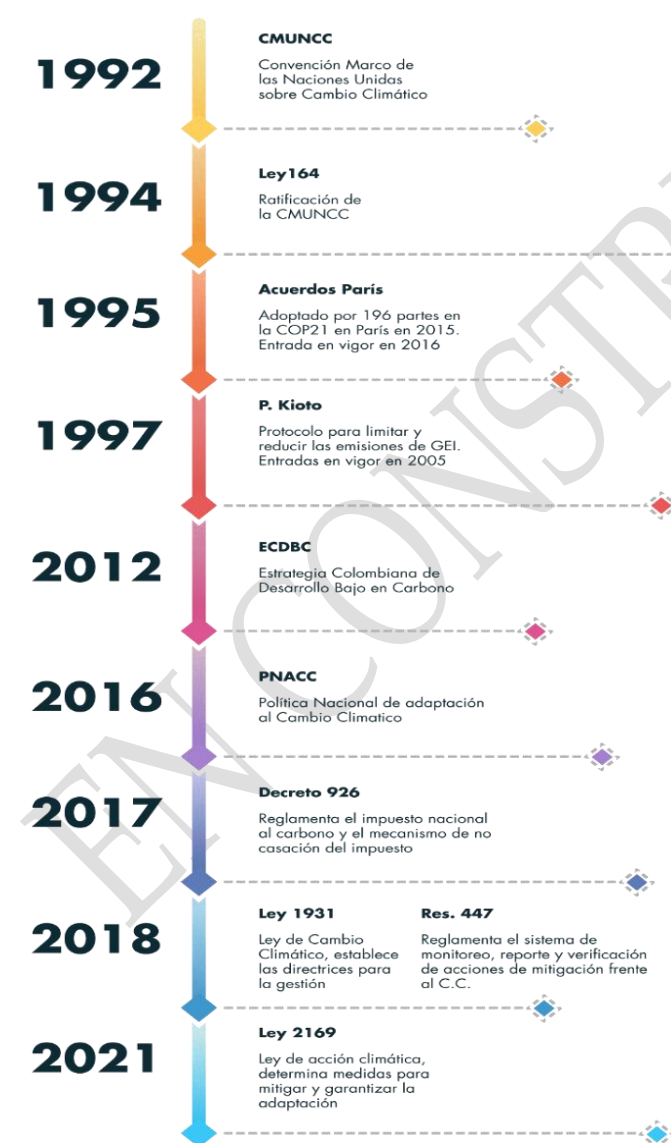
El sector AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Uses) tiene dentro de sus categorías a los humedales, siendo los humedales naturales (3B4) uno de sus intereses. Esta categoría hasta la fecha no ha generado reportes y, por tanto, se desconoce lo que sucede en estos ecosistemas en materia de emisiones de GEI. Esto podría cambiar en la medida que dentro del INGEI se empiece a incluir información de los contenidos de carbono en la vegetación y los suelos presentes en estos ambientes, teniendo especial cuidado con no generar dobles cuantificaciones o duplicidad en la información, teniendo en cuenta que para el país el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC) se enfoca particularmente en las coberturas vegetales de tipo bosque de tierra firme, por lo cual es importante excluir sus áreas de reporte en los límites del humedal natural a ser cuantificado.

Por lo anterior, generar reportes sobre los suelos y las coberturas vegetales de tipo “no bosque” presentes dentro de los ecosistemas definidos como humedales naturales en el Magdalena medio y bajo, contribuirán a las cuantificaciones de GEI para el sector AFOLU y con esto, aportar no solo a la generación de conocimiento sobre la función de los humedales en materia de cambio climático, sino también a los compromisos adquiridos como país en materia de reducción de emisiones. Adicionalmente, este protocolo incluye el compartimiento de biodiversidad como un nuevo eslabón para las estimaciones de contenidos de carbono nacional, partiendo de metodologías costo eficientes que permitan identificar el estado de esos ecosistemas estratégicos para el país y ponga sobre la mesa la importancia de su conservación para la mitigación de los efectos del cambio climático.

ANTECEDENTES

CAMBIO CLIMÁTICO

Desde 1992, las Naciones Unidas por medio de la CMUNCC adelantan esfuerzos para combatir el cambio climático, lo que se ratificó en Colombia mediante la Ley 164 de 1994. Desde ahí, el país se vinculó a diferentes acuerdos internacionales y a generar instrumentos locales, como la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), la Ley de cambio climático y el Reglamento para el Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación de mitigación frente al cambio climático (Figura 1).



“Colombia y en general Latinoamérica y el Caribe, tienen una baja emisión de GEI, sin embargo, presentan una alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático debido a las características geográficas, ecológicas y socioeconómicas de sus países, razón por la cual, los obliga a adaptarse en respuesta a los efectos del clima sobre sus territorios” (MADS, s.f.).

En particular, la Ley 1931 de 2018 es el instrumento que describe la participación de los actores vinculados a escala nacional y regional, desde el nivel ministerial hasta las administraciones locales, a partir de la formulación de instrumentos de gestión en calidad de planes, programas y proyectos.

Figura 1. Marco normativo de Cambio Climático en Colombia. Fuente: elaboración propia (2024).



Figura 2. Ley 1931 de 2018: directrices para la gestión del Cambio Climático en Colombia (Tomado de RENARE, 2019).

HUMEDALES

En 1971 se estableció la Convención Ramsar, a la que Colombia se vinculó por medio de la Ley 357 de 1997, que para 2002 se tradujo en la Política Nacional para los humedales interiores de Colombia.

“los humedales son ecosistemas estratégicos: su planificación y ordenamiento ambiental territorial deben basarse en perspectivas sistémicas por medio de enfoques multisectoriales para el diseño de estrategias de manejo, la articulación y participación de actores públicos, privados, de la sociedad civil y demás organizaciones” Ley 99 de 1993.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) reglamentó el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales por medio de la Resolución 157 de 2004, apalancándose en la adopción de la convención Ramsar para proponer Planes de Manejo Ambientales (PMA) para estos ecosistemas; esto se formalizó por medio de la Resolución 196 de 2006, oficializando en esta la Guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales de Colombia.

SUELOS



A través de la Ley 461 de 1998, Colombia se incorporó a la Convención de las Naciones Unidas en la lucha contra la desertificación (Figura 3). En el ámbito de los gases de efecto invernadero (GEI), los avances significativos no se materializaron sino hasta el siglo XXI con la promulgación de la Resolución 1447 de 2018, definiendo el Carbono orgánico y a la MOM como depósitos de carbono en el suelo, además de reconocer al CO₂ como un gas que aporta al calentamiento global, lo que contribuyó a la inclusión de este fenómeno natural en el Plan de Gestión del Riesgo de Desastres (2015-2030), un instrumento de gestión ambiental, manejado por las CARs.



Complejo Cenagoso de Zapatosa-sector de El Cerrito.
Fotografía: Yenny Mendoza

Figura 3. Marco normativo de suelos para la estimación de contenidos de Carbono en Colombia.
Fuente: elaboración propia (2024).

BIODIVERSIDAD

Uno de los hitos más importantes en materia de biodiversidad fue la creación del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables, oficializado por medio del Decreto 2811 de 1974, además de la Ley 99 de 1993, cuyo objetivo y mayor aporte fue la creación del Ministerio de Medio Ambiente, las CARs, el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y los institutos de ciencia del país (Figura 4).

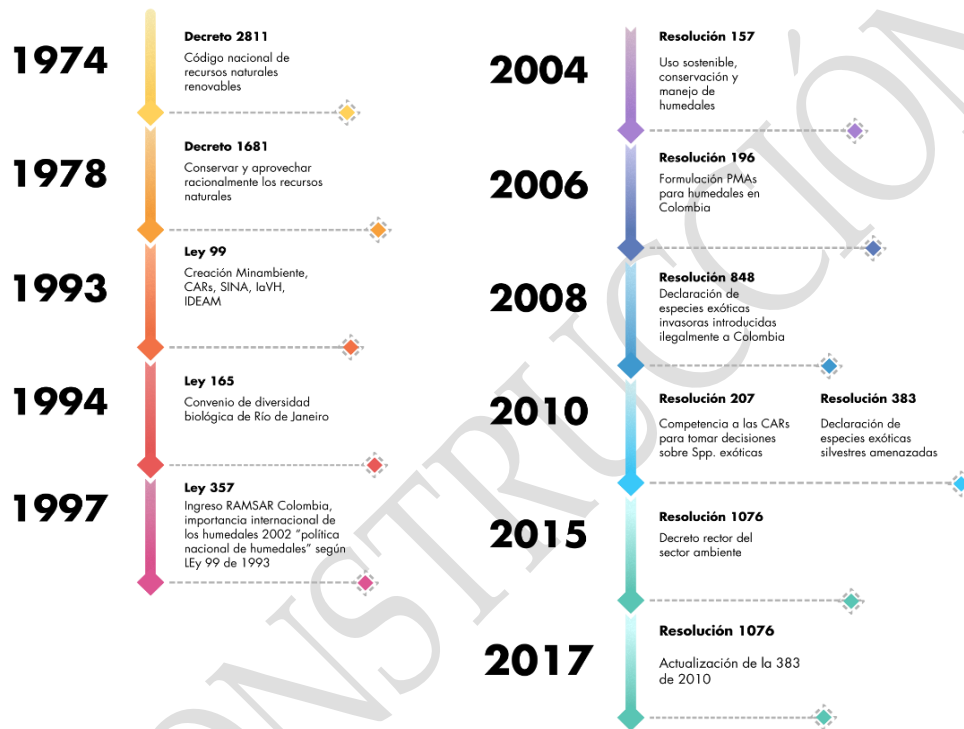


Figura 4. Marco normativo de la biodiversidad en Colombia. Fuente: elaboración propia (2024)



Además, y como compromiso internacional, el país se vinculó al convenio de diversidad biológica por medio de la Ley 165 de 1994. Toda esta normativa fue canalizada por la Resolución 1076 de 2015, instrumento vigente y rector del sector ambiental del país.

Complejo Cenagoso de Zapatosa - sector Isla Grande. Fotografía: Luis Alfredo Moreno.

OBJETIVOS

El objetivo general del protocolo es generar la metodología para la estimación de contenidos de carbono (C) en los diferentes compartimientos establecidos por el IPCC para los ecosistemas acuáticos colombianos, especialmente humedales del Magdalena medio y bajo, todo esto soportado por objetivos específicos, que a continuación se describen:

- ✦ Establecer, bajo criterios técnicos multidisciplinarios, los compartimientos y temporalidades a monitorear en humedales para la estimación de Carbono apoyados en información de línea base o en la necesidad misma de su generación bajo estándares nacionales.
- ✦ Establecer una definición operativa de humedal para estimar los datos de actividad, como los cambios e intervenciones de la superficie terrestre, según las directrices del IPCC y los avances nacionales, para ecosistemas de la cuenca del Magdalena medio y bajo.
- ✦ Estimar a partir de las categorías de datos de actividad (DA), los factores de emisión/remoción para ecosistemas de la cuenca del Magdalena medio y bajo.
- ✦ Visibilizar la biodiversidad acuática como un componente importante dentro de la estimación de contenidos carbono en ecosistemas de humedal.
- ✦ Trabajar en conjunto con los actores institucionales responsables de los reportes de cuantificación de carbono, de modo que los lineamientos generados por el protocolo puedan ser replicables a nivel nacional bajo los estándares de validación de los reportes frente al cambio climático.

ALCANCE

Este Protocolo es un instrumento de aplicación local y regional construido a partir de insumos cartográficos oficiales (escala 1:100.000) tomados como base para la estimación de contenidos de carbono en los compartimientos de suelos, sedimentos, biomasa y Materia Orgánica Muerta (MOM) y, además, para identificar Altos Valores de Conservación (AVC) para la biodiversidad que habita los humedales del Magdalena medio y bajo.

Para su validación, se realizaron dos ejercicios de muestreo considerando la temporalidad hidroclimatológica de la macro cuenca Magdalena-Cauca, cada uno para temporada seca (aguas bajas) y temporada de lluvia (aguas altas) respectivamente. La estimación de contenidos de carbono para la biomasa se enfoca en la vegetación acuática y de zonas de transición entre la superficie de agua y tierra firme, lo que excluye la vegetación contemplada por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC), esto con el fin de evitar duplicidad en la cuantificación. Para los suelos, se contemplan también los sedimentos presentes en los ecosistemas de humedal, tanto en las zonas de transición como en la cubeta misma.

En el caso particular de la biodiversidad acuática, además de establecer listados de riqueza y abundancia como línea base, se incorporan atributos ecológicos para la estimación de contenidos de carbono, tales como biomasa y biovolumen. Como complemento, se incluyen lineamientos para el desarrollo de ejercicios de Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) como herramienta vinculante en los esquemas de gobernanza local, que, a su vez, apunten a obtener una mayor cantidad de información en torno a los ecosistemas de humedal, y las acciones que podrían desarrollarse para hacer frente al cambio climático.

Las metodologías propuestas no solo se construyeron a partir de información primaria, sino también desde el planteamiento de esquemas de monitoreo por medio de herramientas de SIG y teledetección. Finalmente, toda la información contenida en este documento surtió un proceso de validación según los lineamientos establecidos por el Sistema Estadístico Nacional (SEN), de modo que pueda ser replicado e implementado, alineado con los organismos oficiales del país encargados de generar información.

Se establece entonces un concepto operativo que describe, en términos de extensión, altitud, vegetación, periodo de inundación, hidroclimatología y suelos, la aplicabilidad del instrumento; por lo anterior, se define operativamente el humedal como:

“Área ocupada por cuerpos de agua naturales lénticos interiores (dulceacuícolas) conectados total o parcialmente con algún afluente¹, ubicada entre² los 0 y 2800 m s.n.m. con una extensión de área total de inundación mínima³ de 25 h ocupada por vegetación hidrófita⁴ y con periodos de inundación anual⁵ de mínimo 90 días continuos”

¹Magnitud establecida según la temporalidad climática de la región.

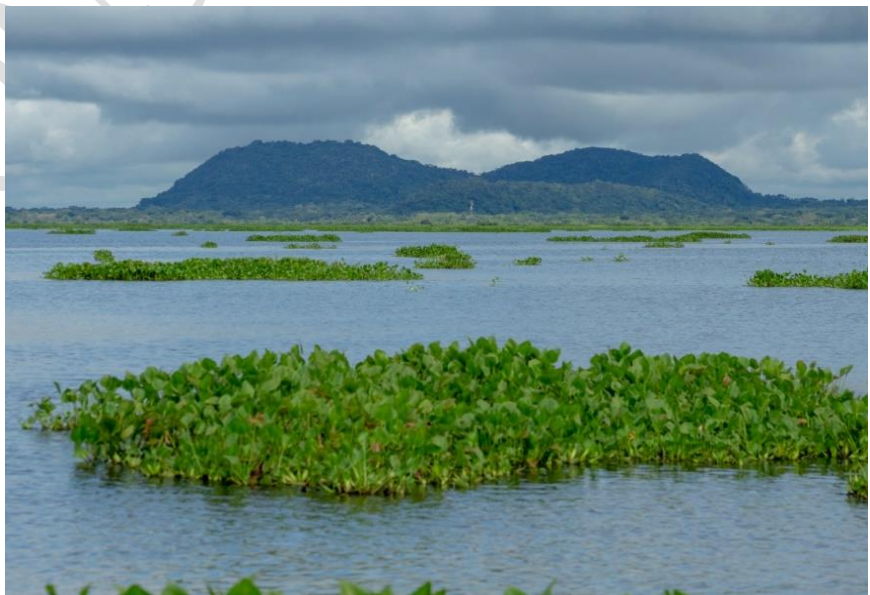
²Delimitación altitudinal de la Estrategia de Monitoreo de la Alta Montaña (EMA) del IDEAM (2019).

³Área mínima correspondiente a la escala cartográfica oficial nacional 1:100.000

⁴Se excluyen coberturas tipo bosque de tierra firme, tierras de cultivo y pastizales gestionados.

⁵Promedio de años normales, excluyendo eventos extremos.

Este protocolo va dirigido a los todos actores de Sistema Nacional Ambiental (SINA), Autoridades ambientales (Ministerios), Institutos de investigación, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), Autoridades locales y regionales y en general, a cualquier entidad del orden público o privado, interesada en el monitoreo de los humedales continentales del país, particularmente aquellos presentes en el Magdalena medio y bajo.



Complejo Cenagoso de Zapatosa - sector de Chimichagua. Fotografía: Cristhian Pimiento.



8 oct 2023 4:45:13 p. m.
9°10'10.068"N -73°41'44.718"W ±1.40m
Altitud:28.3m
Velocidad:0.3km/h

MARCO DE REFERENCIA

Los términos considerados en este marco de referencia incluyen desde el contexto general hasta los diferentes compartimientos que contiene el protocolo: suelos y sedimentos, biomasa vegetal y biodiversidad. Además, se proporcionan definiciones detalladas del componente de sistemas de información geográfica.

CONCEPTUALIZACIÓN GENERAL:

ECOSISTEMA

Se adopta la definición del Convenio de Diversidad Biológica (1992), complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos en su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional materializada en un territorio, la cual se caracteriza por presentar homogeneidad en sus condiciones biofísicas y antrópicas.

HUMEDAL

El Convenio Ramsar (1971) define a los humedales como cualquier extensión de marisma, pantano o turbera, o superficie cubierta de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.

Según IDEAM (2017) en el Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia, los humedales (ecosistemas transicionales) se definen como áreas donde el suelo está saturado de agua o permanece inundado una parte del año. Los ambientes transicionales (humedales) pueden tener diferente temporalidad en las inundaciones y el drenaje (Torres et al., 2011). Así, algunos pueden permanecer por más de seis meses al año. Su función es contribuir a la regulación de los excesos de agua que llegan a la zona y mantener una alta producción de recursos hidrobiológicos. En otros casos, pueden permanecer inundados de tres a seis meses durante el año, tiempo en el que las unidades de tierra se entrelazan con funciones de control de flujos de agua y producción biológica. Finalmente, otros pueden estar sujetos a inundaciones o encharcamientos durante lapsos inferiores a tres meses en el año.

Teniendo en cuenta el enfoque del proyecto de estimación de carbono en humedales, es importante también aclarar la definición del IPCC sobre este tipo de ecosistema “esta categoría incluye las zonas de extracción de turba y la tierra que está saturada de agua durante todo el año o durante parte de éste (por ejemplo, las turberas) y que no está dentro de las categorías de tierras forestales, tierras de cultivo, pastizal o asentamientos. Incluye reservorios como subdivisión gestionada y los ríos naturales y los lagos como subdivisiones no gestionadas”.

Fuente/institución	Definición
Convención Ramsar. Ley 357 de 1997. Adoptada MADS Colombia.	Extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.
Instituto Humboldt, 2014 (Colombia anfibia)	Tipo de ecosistema que debido a condiciones geomorfológicas e hidrológicas permite la acumulación de agua (temporal o permanentemente) y que da lugar a un tipo característico de suelo y a organismos adaptados a estas condiciones.
IPCC 2006. Guía para Inventarios de GEI (Humedales)	Cuerpos de agua donde las actividades humanas han causado cambios en la cantidad de superficie cubierta por agua, típicamente a través de la regulación del nivel del agua.
IDEAM, et al 2020. Memoria técnica. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC).	Son áreas donde el suelo está saturado de agua o permanece inundado una parte del año, y pueden tener diferente temporalidad de las inundaciones y el drenaje. Así, algunos pueden permanecer por más de seis meses al año (otros pueden estar sujetos a inundaciones o encharcamientos durante lapsos inferiores a tres meses en el año), tiempo en el que las unidades de tierra se entrelazan con funciones de control de flujos de agua y producción biológica.

Para el caso de las definiciones empleadas en las subcategorías de uso y cambio de uso de la tierra del Tercer Informe Bienal de Actualización (BUR-3, IDEAM et al., 2022), se incluyeron los humedales como subcategorías de coberturas en superficies de agua y vegetación acuática (Tabla 1).

Tabla 1. Definiciones empleadas en las subcategorías de uso y cambio de uso de la tierra para humedales en el BUR-3 (2022).

Subcategoría	Coberturas que incluye	Definición	Cita
3B4 Humedales	Superficies de agua	Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos aneganzados en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente.	IDEAM, 2010.
	Vegetación acuática	Bajo esta categoríase clasifica toda aquella vegetación flotante que se encuentra establecida sobre cuerpos de agua, recubriéndolos en forma parcial o total. Comprende vegetación biotipológicamente clasificada como Pleustophyta, Rizophyta y Haptophyta.	

VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa: IDEAM, et al., 2016).

CAMBIO CLIMÁTICO

Variación en las condiciones del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) que se manifiesta en cambios del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que perdura durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede atribuirse a procesos internos naturales o a factores externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o alteraciones antropógenas persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.

La CMNUCC en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible

a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2013).

GAS DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre.

Además, la atmósfera contiene cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógeno, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, y contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO_2 , N_2O y CH_4 , el Protocolo de Kyoto contempla los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC; IPCC, 2013).

RESERVORIO

Componente del sistema climático, distinto de la atmósfera, con capacidad para almacenar, acumular o liberar una sustancia objeto de estudio (por ejemplo, carbono, gases de efecto invernadero o precursores). Son reservorios de carbono, por ejemplo, los océanos, los suelos o los bosques. Un término equivalente es depósito (obsérvese que la definición de depósito suele abarcar también la atmósfera). La cantidad absoluta de una determinada sustancia en un reservorio durante un tiempo dado se denomina reserva (IPCC, 2013).

MOTOR DE TRANSFORMACIÓN

Cualquier acción natural o hecha por el hombre que genere cambios en los ecosistemas (Carpenter et al., 2006). Pueden ser directos, cuando hay una fuerte influencia en el funcionamiento del ecosistema (variabilidad climática, cambios en el paisaje, inyección de nutrientes al suelo con fines agrícolas, explotación y uso de recursos e invasiones biológicas) o indirectos cuando su efecto no es claramente visible (crecimiento demográfico, tendencias sociopolíticas o económicas, avances científicos para mejorar la producción de biomasa y comportamiento humano) (Nelson et al., 2006).

DATOS DE ACTIVIDAD

Datos sobre la magnitud de las actividades humanas que dan lugar a las emisiones o absorciones que se producen durante un período de tiempo determinado.

FACTOR DE EMISIÓN

Coeficiente que relaciona los datos de actividad con la cantidad del compuesto químico que constituye la fuente de las últimas emisiones. Los factores de emisión se basan a menudo en una muestra de datos sobre mediciones, calculados como promedio para determinar una tasa representativa de las emisiones correspondientes a un determinado nivel de actividad en un conjunto dado de condiciones de funcionamiento.

MONITOREO

Proceso diseñado científicamente para observar, medir, muestrear y analizar diversos tipos de variables de manera periódica y mediante métodos técnicos normalizados. El monitoreo se puede realizar por métodos directos de observación, ya sea en puntos estratégicos, estaciones y redes físicas definidas en un programa de monitoreo, o por estaciones espaciales o métodos indirectos, mediante sensores remotos (IDEAM et al., 2020).

MONITOREO COMUNITARIO PARTICIPATIVO (MCP)

Proceso que involucra a la comunidad a través de espacios y estrategias de participación activa en el levantamiento de información y en la generación, construcción y gestión del conocimiento del territorio. Adicionalmente, involucra el trabajo conjunto con los diferentes actores que hacen parte de este e integra, a través del diálogo de saberes, los conocimientos tradicionales y científicos al monitoreo (IDEAM, Fundación Natura, & Condesan, 2021).

COMPARTIMIENTO BIOMASA Y MOM:

BIOMASA

Cantidad de materia viva de origen vegetal o animal presente en un momento dado, en un área determinada (García y Martínez, 2014) que dentro de su estructura corporal

contiene Carbono; en el caso del material vegetal terrestre, la biomasa aérea hace referencia a tallos, ramas, corteza, semillas y follaje vivo, además de aquella que se encuentre sobre los cuerpos de agua de manera flotante (Yepes et al., 2011 y Cisneros de la Cruz et al., 2021), lo que también incluye el material radicular subterráneo con más de 2 mm de diámetro para la absorción de agua y nutrientes y las demás funciones fisiológicas y de sostén.

VEGETACIÓN ACUÁTICA

Vegetación que crece y se desarrolla en ambientes acuáticos, constituida por herbáceas cuya dinámica varía en tiempo según la estacionalidad hidroclimática (temporada lluvia y seca) y espacio (distribución en la cubeta de agua), de forma que se pueden distinguir las comunidades acuáticas sumergidas, flotantes, enraizadas (Rial, 2003).

MANTILLO

Capa superficial del suelo que se forma por residuos orgánicos en diferentes grados de descomposición; puede almacenar considerables cantidades de carbono y regular la mayoría de los procesos funcionales de los ecosistemas, influyendo directamente en la productividad y en la fertilidad de los suelos (Perez-Vazquez et al., 2021).

MATERIA ORGÁNICA (MO)

Material no vivo y que se encuentre bajo algún grado de descomposición, ya sea en pie o caído sobre la superficie del suelo con un diámetro igual o mayor a 10 cm (Yepes et al., 2011 y Cisneros de la Cruz et al., 2021), además del detrito, considerado como materia orgánica (tejidos animales y vegetales), excretas, exudados y microorganismos sin vida, que a su vez dinamizan los procesos de los ciclos de los biogeoelementos dentro de las redes tróficas (Moore et al., 2004 y Pozo et al., 2009).

COMPARTIMIENTO SUELOS Y SEDIMENTOS:

SUELO

Es la parte superficial de la corteza terrestre constituida por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipo biótico y abiótico, formado durante miles de años a partir de rocas o sedimentos

(minerales y orgánicos) por procesos de meteorización e intemperismo físicos y químicos y biológicos por la interacción con el clima y que han desarrollado la capacidad de originar y sostener la vida. Los suelos son sistemas donde suceden diferentes tipos de procesos, como ganancias, pérdidas, movimientos y transformaciones que van dejando su huella en forma de horizontes (IDEAM, 2019).

La política para la gestión sostenible del suelo establece los límites de los suelos de la siguiente manera, “Los suelos cubren la mayor parte de la superficie terrestre; su límite superior es el aire o el agua superficial; sus fronteras horizontales son las áreas donde el suelo cambia, a veces gradualmente a aguas profundas, rocas o hielo; el límite inferior puede ser la roca dura o depósitos de materiales virtualmente desprovistos de animales, raíces u otras señales de actividad biológica y que no han sido afectados por los factores formadores del suelo” (Soil Survey Staff, 1994).

SUELO HÍDRICO

Suelo formado en condiciones de saturación o inundación prolongada, durante la estación de crecimiento de las plantas. La saturación de agua en el suelo provoca la pérdida de oxígeno, lo cual produce cambios en sus propiedades físicas y químicas. La importancia del suelo hídrico o de humedales se debe a que es el medio en el cual se realizan muchas de las transformaciones químicas que dan lugar a algunos de los servicios ya mencionados. El suelo de humedales es también la matriz en la que se almacenan los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (Mitsch y Gosselink, 2000).

SEDIMENTOS

Los sedimentos corresponden a los materiales resultantes cuando las rocas son sometidas a procesos de meteorización (fragmentación). Algunos procesos de fragmentan físicamente la roca en piezas más pequeñas sin modificar su composición; otros, descomponen la roca, es decir, modifican químicamente los minerales en otros nuevos y en sustancias fácilmente solubles en agua. El agua, el viento o el hielo glacial suelen transportar los productos de la meteorización a lugares de sedimentación donde éstos forman capas relativamente planas (Tarbuck et. Al., 2005).

A diferencia de los suelos, que están constituido por fases gaseosa, líquida y sólida, los sedimentos sumergidos están formados sólo por las fases sólida y líquida (Avnimelech et al. 2001), por otro lado, los sedimentos depositados en playas y zonas ribereñas de los

humedales corresponden a los materiales parentales del suelo, Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar). La fase sólida se constituye por una orgánica y otra mineral. Los sedimentos siempre son una mezcla íntima de las fases orgánica, mineral y líquida, donde los restos de organismos y diversas sustancias orgánicas son los elementos de la fase orgánica, mientras que los cationes no volátiles, minerales, mineraloides y otras sustancias inorgánicas constituyen la fase inorgánica; la fase líquida es esencialmente agua (Parra 2005).

COMPARTIMIENTO BIODIVERSIDAD:

BIOGEOGRAFÍA

Disciplina que se encarga del estudio de la distribución geográfica de los seres vivos en el tiempo y el espacio, tomando en cuenta los diversos factores que dieron lugar a tal distribución (Contreras-Medina, 2006). Para este caso, los aspectos biogeográficos se considerarán teniendo en cuenta el “área de distribución de las especies”; es decir, aquella fracción del espacio geográfico donde una especie está presente e interactúa en forma no efímera con el ecosistema (Zunino y Palestrini, 1991). Esta área de distribución depende, entre otros factores, de la historia (biología) de las especies y de su capacidad de dispersión. En este sentido, se encuentran términos relacionados (según Conabio, 2023), tales como:

- ✦ Especie nativa o autóctona: especie que se encuentra dentro de su área de distribución natural u original (histórica o actual) de acuerdo con su potencial de dispersión natural. Por lo general, son especies bien adaptadas a los factores ambientales de su área natural y a las otras especies autóctonas con las que coexisten.
- ✦ Especie endémica: especie nativa que se encuentra restringida a una determinada región. Cuanto más acotada es la región en la que se encuentra la especie endémica, mayor es su fragilidad ecológica, ya que una perturbación del ambiente puede llevar a la extinción de la especie.
- ✦ Especie exótica: especie introducida fuera de su área de distribución original; es decir, las que constituyen elementos foráneos del ecosistema.
- ✦ Especie invasora: especie exótica que se establece, reproduce y dispersa sin control, causando daños al ecosistema (alterando las relaciones tróficas o la

fisonomía del ecosistema), a las especies nativas (por reemplazo), a la salud (pueden convertirse en plagas) o a la economía.

CATEGORÍAS DE CONSERVACIÓN

Son jerarquizaciones o sistemas de clasificación de los estados de conservación de las especies (o de su riesgo de extinción); es decir, de la probabilidad de que una especie continúe existiendo en el futuro cercano, dependiendo del volumen de la población actual y las tendencias mostradas en el tiempo, en relación con las amenazas o presiones a las que está sujeta. Para este caso se siguen los lineamientos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), que define las siguientes categorías (Renjifo et al, 2002):

- └ Extinto (EX).
- └ Extinto en Estado Silvestre (EW).
- └ En Peligro Crítico (CR).
- └ En Peligro (EN).
- └ Vulnerable (VU).
- └ Casi Amenazado (NT).
- └ Preocupación Menor (LC).
- └ Datos Insuficientes (DD).
- └ No Evaluado (NE).

ALTO VALOR DE CONSERVACIÓN (AVC)

Es un alto valor biológico, ecológico, social o cultural excepcionalmente significativo o de importancia crítica. El consejo de administración forestal (FSC) define seis categorías de AVC: diversidad de especies, ecosistemas y mosaicos a escalas de paisaje, ecosistemas y hábitats, servicios ecosistémicos, necesidades de las comunidades y valores culturales.

INICIATIVAS O ESTRATEGIAS COMPLEMENTARIAS DE CONSERVACIÓN

De acuerdo con el MADS y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt-IAvH (2018) y, en línea con la guía propuesta por UICN y la Comisión Mundial de Áreas Protegidas - WCPA (2017), las estrategias complementarias de

conservación se definen como “aquellas medidas gubernamentales o no gubernamentales que se expresan en un espacio geográfico definido, diferente a un área protegida, que buscan mantener y promover en el tiempo las contribuciones materiales e inmateriales de la naturaleza a la sociedad y aportar a la conservación *in situ* de la biodiversidad, mediante una forma de gobernanza que involucra uno o varios actores (públicos, privados o comunitarios)”.

Estas estrategias abarcan una amplia variedad de denominaciones, desde áreas municipales hasta reservas comunitarias, y diferentes ámbitos, desde el local hasta el nacional. Además, aportan a la economía local y regional, a través de iniciativas como el turismo y los sistemas productivos sostenibles, que impulsan la cohesión social y articulación entre actores institucionales y sociales, y promueven la investigación. De esta manera, se generan procesos de apropiación social y de divulgación sobre la importancia de la conservación de la biodiversidad. Así mismo, aumentan la cantidad de áreas de espacio público, la provisión de servicios ecosistémicos, la mitigación de riesgos y la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático, entre otros (MADS et al., 2019).

COMPONENTE DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:

EVALUACIÓN MULTICRITERIO (EMC)

Conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones, que permite evaluar el territorio con relación a unos determinados objetivos y definir rigurosamente los procesos operativos y los juicios que orientan la valoración de diferentes variables e indicadores (Da Silva & Cardozo, 2015).

PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (PAJ)

Se aplican procesos de desarrollo usando decisiones de Evaluación Multicriterio (EMC) a diferentes niveles de complejidad, las cuales se encuentran como solución para problemas complejos, en donde mediante la aplicación de una matriz de comparación entre criterios se determinan las decisiones más apropiadas para la investigación. Es así como en los métodos del PAJ se establece la jerarquía de atributos que consta de tres niveles (Berumen & Llamazares Redondo, 2007):

- └ Planteamiento del objetivo general en la parte superior.

- ✦ Atributos o criterios que definen las alternativas en el medio. Cuando los atributos o criterios no son suficientemente explícitos o claros, se incluyen subcriterios más operativos entre el nivel de criterios y el de alternativas.
- ✦ Alternativas que concurren en la parte inferior.

Para hacer las comparaciones entre criterios, Saaty (2008) define la escala numérica que indica que tan dominante o importante es un criterio frente a otro.

ZONIFICACIÓN TEMÁTICA

La zonificación es uno de los procesos fundamentales para el ordenamiento territorial, ya que define aquellas zonas con un manejo o destino homogéneo para establecer una normativa y políticas de uso de los ecosistemas a fin de cumplir los objetivos de conservación para una ventana piloto determinada (Long et al., 2010). La generación cartográfica de mapas de zonificación, incluyen la regionalización o el agrupamiento de objetos en el espacio, herramientas que son el punto de partida para organizar, visualizar y sintetizar información geográfica de origen multivariado. De esta manera, la zonificación, según (Ng & Han, 2002) se define como el agrupamiento de unidades espaciales básicas que están contiguas, pero que debido a sus características particulares son diferentes que su entorno; es decir, las áreas existentes dentro de una región determinada tienen algo en común, pero difieren de su entorno para ser separadas de este.

HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO

Cerca del 27% del territorio nacional son humedales (30.781.149 ha), siendo la Orinoquia la región de mayor representatividad, seguida de la Amazonia y la macro cuenca Magdalena-Cauca (BUR3, IDEAM et al., 2021 e IDEAM, 2022). El área hidrográfica de Magdalena-Cauca es de 27.101.006,26 ha, conformada por los tramos alto, medio y bajo de los drenajes Cauca y Magdalena, además de las cuencas de los ríos San Jorge, Nechí, Saldaña y Sogamoso (IDEAM, 2013a), cubriendo 19 departamentos y 733 municipios por los que fluyen sus aguas hasta su descarga en el Mar Caribe.

Aspectos del relieve como la presencia de la cadena montañosa de Los Andes genera un gradiente de ecosistemas que va desde los 0 a alturas superiores a los 5.000 m s.n.m, que, conforme se reduce la elevación, se convierten en bajos inundables en los que se depositan las aguas que drenan desde los tramos altos de las montañas, formando un entramado de humedales que se hacen más frecuentes desde los tramos medio y bajo de la cuenca.

Se reconocen alrededor de 1.900 ciénagas en estos tramos, cubriendo aproximadamente 3.200 km² (Montoya y Aguirre, 2009), que dependen fundamentalmente de la conectividad con sus principales tributarios para nutrirse con las aguas que llegan producto de los desbordes que se generan en los periodos de lluvias, lo que en un escenario de cambio climático y modificación constante y rápido de las condiciones hidráulicas, puede desencadenar alteraciones importantes para la viabilidad de los procesos físicos, químicos y ecológicos que se desarrollan en estos ecosistemas (Jiménez-Segura et al., 2020).

MOTORES DE TRANSFORMACIÓN DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO

Según el IPCC (2001), el cambio en la naturaleza de los ecosistemas por causa de la acción humana ha modificado también la cantidad de emisiones naturales de GEI a la atmósfera, situación que también viene afectando la naturalidad de los ecosistemas de humedal. El **análisis prospectivo** es una herramienta que se basa en información secundaria para la identificación de motores de transformación, para finalmente priorizar las acciones de gestión.

Con base en la anticipación, acción y apropiación, pueden constituirse escenarios deseables a partir del estado actual, estableciendo una relación de influencia, generando

jerarquías para las variables consideradas de influencia (sobre) y dependencia (recibe) de un elemento a otro (Senhadji-Navarro et al., 2017).

DEFINICIÓN DE VARIABLES (MOTORES DE TRANSFORMACIÓN)

El primer paso propuesto es la identificación a partir de información secundaria de las actividades y/o procesos que generen actualmente alguna transformación al humedal objeto de estudio. Con esto, se construye una lista y se define conceptualmente cada uno de ellos, esto es fundamental para evitar ruido entre los motores identificados.

Definido el marco conceptual, por medio de la rutina “análisis prospectivo” del Software de libre acceso MICMAC (Versión 6.1.2 2003/2004 de Lipsor-Epita-Micmac), se ingresan las variables (motores) por medio de la opción “Data entry”, indicando nombre (long label) y abreviatura (short label), descripción conceptual (description) y categoría asignada (theme), esto es fundamental para el análisis posterior del resultado.

CALIFICACIÓN DE VARIABLES

Se deben ingresar las variables tanto a nivel de filas como de columnas en la Matriz de Influencia Directa (MID) de modo que se pueda evaluar el grado de influencia y dependencia de cada una (

Figura 5); para la valoración se debe tener en cuenta la siguiente jerarquía, según sea el caso:

- 0 cuando es nula
- 1 cuando es leve
- 2 cuando es moderada
- 3 cuando la relación es fuerte

		Sobre			
		Influencia			
Dependencia	Motor	M1	M2	M3	Mn
	M1				
	M2				
	M3				
	Mn				

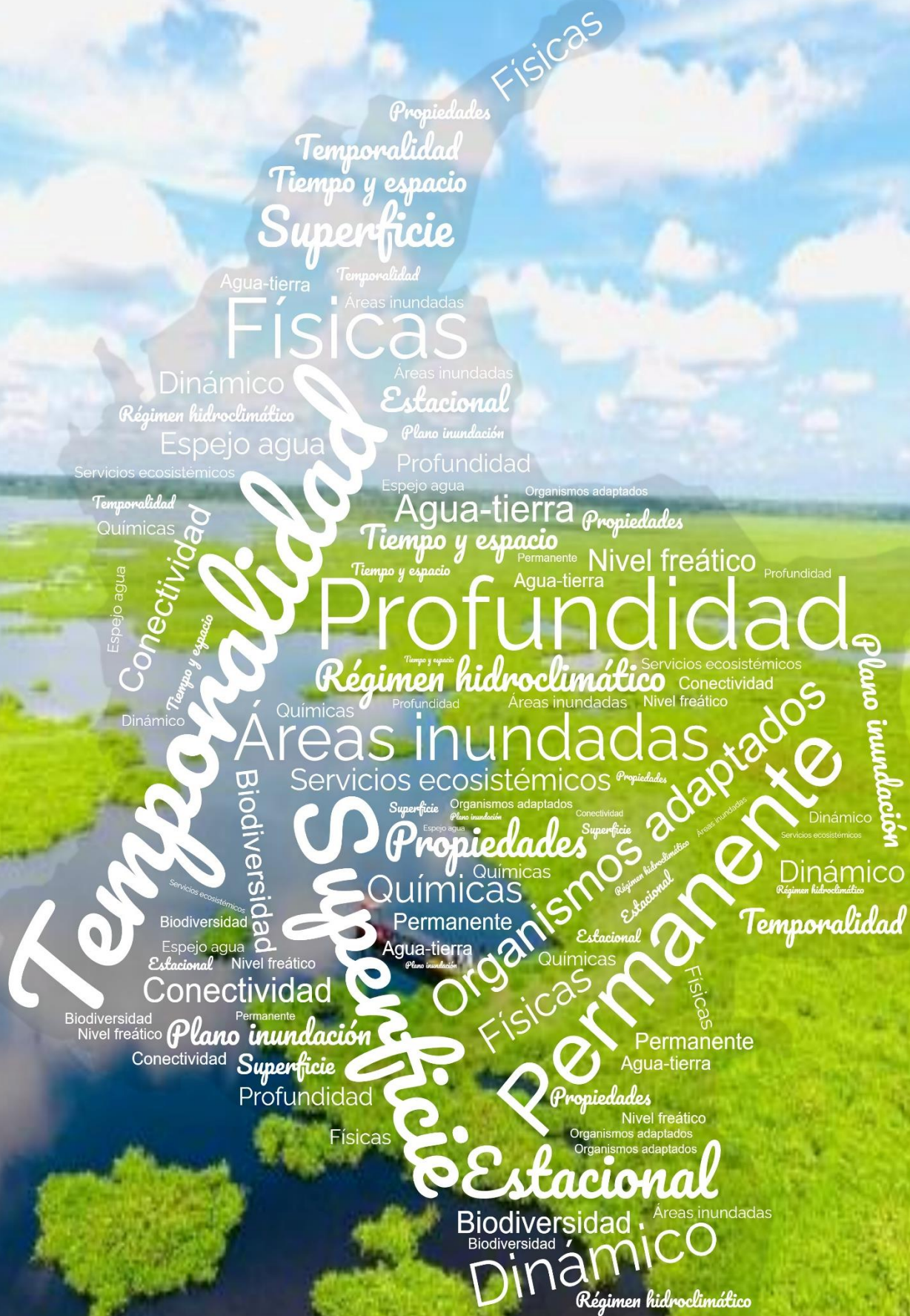
Figura 5. Matriz de influencias directas (MID) para la captura de datos de influencia y dependencia de los motores de transformación. Fuente: elaboración propia (2024)

El resultado del análisis se verá reflejado en un plano cartesiano en el que, a partir de la ubicación espacial de cada motor, tendrá lugar a un nivel de priorización o valoración.

Se considerarán autónomos aquellos motores con baja influencia y dependencia, lo que implica un bajo seguimiento; por otro lado, los motores con baja dependencia y alta influencia serán denominados determinantes debido a su independencia. Los motores de baja influencia y mucha dependencia serán considerados resultantes ya que son producto de otras acciones y requieren apoyo de otros actores; finalmente, los motores de mucha influencia y mucha dependencia son considerados clave, sobre ellos recae la mayor afectación al territorio y concentran las acciones a tratar en el corto, mediano y largo plazo (Figura 6).

Dependencia	Influencia	
	Determinantes	Clave
	Mucha influencia Baja dependencia	Mucha influencia Mucha dependencia
	Autónomas	Resultado
	Baja influencia Baja dependencia	Baja influencia Mucha dependencia

Figura 6 Interpretación para el resultado del análisis prospectivo MICMAC. Fuente: elaboración propia (2024)



METODOLOGÍA

ETAPA DE PREMUESTREO

SELECCIÓN VENTANAS DE MONITOREO

Es el primer paso para la identificación de la heterogeneidad ecosistémica, reconociendo que si bien cada ambiente es único, es importante seleccionar un área representativa que permita implementar los esfuerzos de monitoreo de forma asertiva en términos costo-eficientes, tanto por la calidad de la información, como del presupuesto necesario para ejecutarlo, generando así los lineamientos para que el protocolo sea implementado, bajo ciertas adecuaciones, a otros escenarios del territorio nacional. Este proceso se divide en:



Figura 7. Etapas del proceso de selección de la ventana de monitoreo para la estimación de contenidos de Carbono en humedales del Magdalena medio y bajo. Fuente: elaboración propia (2024)

Etapa 1. Protocolos nacionales

Se propone la implementación de la metodología propuesta en el Protocolo de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos de Colombia - PROMSEA- IDEAM. Esta herramienta de carácter nacional ofrece los lineamientos para el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos continentales, marinos, costeros e insulares del país desde los cuatro componentes que articulan el trabajo en torno al conocimiento de su dinámica: calidad hídrica, comunidades hidrobiológicas, aspectos físicos y aspectos socioeconómicos. El protocolo ofrece bases metodológicas y conceptuales para que el monitoreo permita obtener información base, bajo estándares de calidad, que orienten directrices para la gestión de estos ecosistemas, frente a tres

fenómenos de transformación priorizados: carga contaminante, fragmentación y cambio climático.

Criterio 1: extensión

Mapa de Ecosistemas continentales, marinos y costeros de Colombia (MEC), escala 1:100.000

Considerando que el MEC es el mapa oficial que presenta la clasificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres, identificados bajo una metodología concertada entre las instituciones del SINA, que involucra atributos clave de clima, geopedología, coberturas de la Tierra, unidades bióticas y paisajes marinos, fundamentales para el proceso de delimitación de ecosistemas acuáticos (IDEAM, 2022), se busca identificar los ecosistemas acuáticos con mayor representatividad en términos de extensión por área hidrográfica. Para el caso del área hidrográfica Magdalena-Cauca, en la Tabla 2 se presentan los datos de extensión de los cuatro tipos de ecosistemas síntesis presentes en la zona.

Tabla 2. Representatividad de ecosistemas síntesis acuáticos para el área hidrográfica del Magdalena-Cauca (MEC, 2017).

Área hidrográfica	Ecosistemas síntesis	Área (ha)	Porcentaje
Magdalena - Cauca	Transicional transformado	1 530 082,01	43,66%
	Laguna	619 898,15	17,69%
	Zona pantanosa	563 400,76	16,07%
	Río	333 840,95	9,52%

Para el MEC, los ecosistemas de aguas lentas/estancadas tienen un porcentaje de extensión del 77,42% y, entre ellos, los ecosistemas transicionales (considerados los humedales propiamente dichos), corresponden al 43,66% de los ecosistemas acuáticos del área hidrográfica Magdalena-Cauca, convirtiéndolos así en los más importantes por extensión para el monitoreo. Ahora bien, dentro de estos humedales, para la cuenca del Magdalena medio y bajo se destacan por extensión de mayor a menor el Complejo Cenagoso de Zapatosa, Complejo Cenagoso de Zarate Malibu y Veladero y la Ciénaga de Barbacoas (Tabla 3, Tabla 4).

Tabla 3. Extensión de ecosistemas de humedal por tipo de ambiente según en MEC para la cuenca Magdalena medio y bajo (MEC, 2017).

Ecosistema de humedal	Léntico	Transicional	Total general (ha)
Complejo Cenagoso de Zapatosa	62 496,58	37 463,71	99 960,29
Complejo Cenagoso de Zarate Malibu y Veladero	19 665,56	12 909,14	32 574,70
Ciénaga de Barbacoas	2 051,06	13 448,79	15 499,86
Ciénaga de Chiqueros	66,77	3 185,82	3 252,59
Complejo Ciénagas Papayal	606,44		606,44
Del Humedal San Silvestre	12,46	118,41	130,88
Laguna de San Diego	148,70	83,95	232,65
Total general (ha)	85 047,60	67 209,84	15 2257,44

Tabla 4. Detalle por tipo de cobertura para los ecosistemas de humedal de la cuenca Magdalena medio y bajo (MEC, 2017).

Ecosistema de humedal	Arbustal inundable basal (ha)	Bosque galería inundable basal (ha)	Bosque inundable basal (ha)	Herbazal inundable basal (ha)	Laguna Aluvial (ha)	Transicional transformado (ha)	Zona pantanosa basal (ha)	Zonas arenosas naturales (ha)	Total general (ha)
Ciénaga de Barbacoas	470,78	--	997,61	401,87	2 051,07	8 240,63	3 337,90	--	15 499,87
Ciénaga de Chiqueros	--	--	484,22		66,78	2 380,86	320,74	--	3 252,60
Complejo Cenagoso de Zapatosa	2 164,91	150,66	417,67	6 385,35	62 496,58	15 065,50	13 279,63	--	99 960,30
Complejo Cenagoso de Zarate Malibu y Veladero	129,49	--	--	--	19 665,56	10 095,54	2 620,72	63,39	32 574,70
Complejo ciénagas Papayal	--	--	--	--	606,44	--	--	--	606,44
Del Humedal San Silvestre	--	--	--	72,02	12,47	46,40	--	--	130,89
Laguna de San Diego	--	--	--		148,71	83,95	--	--	232,66
Total general (ha)	2 765,18	150,66	1 899,51	6 859,25	85 047,60	35 912,88	19 558,98	63,39	15 2257,45

Criterio 2: ecosistemas estratégicos

Humedales Ramsar

Para el área hidrográfica del Magdalena-Cauca, hasta el momento se han designado seis ecosistemas acuáticos bajo la declaratoria Ramsar (Tabla 5).

Tabla 5. Humedales declarados como sitios Ramsar de Colombia para el área hidrográfica Magdalena-Cauca.

Humedal Ramsar	Acto administrativo	Escala	Área (ha)
Sistema Delta Estuarino del Río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta	Decreto 3888 de 8 de octubre de 2009	1:100.000	520 846,56
Laguna del Otún	Decreto 250 de 14 de febrero de 2017	1:100.000	115 883,09
Complejo de Humedales Alto Río Cauca asociado a la Laguna de Sonso	Decreto 251 de 14 de febrero de 2017	1:100.000	5 532,67
Complejo Cenagoso de Ayapel	Decreto 356 de 22 de febrero de 2018	1:25.000	54 376,78
Complejo Cenagoso de Zapatosa	Decreto 1190 de 12 de julio de 2018	1:25.000	121 725,01
Complejo de Humedales Urbanos del Distrito Capital de Bogotá	Decreto 1468 de 6 de agosto de 2018	1:10.000 1:15.000	666,85

Fuente: elaboración propia (2024).

La convención Ramsar ha hecho un llamado para que los humedales, al ser de los ecosistemas más degradados y amenazados a nivel mundial, sean incluidos dentro de las acciones que se están implementando frente al cambio climático debido a su importancia en la regulación y estabilidad del clima y dar cumplimiento a los compromisos del Acuerdo de París (Ramsar, 2022). En este sentido, no existen restricciones para que se lleven a cabo proyectos de carbono en humedales declarados por Ramsar, siempre y cuando se tengan claros los derechos de propiedad de la tierra que hace parte del área del proyecto, lo cual es importante porque serán los propietarios de estas áreas los que tendrán los derechos de propiedad del carbono que se genere durante la implementación del proyecto.

Cuencas priorizadas con fines de ordenación por las Autoridades Ambientales Regionales

Los criterios de priorización se establecen según los objetivos de la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) referentes a la oferta, demanda, calidad, riesgo y gobernabilidad asociados al recurso hídrico, los cuales se subdividen en factores y parámetros que corresponden a componentes como la oferta, demanda, calidad, riesgo, y el fortalecimiento institucional y gobernabilidad (IDEAM, 2022). Para esto, se cuenta con el modelo de priorización que contempla la utilización de información a escala nacional, regional o local (1:100.000, 1:25.000, menor) según el tipo de información con la

que cuenten las Autoridades Ambientales Competentes (Minambiente, 2014). Para la cuenca del Magdalena medio y bajo en la actualidad se cuenta con 32 programas de ordenación de cuencas (Tabla 6).

Tabla 6. Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) para la cuenca del Magdalena medio y bajo. ZH: zona hidrográfica, SZH: subzona hidrográfica

NomZH	NomSZH	POMCAs	CARs	Departamentos	Área (ha)
Alto Magdalena	Río Bogotá	Río Bogotá - SZH	CAR / SDA / CORPOGUAVIO	Cundinamarca	593 295,34
Alto Magdalena	Río Lagunilla y Otros Directos al Magdalena	Río Recio y Río Venadillo - NSS	CORTOLIMA	Tolima	101 164,12
Medio Magdalena	Río Guaríná	Río Guaríná ³ - SZH	CORPOCALDAS / CORTOLIMA	Caldas / Tolima	84 380,72
Cauca	Río Arma	Río Arma - SZH	CORANTIOQUIA / CORNARE / CORPOCALDAS	Antioquia / Caldas	186 097,11
Medio Magdalena	Río La Miel (Samaná)	Río Samaná Sur - NSS	CORNARE / CORPOCALDAS	Antioquia / Caldas	120 987,45
Medio Magdalena	Directos Magdalena Medio entre Ríos La Miel y Nare (mi)	Río Cocorná y directos Magdalena Medio entre Ríos La Miel y Nare (mi) - SZH	CORANTIOQUIA / CORNARE	Antioquia	148 445,72
Medio Magdalena	Río Opón	Río Opón - SZH	CAS	Santander	431 846,71
Sogamoso	Río Sogamoso	Río Sogamoso - SZH	CAS / CDMB	Santander	340 843,57
Bajo Magdalena-Cauca -San Jorge	Bajo San Jorge - La Mojana	Río Bajo San Jorge - NSS	CORANTIOQUIA / CSB / CVS / CARSUCRE / CORPOMOJANA	Antioquia / Bolívar / Córdoba / Sucre	1 529 630,15
Medio Magdalena	Río Nare	Río Samaná Norte - NSS	CORANTIOQUIA / CORNARE	Antioquia	201 225,33
Medio Magdalena	Río Carare (Minero)	Río Carare (Minero) - SZH	CAR / CORPOBOYACÁ / CAS	Boyacá / Cundinamarca / Santander	728 262,77
Sogamoso	Río Suárez	Río Medio y Bajo Suárez - NSS	CORPOBOYACÁ / CAR / CAS	Boyacá / Cundinamarca / Santander	613 823,48
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Río Lebrija Medio - NSS	CSB / CORPOCESAR / CORPONOR / CDMB / CAS	Bolívar / Cesar / Norte de Santander / Santander	188 611,37
Bajo Magdalena	Canal del Dique	Canal del Dique - 2SZH	CRA / CARDIQUE / CARSUCRE	Atlántico / Bolívar / Sucre	440 486,84
Bajo Magdalena	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (mi)	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (mi) - SZH	CARDIQUE / CORPAMAG	Bolívar / Magdalena	201 225,07

NomZH	NomSZH	POMCAs	CARs	Departamentos	Área (ha)
Catatumbo	Río Algodonal (Alto Catatumbo)	Río Algodonal - SZH	CORPONOR / CORPOCESAR	Cesar / Norte de Santander	234 020,45
Catatumbo	Río Zulia	Río Zulia - SZH	CORPONOR	Norte de Santander	342 786,61
Bajo Magdalena	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato (md)	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato (md) - SZH	CSB / CORPAMAG	Bolívar / Magdalena	700 668,18
Caribe - Guajira	Río Piedras - Río Manzanares	Río Piedras - Río Manzanares y otros directos Caribe - SZH	CORPAMAG / DADMA	Magdalena	92 963,83
Cesar	Bajo Cesar	Río Bajo Cesar - Ciénaga Zapatosa - NSS	CORPOCESAR / CORPAMAG	Cesar / Magdalena	468 219,19
Bajo Magdalena	Cga Grande de Santa Marta	Complejo humedales Cga Grande de Santa Marta - NSS	CRA / CORPAMAG	Atlántico / Magdalena	283 571,50
Caribe - Litoral	Arroyos Directos al Caribe	Arroyos Directos al Caribe Sur - Ciénaga de La Virgen - NSS	CARDIQUE	Bolívar	59 781,52
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Río Alto Lebrija - NSS	CDMB	Santander	217 596,07
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Río Cáchira Sur - NSS	CDMB	Santander	68 085,12
Medio Magdalena	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Afluentes directos río Lebrija Medio (mi) - NSS	CSB / CAS	Bolívar / Santander	182 780,79
Sogamoso	Río Suárez	Río Alto Suárez - NSS	CAR	Cundinamarca	171 750,45
Nechá	Río Porce	Río Aburra - NSS	AMVA / CORANTIOQUIA / CORNARE	Antioquia	121 766,90
Medio Magdalena	Río Nare	Río Negro - NSS	AMVA / CORNARE	Antioquia	92 474,64
Medio Magdalena	Río Nare	Río Nare - NSS	CORANTIOQUIA / CORNARE	Antioquia	96 087,20
Medio Magdalena	Río La Miel (Samaná)	Río La Miel - NSS	CORNARE / CORPOCALDAS	Antioquia / Caldas	119 049,94
Bajo Magdalena-Cauca -San Jorge	Bajo San Jorge - La Mojana	La Mojana - Río Cauca - NSS	CARDIQUE / CARSUCRE / CSB	Bolívar / Sucre	189 591,94
Cesar	Alto Cesar	Río Guatapurí - NSS	CORPOCESAR	Cesar	86 959,38

Criterio 3: ecosistemas en riesgo de transformación

Criticidad según evaluación integrada del agua (Estudio Nacional del Agua - 2018)

Priorización en términos de riesgo de transformación de ecosistemas acuáticos a monitorear, dado que integra el análisis en relación con la Variabilidad de la Oferta Hídrica en condiciones naturales (VOH) y con la situación actual de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico por presiones antrópicas de uso (VRH), afectación a la calidad según el Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) y el Índice de Presión Hídrica sobre los Ecosistemas (IPHE; IDEAM, 2022).

La evaluación por subzona hidrográfica se hace a partir de cuatro grandes componentes temáticos (ENA, 2018):

- └ Variabilidad de la oferta hídrica natural.
- └ Recurso hídrico y presiones por uso y contaminación.
- └ Erosión hídrica potencial en ladera de sedimentos.
- └ Transformación de áreas en zonas potencialmente inundables.

Con base en el análisis integrado de esa información, para el país se han clasificado las subzonas según criticidad del agua desde muy baja hasta muy alta (Tabla 7), siendo el área hidrográfica Magdalena-Cauca la que presenta mayor grado de criticidad para sus ecosistemas acuáticos.

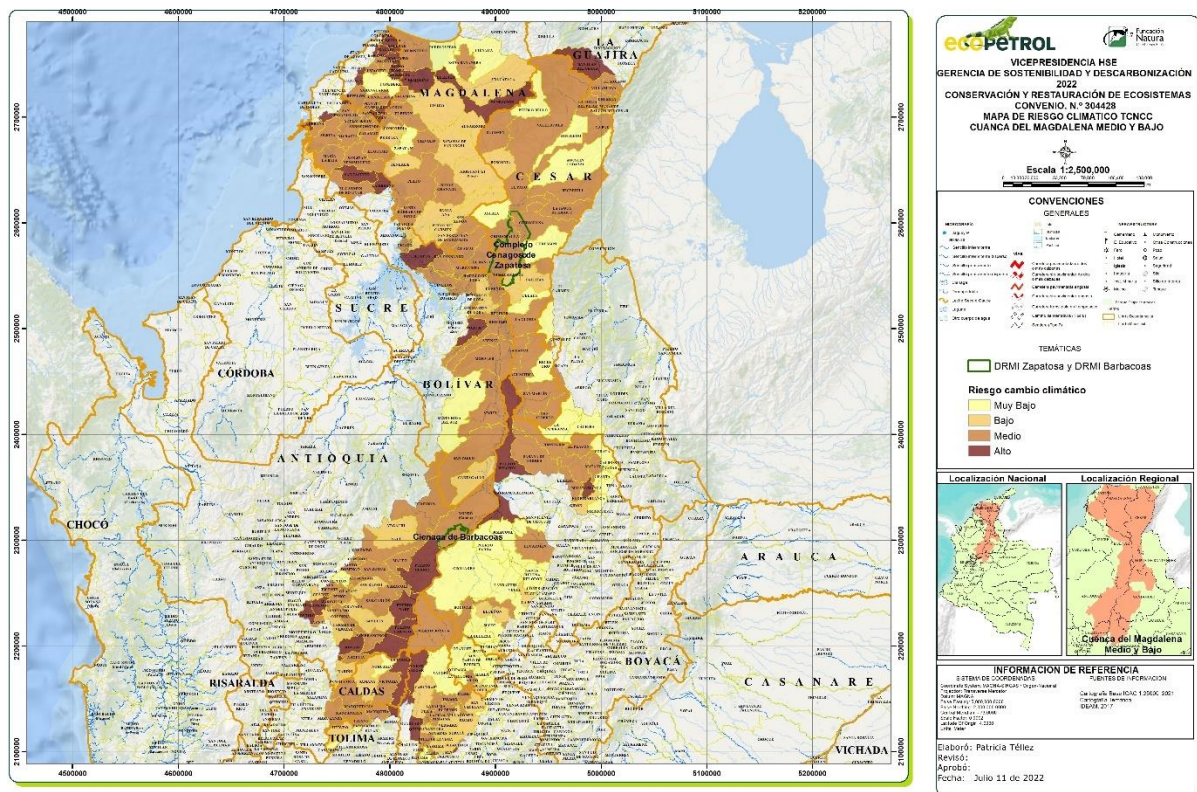
Tabla 7. Criticidad por subzonas por área hidrográfica y por categoría de análisis según el ENA (2018).

Análisis integrado						
Categoría del análisis integrado	Número de subzonas por área hidrográfica					
	Amazonas	Caribe	Magdalena-Cauca	Orinoco	Pacífico	Total
Muy alta		1	14		2	17
Alta	1	16	66	4	5	92
Medio	4	11	23	11	10	59
Baja	13	10	2	18	13	56
Muy baja	39	8		40	5	92
Total general	57	46	105	73	35	316

Análisis municipal de riesgo por Cambio Climático

En el marco del desarrollo del reporte bienal de actualización del país ante la CMNUCC (BUR) se generan los escenarios de cambio climático y los análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático a nivel departamental y regional, los cuales constituyen una base de información clave para priorizar las unidades de análisis e identificar lugares

estratégicos (piloto) para la implementación del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Estado de los Ecosistemas Acuáticos de Colombia - Promsea (IDEAM, 2022) y por tanto, para proyectos enfocados a nivel nacional y regional en el monitoreo de alguno de los fenómenos de transformación priorizados para este insumo nacional: carga contaminante, fragmentación y cambio climático. La cuenca del Magdalena medio y bajo presenta, según el análisis, municipios con categoría de riesgo frente al Cambio Climático de 1 a 4; es decir, contiene zonas entre muy bajo a alto riesgo (Figura 8).



Etapa 2. Portafolios de conservación de agua dulce para la cuenca Magdalena-Cauca.

Para los humedales de la cuenca se propone el uso del portafolio realizado por el Programa Nasca, The Nature Conservancy y CorMagdalena que enlista, desde la conservación, los escenarios importantes para el sostenimiento de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos y que han estado o están en constante proceso de transformación, debido a las presiones antrópicas que sobre estos se ejercen.

Los métodos utilizados para el diseño del portafolio han sido adaptados de los procedimientos generados por Higgins (2005), Thieme et al., (2007) y Sowa et al., (2007) en los que se utilizaron herramientas de Sistemas de Información Geográfica y sensoramiento remoto para establecer una red de sub-cuencas clasificadas como tipos de habitas acuáticos, para luego seleccionar y priorizar las más representativas y las de mejor integridad ecológica para la conservación y el manejo de la biodiversidad de los ecosistemas y los procesos ecológicos de agua dulce (TNC y Cormagdalena, 2011). En la Tabla 8 se presenta el detalle de la unidad ecológica de drenaje para el área del Magdalena medio y bajo con la clasificación y puntuación de los ecosistemas acuáticos lóticos y lénticos evaluados, resaltando los ecosistemas con clasificación alta de conservación según el portafolio.

Según los resultados la mayoría de los sistemas priorizados se encuentran con grado de amenaza alto y muy alto, por consiguiente, se evidencia su riesgo de pérdida, dado su acelerado deterioro y si no se adelantan acciones concretas de manejo y mitigación de amenazas a corto plazo. El Portafolio de Agua Dulce fue diseñado para ser utilizado como una herramienta de planificación de sitios estratégicos para la conservación y manejo de la biodiversidad y debe entenderse como una primera aproximación, que, en lo posible, deberá precisarse con nueva información de campo (TNC y Cormagdalena, 2011).

Tabla 8. Sitios subprioritarios del Portafolio de Agua Dulce con nivel de importancia del sitio de conservación con prioridad a corto plazo (TNC y Cormagdalena, 2011).

Identificador del sistema ecológico (SINOR_ID)	Código del sitio prioritario (New_codz_1)	Nombre del sitio prioritario	Municipio	Departamento	Área del sitio prioritario en el Sistema ecológico	Área total de prioridades a corto plazo (Km ²)
424	73	Cuencas de las Ciénagas Catalina, Marquetera, Zarate	Plato	Magdalena	579	26,34
5147	35	Cuenca de la Ciénaga Ancón	Talaigua Nuevo	Bolivar	338	
460	28	Cuenca Bajo Río Cesar (Ciénaga de Zapatosa)	Agustin Codazzi	Bolivar	1 347	
1773	24	Cuenca de la Ciénaga de Barbacoas y Ciénaga Grande	Yondo	Antioquia	267	
621	2	Ciénagas del Bajo Río Cauca	Magangué	Antioquia	1	
621	3	Valle del Cauca entre Córdoba y Pto Antioquia (Antq)	Magangué	Antioquia	1 554	
621	4	Valle del Cauca entre Cali y la Virginia	Magangué	Antioquia	2 929	

Identificador del sistema ecológico (SINOR_ID)	Código del sitio prioritario (New_codz_1)	Nombre del sitio prioritario	Municipio	Departamento	Área del sitio prioritario en el Sistema ecológico	Área total de prioridades a corto plazo (Km²)
621	1	Valle del Bajo Río Cauca (Humedales bajo Nechi, Ciénagas de bajo Cauca)	Magangue	Antioquia	4 891	
5099	33	Cuenca del Bajo Río San Jorge (complejo de ciénagas de la Mojana)	Magangue	Bolivar	1 557	
1733	79	Cuenca de la quebrada Viscaina (sistema Río Upon)	Barrancaberm eja	Santander	208	
390	67	Cuenca del arroyo Limón (Humedales margen derecha R Mag)	Tenerife	Magdalena	150	
3802	49	Cuenca del río Palo	Villa Rica	Cauca	927	
105	71	Cuenca de la Ciénaga grande de Santa Martha	Ciénaga	Magdalena	1 116	
2909	74	Nacimiento del Río La Viaja	Pereira	Quindio	886	
3047	64	Cuenca del Río Tunjuelo	Bogotá D.C.	Cundinamarca	523	
3910	51	Cuenca del Río Ovejas	Caloto	Cauca	967	
677	34	Cuenca de la Ciénaga del Pimiento	Magangué	Bolivar	597	
108	69	Cuenca del caño Clarín y Salado	Sitionuevo	Magdalena	205	
2459	43	Cuenca del río Ubate	Chiquinquirá	Boyaca	1 039	
104	70	Cuenca de las ciénagas de Zaragoza, Pajaral, Buenavista, Mendegua, Alfandoque)	Sitionuevo	Magdalena	784	
709	56	Cuenca Arroyo Hondo (Zapatoza)	Chimichagua	Cesar	707	
1553	14	Quebrada La Trinidad: Cabeceras Río Nechi.	Anori	Antioquia	182	
5114	38	Cuenca de la Ciénaga de Limones	San fernando	Bolivar	217	
231	26	Cuenca del canal del Dique (sistema cenagoso del canal)	Cartagena	Atlantico	1 169	
2142	22	Cabecera Río Claro	Puerto Nare	Antioquia	800	
1948	21	Cuenca del Río Nare	Puerto Berrio	Antioquia	1 639	
2988	75	Nacimiento del Río Quindío	Pereira	Quindio	768	

Etapa 3. Proyectos línea base manejo sostenible y conservación de la biodiversidad acuática en la zona hidrográfica Magdalena – Cauca.

Para la macrocuenca se proponen los resultados del proyecto GEF Magdalena Cauca Vive (Fundación Natura Colombia, 2017-2021), donde se encuentra información de línea base para las zonas altas de la macrocuenca, con páramos y bosques altoandinos en el Eje Cafetero, zonas medias como río Claro, hasta llegar a las zonas del bajo Cauca en Ayapel

con sus humedales, Magdalena Medio con las ciénagas de Barbacoas, Chiqueros y Corrales y el Ocho, hasta el bajo Magdalena con su bosque seco tropical y los complejos cenagosos como el de Zapatosa. Se destacan las siguientes acciones como resultados relevantes para la escogencia de las ventanas de monitoreo en la cuenca:

- ✦ Creación de nuevas áreas protegidas como el Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Complejo Cenagoso Zapatosa, el DRMI Ciénaga de Barbacoas, el DRMI Ciénaga de Chiqueros, entre otros, para las cuales se diseñaron e implementaron los respectivos planes de manejo.
- ✦ Estudio de modelación eco-hidrológica en la ciénaga de Zapatosa, proceso que ha permitido levantar una línea base con información biofísica, biótica, social y de funcionamiento de la ciénaga.
- ✦ Estudio piloto de monitoreo del estado de salud de la ciénaga de Zapatosa, en el cual se evaluaron los 18 indicadores biológicos que se identificaron y diseñaron para este fin, información disponible para la identificación de criterios definitivos y/o para la conformación de línea base requerida para el sitio piloto.

Los ecosistemas de humedal de Zapatosa y Barbacoas han sido dos de los ambientes más monitoreados por la Fundación Natura, lo que aporta suficiente información de base para establecer los lineamientos de monitoreo y seguimiento necesarios para la selección de la ventana piloto de monitoreo del proyecto.



Complejo cenagoso Zapatosa. Fotografía: Cristhian Pimiento.

DISEÑO ESTADÍSTICO PARA EL MONITOREO

Para la definición del diseño estadístico para la estimación de Carbono en Humedales del Magdalena medio y bajo, se siguieron los lineamientos del Sistema Estadístico Nacional (SEN), con el fin de generar información robusta que permita alimentar las estadísticas oficiales. Para efectos del uso del protocolo, se resumen algunos aspectos necesarios, con el objetivo de estandarizar los conceptos y el uso de estos.

Universo de estudio y población objetivo

Población

Es el conjunto de elementos acotados en un tiempo y en un espacio determinados, con alguna característica común observable o medible. Cuando la población es finita se indica que el tamaño poblacional es el número de elementos de esta y se denota como N .

Muestra

Es todo subconjunto de elementos de la población (se busca que sea representativa de la población, para al final generalizar los resultados a la población).

Unidad muestral

Es el elemento mínimo o entidad de la muestra. Es decir, son las unidades mínimas de observación o medición de los datos (parcelas) de distinto tamaño.

Tamaño muestral

Corresponde al número de elementos de la población que conforman la muestra y se denota con n .

Tipos de muestreo propuestos para el diseño

Muestreo aleatorio simple

Es un método de selección de n unidades de una población de tamaño N de tal modo que cada una de las muestras posibles tenga la misma oportunidad de ser elegida. Para aplicar este método, se enumeran las unidades de la población de 1 a N y posteriormente se extrae una serie de n números aleatorios entre 1 y N , lo anterior se puede realizar usando una tabla de números aleatorios. Así, se obtienen las unidades cuya numeración coincide con la serie de números seleccionados, las cuales conforman la muestra aleatoria.

Muestreo estratificado

Este método se usa principalmente cuando la característica en estudio no presenta una distribución aleatoria sobre las unidades muestrales. Los estratos (subconjuntos de unidades muestrales) deben tomarse de manera tal que los valores de la variable sean más homogéneos dentro de los mismos que entre ellos. Por ejemplo, para una variable dentro de una cobertura, se espera que tenga valores más homogéneos (presenta menor varianza) que entre diferentes coberturas. El método consiste en extraer una muestra aleatoria dentro de cada estrato y luego combinar la información proveniente de los distintos estratos, ponderada por el tamaño de los estratos considerados en el diseño.

Ventana de monitoreo

Dentro de los humedales para la cuenca del Magdalena medio y bajo se destacan, por extensión de mayor a menor, el Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ), el Complejo cenagoso de Zarate Malibu y Veladero y la Ciénaga de Barbacoas (Tabla 3). Considerando la variabilidad entre los humedales identificados, el diseño estadístico se centró en la eficiencia (en términos de costo y de tiempo) y precisión, en relación con la estimación de los parámetros. Lo anterior, permite cubrir toda la diversidad de hábitats presentes en los sitios de muestreo (variabilidad espacial), con el fin de capturar la mayor parte de la diversidad biológica.

Con el objetivo de seleccionar las unidades de muestreo que generen información para la estimación de carbono y biodiversidad, mediante el monitoreo de variables definidas en cada compartimiento del protocolo, se realizó un diseño de muestreo aleatorio estratificado (MAE), usando como factor de estratificación los resultados obtenidos desde el análisis de información geográfica para la identificación de zonas de muestreo (ZM), a partir de insumos geográficos de los suelos y de coberturas de la tierra (información de fuentes de información oficial disponibles al momento de la selección), los cuales fueron homologadas a clases propuestas por el IPCC para los futuros reportes. Se propone este diseño, debido a que se espera, para una variable dentro de una cobertura (uso de suelo), una respuesta más homogénea (es decir, una menor varianza) que entre diferentes coberturas. Lo mismo aplica para los tipos de suelo.

El Complejo Cenagoso de Zapatosa y la Ciénaga de Barbacoas son los humedales con mayor número de coberturas presentes por humedal (MEC, 2017). Por esta razón, se consideró importante realizar el muestreo estadístico en alguno de estos sitios y de esta forma, asegurar capturar la mayor variabilidad en la cuantificación de los contenidos de carbono en los humedales.

Propuesta de diseño para la cuantificación del carbono en humedales

A continuación, se detallan los pasos propuestos para la definición del diseño de muestreo en humedales.

Definir los límites del área de interés

El área de interés es la extensión de la superficie en la que se espera realizar la estimación del almacenamiento de carbono. En el caso de humedales, corresponde al área identificada y delimitada, para lo cual se propone el uso de la definición operativa de humedales propuesta por el proyecto CO₂ Humedales y consignada en este documento.

Estratificar el área de interés

Para minimizar los costos del muestreo para estimar la acumulación de carbono, se recomienda contar con un plan de muestreo estratificado para asegurar que todos los tipos de cobertura vegetal estén representados estadísticamente. En un plan de muestreo estos estratos pueden tener tamaños diferentes y así mismo, diferentes relevancias. En el caso del cálculo del carbono, puede llegar a ser más relevante incluir la cobertura con árboles comparada con la cobertura herbácea, ya que la primera posee mayor biomasa y, por ende, acumula más carbono. En este caso, tiene más peso en las estimaciones de carbono a nivel nacional (Casanoves et al., 2017).

Se propone realizar la estimación del carbono acumulado en humedales por medio de un diseño de muestreo estratificado, en el cual se use como factor de estratificación las coberturas identificadas previamente en el área de interés. El primer paso es recopilar la información existente en dicha área para los componentes del ecosistema enfocada hacia las unidades que más podrían actuar como sumideros de carbono.

Adicional al componente de vegetación, se debe identificar si otras variables, por ejemplo, las unidades cartográficas de suelo, presentan alta variabilidad en el área de interés. De ser así, se propone seleccionar los estratos a partir de información geográfica de coberturas de la tierra, combinado con el análisis de la geomorfología, la hidrología, la vegetación acuática y los suelos.

Seleccionar los depósitos a incluir en el diseño estadístico

Considerando que el objetivo del protocolo es la estimación de las existencias de carbono en compartimientos seleccionados (biomasa, MOM, suelos y biodiversidad), se utiliza la metodología propuesta por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio

Climático (UFNCCC, 2010), en la cual se estima el número de parcelas de muestreo necesarias, con base en la precisión que se defina para el muestreo y la variabilidad de las existencias de carbono.

Se considera que la variabilidad de las existencias de carbono se expresa como la desviación estándar de las existencias de carbono en el estrato (UFNCCC, 2010; estrato definido como la combinación de uso de suelo y tipo de suelo). El valor aproximado de la desviación estándar de las existencias de carbono en cada estrato en el momento de la estimación se conoce a partir de los datos existentes aplicables al área del proyecto o de los datos existentes relacionados con un área similar, o se estima sobre la base de una muestra preliminar o de un juicio experto. Para la determinación de las zonas de monitoreo, se contemplaron los siguientes pasos:

- ✦ Definición de la población objetivo: complejos de humedales ubicados en la cuenca del Magdalena medio y bajo.
- ✦ Definición de parámetros a estimar: contenidos de carbono en humedales en diferentes compartimientos.
- ✦ Definición del nivel de desagregación: departamento, complejo cenagoso, municipio.
- ✦ Definición de las unidades estadísticas:
 - Unidad de muestreo: parcelas de monitoreo.
 - Unidad de observación: vegetación, suelos, sedimentos.
 - Unidad de análisis: estratos dentro de cada zona de muestreo.
- ✦ Definición del diseño muestral: el universo se organizó en estratos (combinación entre tipo de suelo y uso de suelo – homologados IPCC).

Definición del tamaño de parcelas y puntos de muestreo

Como tendencia general, el tamaño de parcelas para las mediciones en cualquier componente está relacionado con la cantidad de carbono almacenado. En cuanto menor sea el tamaño de las parcelas, mayor será el número de réplicas necesarias para cumplir con el error deseado (Biocarbon Fund 2008).

Para calcular el número de parcelas (n) es necesario conocer el error deseado en porcentaje (E), el número de parcelas totales que se podrían establecer en el área de interés (N) (por ejemplo, área de cada estrato o área del proyecto), la varianza (S^2) o el coeficiente de

variación en porcentaje (CV) asociado con la variable de interés (en este caso la biomasa o carbono almacenado en los diferentes compartimientos) y el valor t de student para una probabilidad dada ($\alpha = 0,05$). Cuando se involucran diferentes estratos (H), para el cálculo del tamaño de muestra se debe tener en cuenta la importancia relativa o proporción (Pj) ocupada por cada uno de ellos.

Se debe calcular el número de parcelas de muestreo mínimo requerido para asegurar una representatividad de la variabilidad en la ventana de validación mediante la ecuación (UNFCCC, 2010):

$$n = \left(\frac{t}{\varepsilon}\right)^2 \times \left(\sum_i W_i \times S_i\right)^2$$

En donde:

n : Número de parcelas de muestreo necesarias para la estimación de existencias de carbono dentro de los límites del proyecto; sin dimensiones.

t : Valor t de Student bilateral en infinitos grados de libertad para el nivel de confianza requerido; sin dimensiones.

ε : Margen de error aceptable en la estimación de las existencias de carbono dentro de los límites del proyecto; t d.m. (o t d.m. ha⁻¹) unidades utilizadas para S_i . Estimado con datos del promedio de reserva de carbono en humedales $\times 0,1$ (10% precisión deseada).

W_i : Peso relativo del área del estrato i (es decir, el área del estrato i dividida por el área del proyecto); sin dimensiones.

S_i : Desviación estándar estimada del stock de carbono en el estrato i; t d.m. (o t d.m. ha⁻¹).

i : 1, 2, 3, ... estratos de estimación de existencias de carbono dentro de los límites del proyecto.

GENERACIÓN DEL INVENTARIO CARTOGRÁFICO PARA EL MONITOREO

El diseño metodológico propuesto para la generación de inventarios cartográficos para humedales comprende cinco fases que inician con la definición de la escala de trabajo, seguida de la búsqueda de la información geográfica, descarga de información en diferentes formatos, geoprocusamiento de los datos adquiridos para la ventana de interés y organización de la información geográfica en una geodatabase (GDB) y en un repositorio en la nube destinado para tal fin, con especial interés en la ventana piloto de validación del protocolo.

Definición de la escala

Debido a que la mayoría de los insumos cartográficos disponibles para el país se generan a escala nacional, para el caso del protocolo se propone tener en cuenta aquellos mapas generados tanto a escala nacional, como a escala regional y local. Siempre es necesario establecer la relación entre la escala cartográfica y los insumos disponibles para tener claridad del nivel de detalle que se quiere obtener con las representaciones cartográficas, que, en este caso, corresponde a aquellos mapas que representan datos de diferentes variables para el análisis espacial de la matriz agua y biodiversidad de los humedales del Magdalena medio y bajo.

Tabla 9. Categorías de escalas y su respectivo nivel de detalle cartográfico (IGAC, 2018).

Categoría	Detalle cartográfico
Escala pequeña	Mayor a 1:100.000.
Escala mediana	1:5.000 hasta 1:100.000.
Escala grande	Menor a 1:5000.

Fuente: elaboración propia (2024).

Búsqueda de información geográfica

La búsqueda se realiza filtrando los datos de acuerdo con criterios de temática, escala, palabras clave, entre otros. Estos criterios dependen de cada plataforma consultada, dado que son creadas sobre diferentes tipos de catálogos. A continuación, se presentan las temáticas principales de la información disponible para descargar y que está relacionada con humedales para el territorio nacional.

Tabla 10. Listado de entidades y plataformas web en las que se realiza la búsqueda de información geográfica relacionada con humedales para Colombia.

Entidad	Plataforma	Temáticas
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC): http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas	Agua Biodiversidad Cambio climático Suelo
Instituto Geográfico Agustín Codazzi	Colombia en mapas: https://www.colombiaenmapas.gov.co/#	Cartografía básica Agrología Ambiente y desarrollo sostenible

Entidad	Plataforma	Temáticas
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	Información geográfica de datos abiertos del IDEAM - Capas GEO: http://www.IDEAM.gov.co/capas-geo	Monitoreo y seguimiento de suelos y tierras Monitoreo y seguimiento de los ecosistemas Monitoreo evaluación y modelamiento del recurso hídrico Seguimiento y caracterización del clima Unidades de análisis y referencia
Instituto de Investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt	GeoNetwork I2D: http://geonetwork.humboldt.org.co/	Aguas Interiores Cobertura de la tierra con mapas básicos e imágenes Información geocientífica Medio ambiente

Fuente: elaboración propia (2024).

Por otro lado, en caso tal que existan capas geográficas que no hayan sido oficializadas, sino generadas al interior de la institución, se debe hacer la solicitud de la información para complementar el conjunto de datos geográficos con que se quiera contar en el repositorio.

Descarga de información geográfica

Para el caso de una ventana piloto de implementación de ecosistemas de humedales, se recomiendan las capas geográficas en formato *shapefile* y geodatabase para datos vectoriales, y archivos TIFF para datos ráster. Estos datos, a nivel de inventario cartográfico, se pueden organizar bajo ocho (8) temáticas principales:

- ✚ Biodiversidad: datos geográficos de los registros de especies distribuidas sobre la ventana piloto.
- ✚ Cartografía base: entidades geográficas que representan las superficies de agua de la ventana piloto, así como modelos digitales de elevación.
- ✚ Clima: datos de variables climatológicas, principalmente temperatura y precipitación.

- └ Coberturas de la Tierra: información geográfica que describe, caracteriza, clasifica y compara las características principales de cada tipo de cobertura de la tierra.
- └ Ecosistemas: cartografía que representa la distribución y diferenciación de las unidades de ecosistemas de humedal.
- └ Gases de Efecto Invernadero: datos geográficos de absorciones y emisiones de GEI.
- └ Hidrología: representación cartográfica de variables hidrológicas.
- └ Suelos: información cartográfica de unidades de suelos y de procesos de degradación de los suelos.

Al finalizar el proceso de descarga de las capas geográficas se procede con el geoprocesamiento de los datos, con el objetivo de contar con los datos que correspondan solo al área de interés o ventana piloto priorizada.

Consideraciones para la generación del inventario cartográfico

Para el caso de los ecosistemas acuáticos y biodiversidad, existen muchos vacíos de información a nivel nacional y regional, pues bien, se han identificado diferentes estrategias de monitoreo en las áreas hidrográficas del país, que están siendo lideradas por entidades del estado y/o académicas, pero a la fecha no hay una política de monitoreo de los ecosistemas de Colombia, que de lineamientos claros ni que proponga una hoja de ruta para la generación de inventarios cartográficos como apoyo a las estimaciones de carbono.

Por lo anterior, se identifica la necesidad de contar con mayor cantidad de información y a escalas mayores, lo cual se logra continuando con el trabajo interinstitucional para recopilar mayor cantidad de datos e insumos de tipo cartográfico generados por institutos y organizaciones ambientales tales como el SINCHI, la ANLA, Parques Nacionales Naturales, IAvH, IDEAM, Ministerio de Ambiente, IIAP, INVEMAR, entre otras, así como las Corporaciones Autónomas Regionales.

Sin embargo, los datos geográficos con cubrimiento nacional tienen un bajo nivel de actualización, debido principalmente a la falta de recursos de los institutos de investigación que generan la cartografía de Colombia, y por la falta de equipos de hardware con capacidad para ejecutar procesos a partir de datos que ocupan gran espacio de almacenamiento. Este aspecto es clave para el análisis de variables de humedales, pues en caso de no contar con información periódica, la propuesta metodológica desde el

componente SIG debe ser ajustada de acuerdo con la temporalidad de los insumos cartográficos.

Por otro lado, respecto al acceso a la información geográfica, aquellos recursos a los que se accede mediante plataformas web presentan problemas, por tratarse de geovisores o servidores en los que no está organizada la información de forma que el usuario pueda encontrar fácilmente las opciones para las consultas.

Finalmente, se identifica que las entidades productoras de información geográfica realizan sus procesos de forma aislada, lo cual genera análisis sesgados en la mayoría de los casos, sin que exista interoperabilidad de los datos. Por el momento, la plataforma que recopila la mayor cantidad de información es la de Colombia en Mapas del IGAC.



Quemas en el Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fotografía: Yenny Mendoza

DELIMITACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE MUESTREO

Este proceso se realiza a partir de datos geográficos de los suelos (IGAC, 2014) y de coberturas de la tierra (IDEAM, 2021), dado que el objetivo de la delimitación de zona de muestreo (ZM) es identificar, cuantificar y visualizar aquellas áreas con características edáficas y de uso similares (IGAC e Instituto Humboldt, 2018). Considerando las necesidades particulares del protocolo para cuantificar contenidos de carbono, las dos capas geográficas se homologaron para contar con las unidades espaciales necesarias antes de la generación de la capa de ZM.

Homologación de las unidades cartográficas de suelos de la capa de geopedología a escala 1:100.000 (IGAC, 2014)

A partir de las Unidades Cartográficas de Suelos se identificaron aquellas de relevancia para el proceso y se homologaron de acuerdo con la clasificación definida en IPCC, 2006 (Tabla 11).

Tabla 11. Homologación de la información geográfica de suelos a clases IPCC.

Código IPCC	Clasificación IPCC	Unidad cartográfica Suelo (Mapa IGAC 2014)
HAC	Arcillas de alta actividad	LWDb2
		LWDc2
		LWDd2
		PVBa
		PVDa
		PVDa1
		PVEa1
		PVEa2
		PVEb2
		PVHa
		PVJd3
		RWAa
		RWCa
		RWEa
		RWEb
		RWEb2
LAC	Arcillas de baja actividad	RWEa
		RWEa3
AR	Arenales	LWEa2

		LWEb2
		LWFa
		LWFc
		LWFc2
		PWFa
		PWFa1
		PWFa2
		PWFb2
		PWHa
		RVAa
		RWKai
HM	Humedales	LVFb
OM	Otros suelos Minerales	RWDaz
		PVCb2
		RVBa
		LVCd2
		LVCe3
		LWCb2
		LWCc
		LWCd1
		LWCe1
		MVCf2
		PVAap
		PVAbp
		RWJa

Fuente: elaboración propia (2024).

Una vez obtenida la capa de suelos homologada (ejercicio que debe ser realizado por un profesional experto en suelos), los polígonos representados según las clases IPCC fueron objeto de un geoprocesamiento conjunto con la capa de coberturas.

Homologación de las clases de coberturas de capa de coberturas de la tierra a escala 1:100.000 (IDEAM, 2021)

La capa geográfica de coberturas de la tierra del período 2018 a escala 1:100.000 cuenta con los niveles 3, 4, 5 y 6 de la leyenda CLC para Colombia (IDEAM, 2010); sin embargo, dependiendo de la extracción de los datos para determinadas áreas del país, la disponibilidad de los polígonos clasificados para estos niveles puede variar. En este sentido, se debe tener en cuenta que la clasificación mencionada no corresponde a la

definida por el IPCC, 2006, por lo cual se hace necesario llevar a cabo una homologación para agrupar las clases de coberturas (Tabla 12), excluyendo las coberturas de bosques que son analizadas y reportadas por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) del IDEAM, con el fin de evitar doble cuantificación.

Tabla 12. Homologación de la información geográfica de usos a clases IPCC.

Código	Categorías de uso de la tierra para el sector AFOLU adaptadas a humedales	Nivel 3 CLC
SL	Asentamientos	1.1.1. Tejido urbano continuo
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo
		1.2.1. Zonas industriales o comerciales
		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados
		1.2.4. Aeropuertos
		1.2.5. Obras hidráulicas
		1.3.1. Zonas de extracción minera
		1.3.2. Zona de disposición de residuos
		1.4.1. Zonas verdes urbanas
		1.4.2. Instalaciones recreativas
C	Tierras de Cultivo	2.1.1. Otros cultivos transitorios
		2.1.2. Cereales
		2.1.3. Oleaginosas y leguminosas
		2.1.4. Hortalizas
		2.1.5. Tubérculos
		2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
		2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos
		2.4.1. Mosaico de cultivos
		2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
		2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
Hz	Herbazal	3.2.1. Herbazal
OVL	Otra vegetación leñosa	3.2.2. Arbustal
		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
OL	Otras tierras	3.3.1. Zonas arenosas naturales
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4. Zonas quemadas
		5.1.1. Ríos (50 m)
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
		9.9. Nubes

Código	Categorías de uso de la tierra para el sector AFOLU adaptadas a humedales	Nivel 3 CLC
W	Otros Humedales	4.1.1. Zonas Pantanosas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
G	Pastos	2.3.1. Pastos limpios
		2.3.2. Pastos arbolados
		2.3.3. Pastos enmalezados
		2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
F	Tierras forestales	3.1.2.1.2 Bosque abierto alto inundable
		3.1.2.1.2 Bosque abierto bajo inundable
		3.1.3. Bosque fragmentado
		3.1.4. Bosque de galería y ripario

Fuente: elaboración propia (2024).

Cabe aclarar que algunas coberturas no fueron tomadas en cuenta para la generación de las ZM por no hacer parte del objetivo principal del proyecto que es la estimación de carbono y de datos de actividad de humedales naturales continentales, por lo cual se les ha asignado la clase ‘no aplica’ (NA); sin embargo, en las salidas cartográficas se debe mantener tanto en la simbología, como en la leyenda, para conocer la distribución de esta cobertura en los humedales piloto seleccionados.

Delimitación e identificación de Zonas Homogéneas de Muestreo (ZHM)

Una vez se tengan disponibles las capas homologadas de suelos y coberturas de acuerdo con lo descrito anteriormente, se procede con la unión de las capas resultantes:

- Capa de suelos homologada según las clases del IPCC.
- Capa de coberturas de la tierra homologada según las clases del IPCC.

Para este proceso se recomienda hacer uso de la herramienta ‘Unión’ mediante la cual se crea una nueva capa geográfica a partir de la superposición de dos capas de entrada. La capa de salida contiene los polígonos y atributos combinados de ambas coberturas, que en este caso son los correspondientes a los atributos de suelos de la capa de geopedología (IGAC, 2014) y los atributos de coberturas de la capa de coberturas de la tierra período 2018 (IDEAM, 2021). Una vez se tenga la capa con la unión de los suelos y las coberturas,

se procede a codificar y clasificar las combinaciones resultantes, es así como se tiene que la primera parte de esta clasificación corresponde al atributo de suelos y la segunda al atributo de uso. Finalmente, se realiza el cálculo de áreas en unidad de hectáreas (ha) para disponer la información al equipo de trabajo.

Selección de zonas de muestreo

Zonas de muestreo para suelos y vegetación

De acuerdo con las necesidades del proyecto, se definió como el universo de trabajo la totalidad de las ZM (se excluyeron aquellas cuyo suelo o cobertura estuvieran asociadas a zonas urbanas, asentamientos o infraestructuras) y posteriormente, se seleccionaron todos los polígonos con el área más grande que representara la unidad. Es importante resaltar que las unidades seleccionadas corresponden a suelos y coberturas terrestres.

Zonas de muestreo para biodiversidad

El compartimiento de biodiversidad para los humedales se asoció especialmente a fauna vertebrada e hidrobiológicos, donde la priorización de ZM se llevó a cabo a partir de la selección de aquellas asociadas a suelos y/o coberturas acuáticas (esto para hidrobiológicos) y otra selección para coberturas de transición. A partir de dichas zonas se ubicaron algunas de interés para el experto temático, con lo cual se perfiló una zona de muestreo a manera de área de interés, donde se establecieron los sectores de muestreo.

Para la caracterización de los grupos biológicos de aves, reptiles y mamíferos, el muestreo se realizó considerando como factor la cobertura de la tierra homologada bajo la metodología IPCC y que mediante la herramienta SIG se identificaron los polígonos en el área de estudio (tipos vegetación de tipo leñosa (OVL), áreas forestales (F), pastizales (G), áreas de cultivo (C) herbazales (Hz) y áreas del espejo de agua y playones (W)). Para cada cobertura se seleccionó de forma aleatoria 3 polígonos y en cada polígono se realizaron transectos de observación.

Teniendo en cuenta la diversidad de hábitats (según el mapa de coberturas), la representatividad del análisis, la viabilidad operativa para el monitoreo posterior y la articulación con los demás compartimientos y componentes del proyecto, es importante tener en cuenta:

- ✦ Al menos tres zonas de muestreo en cada una de las coberturas identificadas. Este criterio pretende incluir la mayor parte de los hábitats y microhábitats posibles para la biota, así como hacer representativos los análisis posteriores.
- ✦ Zonas con influencia de los principales ríos afluentes (por ejemplo, Cesar y Magdalena). Esto con el fin de lograr una caracterización más completa, relacionada con la dinámica hidrológica del humedal a monitorear.
- ✦ Zonas en las que se realizan acciones de intervención (relacionadas con restauración, conectividad y/o corredores de conservación). Este criterio se considera de gran importancia para los análisis posteriores relacionados con las acciones para la reducción de emisiones de GEI.
- ✦ Zonas identificadas como de “condiciones particulares” en estudios previos que se hayan realizado en la zona de muestreo, debido a que presentan características físicas, químicas, hidráulicas o biológicas especiales.
- ✦ Zonas comunes a los compartimientos de suelos y biomasa (vegetación), especialmente en aras a la operatividad de los monitoreos y la mayor consistencia espacial de las cuantificaciones.

DELIMITACIÓN: CAMBIOS DE EXTENSIÓN DEL HUMEDAL

Los análisis de cambios de extensión se realizan usando herramientas SIG para los años seleccionados, de acuerdo con la temporalidad definida. En este protocolo, corresponden a cada dos años, con temporada seca (aguas bajas) y de lluvia (aguas altas), establecidos a partir de los análisis de variables hidrometeorológicas. Este proceso es sumamente importante debido a que, para el caso de los ecosistemas acuáticos, su identificación y análisis deben ser detallados por la alta variabilidad que presentan en sus límites y rondas, debido a las variaciones (expansión y contracción) acordes a la época del año, determinadas por las temporadas de lluvia y sequía.

De acuerdo con lo anterior, se presenta una propuesta metodológica para el preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento de imágenes de radar Sentinel-1 de acceso gratuito, para analizar los cambios de extensión de los humedales del Magdalena medio y bajo. Para esto se analizan las áreas de inundación, definidas de acuerdo con el alcance del agua sobre el suelo y debajo de la vegetación hacia los límites exteriores del humedal. Estos procesos son causados de forma natural, por ejemplo, por eventos de precipitación extrema, o por fenómenos antrópicos cuando se inundan predios para fines particulares, principalmente para actividades de agricultura como cultivos de

arroz. Por lo anterior, los mapas de inundación se generan para reducir y monitorear la extensión de las inundaciones en ecosistemas de humedal, ayudando al manejo de desastres.

Etapa 1. Preprocesamiento

Uno de los aspectos más importantes a ser definidos es la escala cartográfica bajo la cual se quieren presentar los resultados obtenidos a partir de las imágenes satelitales seleccionadas para tal fin (Tabla 13).

Tabla 13. Imágenes de satélite adecuadas para las diferentes escalas cartográficas.

Escala	Rango de escala	Tipo de levantamiento e insumos
Nacional	1:100.000. o mayor	Representación de grandes extensiones, por ejemplo, países, con fines de reconocimiento. Imágenes ópticas: Landsat (5, 7, 8 y 9), MODIS, Terra, entre otras. Imágenes de radar: TerraSAR-X.
Regional	1:10.000. a 1:100.000.	Levantamientos semi detallados. Imágenes ópticas: Sentinel-2, RapidEye, Spot 6/7, PlanetScope. Imágenes de radar: Sentinel-1, Alos Palsar, TerraSAR-X, entre otras.
Local	Menor a 1:10.000.	Levantamiento a nivel de detalle. Imágenes ópticas: QuickBird, Pléiades, WorldView, entre otras. Imágenes de radar: TerraSAR-X, entre otras.

Fuente: elaboración propia (2024).

En cuanto a la periodicidad del monitoreo, será cada dos años. Así mismo, esto se complementa con los regímenes hidrológicos monomodales o bimodales característicos de Colombia en los que se presenta una temporada de lluvias y una seca, y dos temporadas de lluvias y dos seca respectivamente. Al tener definida la escala espacial, escala temporal y regímenes hidrológicos (temporada de lluvias y temporada seca) se procede con la búsqueda, selección y descarga de las imágenes, accediendo a plataformas web de acceso gratuito; en algunas de estas es posible generar los mosaicos y descargarlos con el fin de disminuir el tiempo de preprocesamiento (Figura 9).

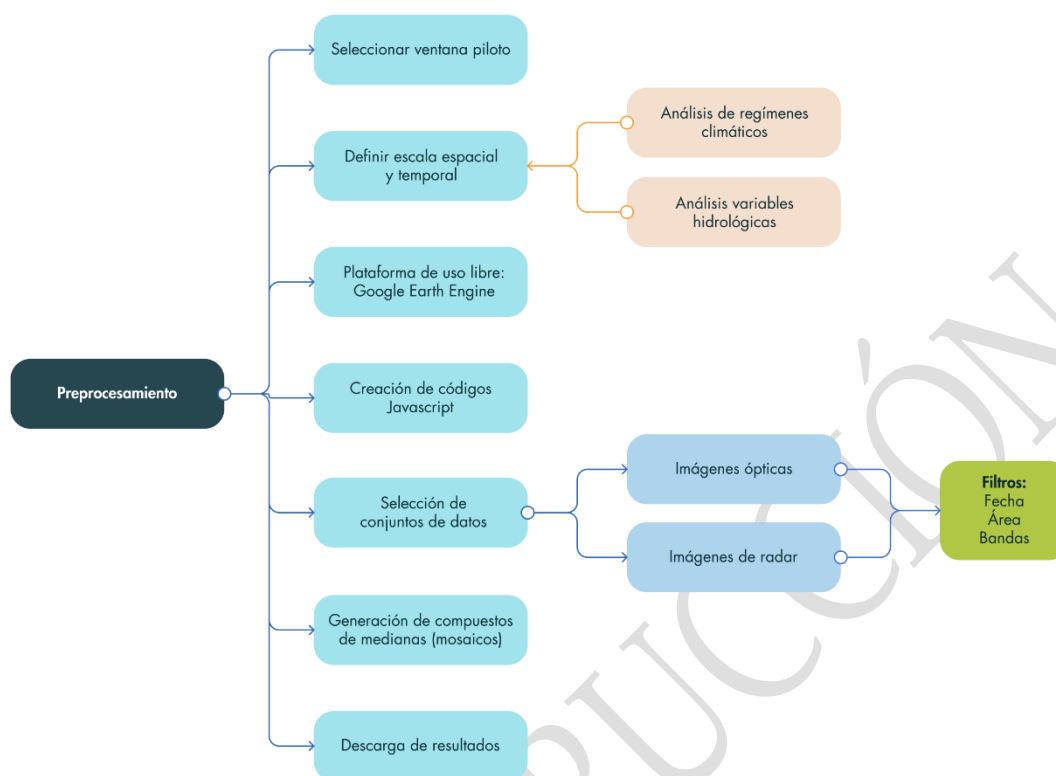


Figura 9. Etapa de preprocesamiento digital de imágenes satelitales para el análisis de extensión de humedales del Magdalena medio y bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Para la implementación de esta metodología se propone usar imágenes de radar Sentinel-1, debido a que son insumos adecuados para extraer datos de las zonas inundadas o con presencia de recurso hídrico (Ozesmi & Bauer, 2002a). Una vez definido el conjunto de datos a usar, se procede con la creación del código para la descarga de los compuestos temporales de medianas de las imágenes Sentinel-1 (Tabla 14).

Tabla 14. Código desarrollado en Google Earth Engine para la descarga de compuestos de medianas de imágenes de radar Sentinel-1.

Criterio	Código
Cargar colección Sentinel-1	<code>var sentinel1 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')</code>
Filtrar para el área de interés	<code>.filterBounds(table)</code>
Filtrar por rango de fechas	<code>.filterDate ('2016-09-01', '2016-11-30');</code>
Filtrar por propiedades de metadatos	<code>var VvIw = sentinel1</code>
Filtrar imágenes con polarización dual VV, VH	<code>.filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))</code>

Criterio	Código
	<code>.filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))</code>
Filtrar imágenes colectadas en modo Interferometric Wide Swath (IW)	<code>.filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'));</code>
Separar imágenes de órbita ascendente y descendente en diferentes colecciones	<code>var vvVhIwAsc = vvVhIw.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'ASCENDING')); var vvVhIwDesc = vvVhIw.filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'));</code>
Generar mosaicos de medianas	<code>// Mediana VH ascendente var vhIwAscMean = vvVhIwAsc.select('VH').mean(); // Mediana VH descendente var vhIwDescMean = vvVhIwDesc.select('VH').mean(); // Mediana VV para combinar colecciones de imágenes ascendentes y descendentes var vvIwAscDescMean = vvVhIwAsc.merge(vvVhIwDesc).select('VV').mean(); // Mediana VH para combinar colecciones de imágenes ascendentes y descendentes var vhIwAscDescMean = vvVhIwAsc.merge(vvVhIwDesc).select('VH').mean();</code>
Desplegar medianas temporales sobre el mapa base	<code>Map.addLayer(vvIwAscDescMean.clip(table), {min: -12, max: -4}, 'vvIwAscDescMean'); Map.addLayer(vhIwAscDescMean.clip(table), {min: -18, max: -10}, 'vhIwAscDescMean'); Map.addLayer(vhIwAscMean.clip(table), {min: -18, max: -10}, 'vhIwAscMean'); Map.addLayer(vhIwDescMean.clip(table), {min: -18, max: -10}, 'vhIwDescMean');</code>
Centrar para visualizar sobre área de interés Complejo Cenagoso de Zapatosa	<code>Map.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);</code>
Exportar mosaico Sentinel-1 a Google Drive	<code>Export.image.toDrive({ image: nombre mosaico de interés, description:'S1_mos_T3_2016', fileFormat:'GeoTIFF', scale:10, region: table, maxPixels:1e9 });</code>

Fuente: elaboración propia (2024).

Este código incluye líneas en las que se definen criterios técnicos previo al procesamiento, ya que las imágenes de radar de las diferentes constelaciones disponibles en el mercado (pagas o gratuitas) presentan varias opciones de toma de datos, es decir, los modos de captura de las imágenes cambian, así como características como la polarización, la dirección de la toma según la órbita (ascendente o descendente) y las fechas en que son lanzados los satélites (Bourgeau-Chavez et al., 2021).

Por lo anterior, al momento de realizar la búsqueda de los mosaicos de imágenes disponibles para el área de interés, se sugiere plantear en el código todas las opciones tanto de polarización como de generación de medianas de las combinaciones de órbita ascendente y descendente.

Etapa 2: procesamiento

Incluye la ejecución de procesos, a partir de las imágenes seleccionadas, o generación de compuestos de medianas para la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest de aprendizaje automático (Figura 10). Una de sus ventajas es que obtiene un mejor rendimiento de generalización, debido a que compensan los errores de las predicciones de los distintos árboles de decisión; es decir, a medida que se va ejecutando el algoritmo se va entrenando para clasificar de forma más precisa, con lo cual aumentan los valores de precisión de la clasificación.

Para el protocolo se propone usar el algoritmo Random Forest, debido a que se obtiene la separabilidad de las clases 'Agua' y 'No agua' de manera rápida y teniendo alta precisión en los resultados; así mismo, se analizan las variables de extensión y dinámica de los cuerpos de agua entre un período y otro, teniendo como referente la estacionalidad climática del área de interés (Figura 10).

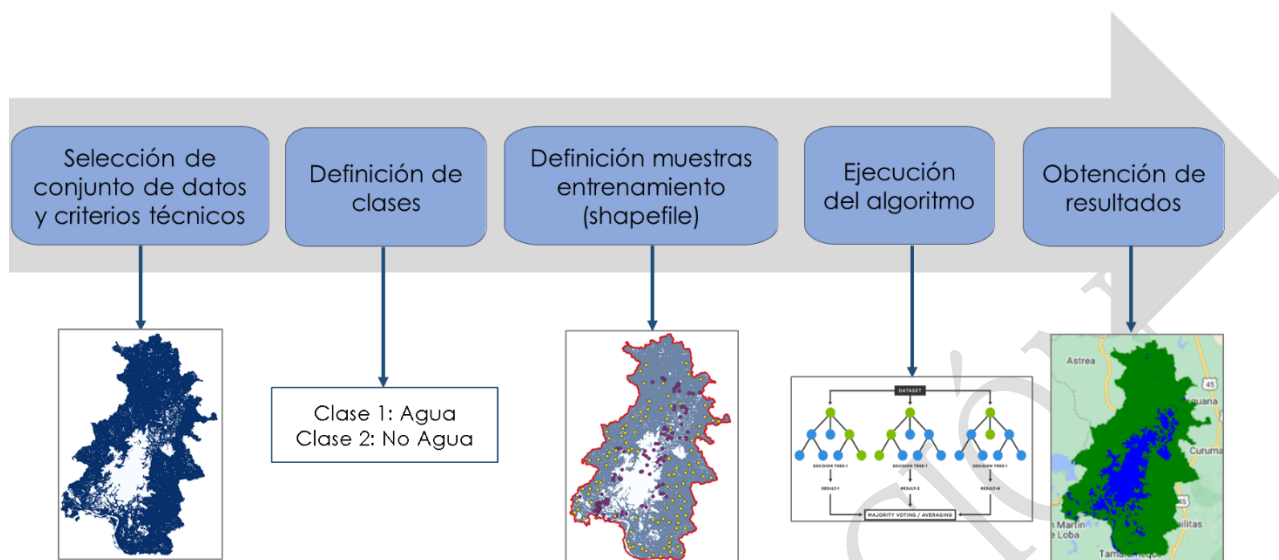


Figura 10. Fases para la ejecución de Random Forest en Google Earth Engine. Fuente: elaboración propia (2024).

Una vez se selecciona el conjunto de datos de imágenes ópticas o de radar, se definen las clases para la separabilidad de píxeles que, para el análisis de cambios de extensión de humedal, dado que el objetivo es separar los píxeles correspondientes a presencia de agua de los píxeles de las demás coberturas terrestres, las clases propuestas son:

- Presencia de agua - clase 'Agua'.
- No presencia de agua - clase 'No agua'.

Luego, a partir del compuesto de medianas, se crean archivos en formato *shapefile* para la creación de entidades de tipo punto o poligonal con las muestras de entrenamiento, estas pueden ser tomadas en campo o creadas en software SIG de forma manual. Se sugiere que cada *shapefile* creado para cada clase contenga mínimo 100 puntos o áreas para que el algoritmo tenga mayor exactitud al momento de clasificar. Contando con las muestras de entrenamiento se ejecuta el algoritmo Random Forest (ejemplo en la Figura 11).

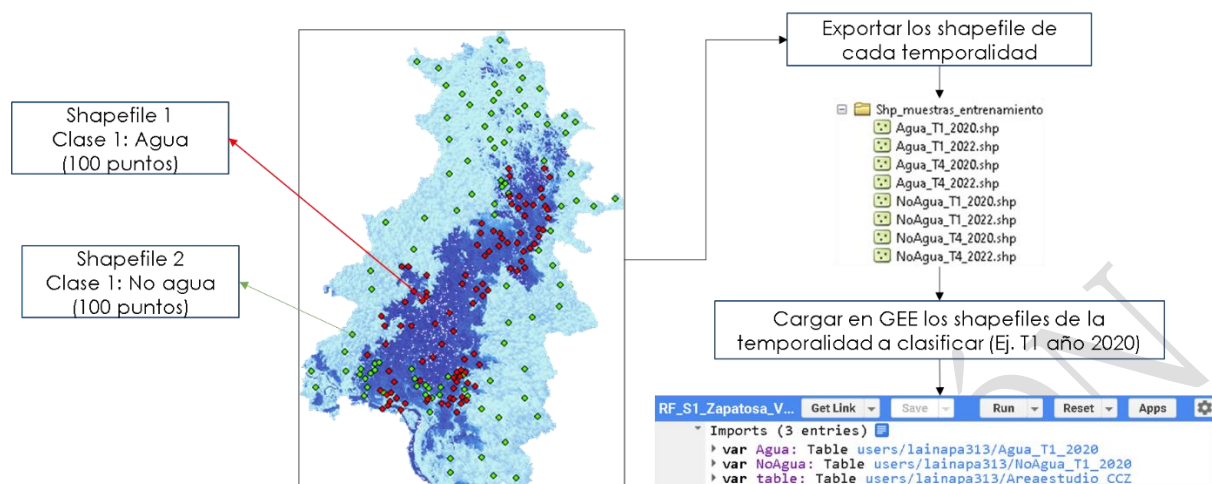


Figura 11. Ejemplo de la preparación de las muestras de entrenamiento previo a la ejecución del algoritmo Random Forest en GEE. Fuente: elaboración propia (2024).

Para ejecutar el proceso, en GEE (Google Earth Engine) en la ventana de editor de código se insertan primero las líneas de código creadas para la generación de mosaicos (Tabla 15), seguidamente, se crea el código para la clasificación, donde se indican las clases, el tamaño de cada muestra, el algoritmo de clasificación y el mosaico que se quiere clasificar.

Tabla 15. Código desarrollado en Google Earth Engine para la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest.

Criterio	Código
Nombre de clases definidas (agua, no agua)	<code>var muestras = Agua.merge(NoAgua);</code>
Muestras de clases definidas (agua, no agua)	<code>var entrenamiento = IwAscDescMean.sampleRegions(muestras,['Clase'],100); print(entrenamiento.size())</code>
Selección de bandas del sensor seleccionado	<code>var bandas = ['VV']</code>
Algoritmo de clasificación	<code>var clasificacion = ee.Classifier.smileRandomForest(50). train(entrenamiento,'Clase',bandas);</code>
Resultado de la clasificación	<code>var image = IwAscDescMean.classify(clasificacion);</code>
Matriz de confusión y precisión del entrenamiento	<code>var confusionMatrix = clasificacion.confusionMatrix(); print('Confusion matrix: ', confusionMatrix); print('Training Overall Accuracy: ', confusionMatrix.accuracy());</code>
Cálculo del índice Kappa	<code>var kappa = confusionMatrix.kappa(); print('Training Kappa', kappa);</code>

Criterio	Código
Visualizar el resultado de la clasificación sobre el mapa base	Map.addLayer(image.clip(table), {min:1,max:2,palette:['blue','green']},'clasificado');
Exportar a Google Drive	Export.image.toDrive({ image:image, scale:10, description:'RF_CCZ_T1_2016', fileFormat:'GeoTIFF', region: table, maxPixels:1e11 });

Fuente: elaboración propia (2024).

Finalmente, se descarga el resultado de la clasificación para cada temporalidad establecida y se verifica en el software SIG que la clasificación se haya hecho acorde a lo establecido en el código.

Etapas 3. Posprocesamiento

Se procede con la evaluación de la precisión de la clasificación supervisada y con establecer el límite máximo del humedal para cada temporada (seca y de lluvia).

Análisis de precisión de la clasificación

A partir de los resultados obtenidos mediante GEE, se visualiza la matriz de confusión y los índices de exactitud directamente en la pestaña 'Consola' de la misma plataforma. Esto es posible debido a la inclusión de las líneas de código que generan los informes correspondientes.

```
var confusionMatrix = clasificacion.confusionMatrix();
print('Confusion matrix: ', confusionMatrix);
print('Training Overall Accuracy: ', confusionMatrix.accuracy());
var kappa = confusionMatrix.kappa();
print('Training Kappa', kappa);
```

En la matriz de confusión se establece una comparación entre los valores de la clase de referencia con los valores de la clase asignados por el intérprete en una matriz de filas y columnas (a x a), donde a es el número de clases. Las filas corresponden a las clases reales y las columnas son las previstas por el modelo; es decir, el objetivo principal de la matriz

es mostrar los casos donde una clase ha sido confundida con otra al momento de la clasificación.

La diagonal principal representa los valores de la suma de todas las predicciones acertadas bajo la clase sindicada, que en este caso son las clasificaciones correctas. Por otra parte, la exactitud del usuario muestra falsos positivos, donde la clasificación de los píxeles es errada y los valores han sido clasificados dentro de una clase diferente a la real, por ejemplo, cuando la clasificación dice que la clase es de tipo 'No agua' pero en realidad no lo es; y también están los falsos negativos, como por ejemplo cuando clasifica los píxeles en la clase de 'Agua' pero corresponde a 'No agua'.

Así mismo, los resultados de GEE arrojan otros valores de la evaluación de la exactitud, importantes para interpretar la precisión de la clasificación:

- ✦ Precisión general del entrenamiento, que indica el porcentaje de coberturas que se han clasificado con facilidad y cuya asignación de clases se realizó a partir de los puntos de muestreo. El porcentaje restante corresponde a aquellas coberturas sobre las cuales es más difícil realizar la interpretación. Por ejemplo, si se tiene un resultado de 0,92 quiere decir que el 92% de las coberturas se clasificaron a partir de las muestras de entrenamiento y el 8% restante tuvo dificultad para ser asignada a una clase particular. Estos valores de precisión permiten definir si es necesario establecer un mayor número de clases, de forma que la separación de píxeles sea acorde con las coberturas reales, o bien editar las áreas de entrenamiento para ejecutar de nuevo el proceso.
- ✦ El índice Kappa mide la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación y la posibilidad de lograr una clasificación correcta con un clasificador aleatorio (Kumar et al., 2020); es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{(\text{exactitud observada} - \text{probabilidad de acierto})}{(1 - \text{probabilidad de acierto})}$$

Establecimiento del límite máximo del humedal

Se realiza mediante la ejecución de procesos de análisis espacial, creados en software SIG de escritorio, para la generación de salidas cartográficas donde se representen los resultados de los cambios de extensión del humedal en formato vectorial.

- Suma algebraica de los ráster clasificados para cada temporada (seco y de lluvias) para las temporalidades seleccionadas utilizando herramientas de análisis espacial en software SIG; en ArcGIS, se usa la herramienta 'Map algebra'. En la Figura 12, se presenta un ejemplo de la suma para los dos periodos (2016 y 2018).

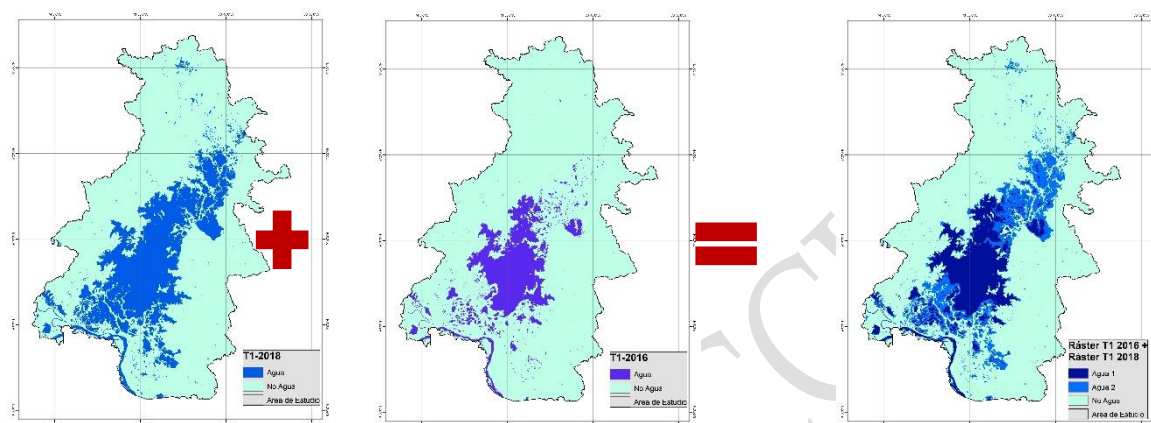


Figura 12. Suma algebraica de los ráster clasificados para el periodo seco de las temporalidades de 2016 y 2018. Fuente: elaboración propia (2024).

- Reclasificación del ráster resultado de la suma, en dos clases: Agua y no agua, mediante herramientas de análisis espacial en software de SIG. En ArcGIS, se usa la herramienta 'Reclassify' (Figura 13).

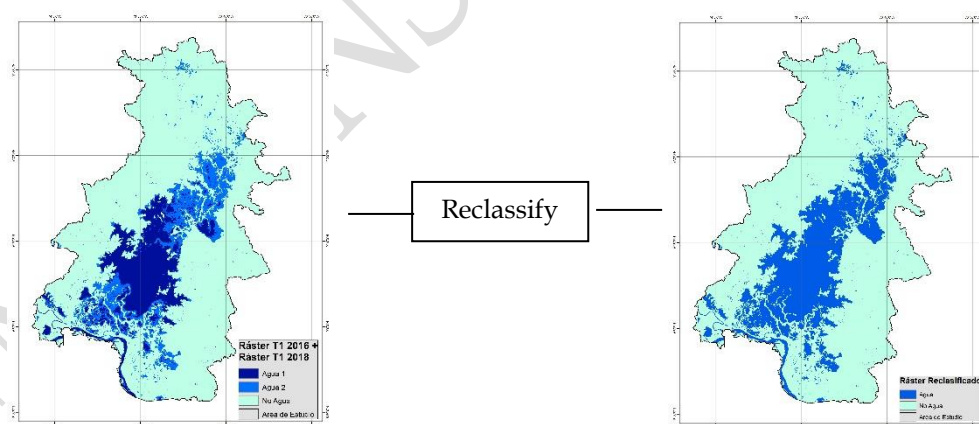


Figura 13. Reclasificación del ráster resultado de la suma por temporalidades. Ejemplo periodo seco (diciembre a febrero) de los años 2016 y 2018. Fuente: elaboración propia (2024).

- Filtro del ráster resultado de la reclasificación para eliminar pixeles dispersos. Se recomienda realizar un filtrado mayoritario, mediante herramientas de análisis

espacial en software SIG, que para el caso de ArcGIS está disponible la herramienta de generalización 'Majority Filter' (Figura 14).

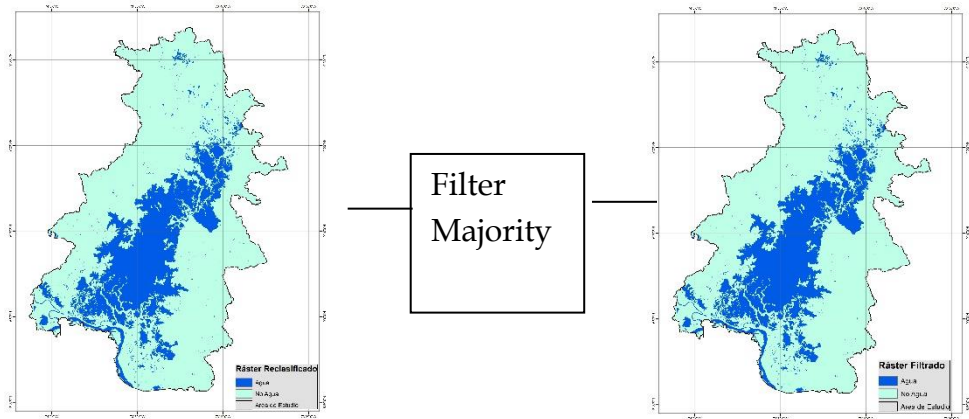
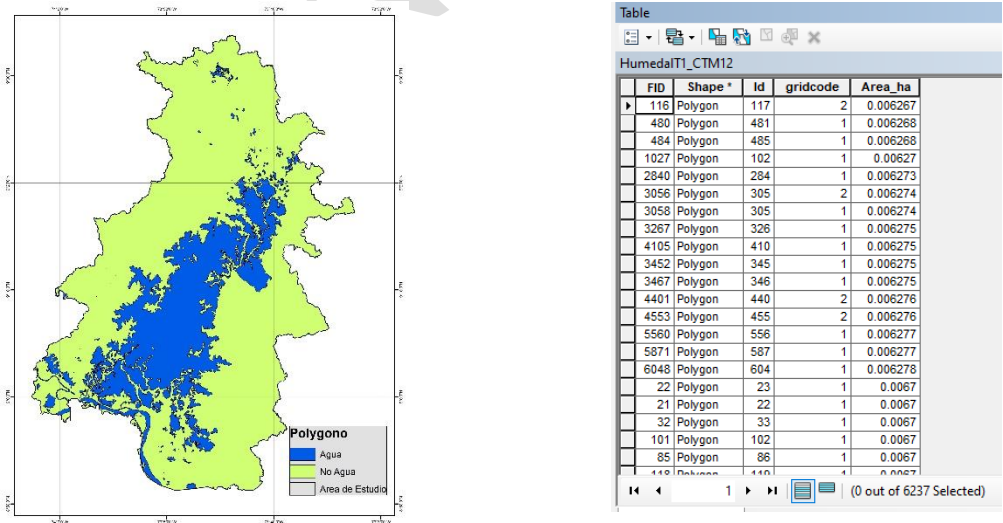


Figura 14. Filtrado del ráster resultado de la Reclasificación. Fuente: elaboración propia (2024).

- ✦ Proceso de vectorización, mediante la conversión del ráster resultado del proceso de filtrado a polígono, mediante herramientas de conversión en el software de SIG. En ArcGIS se utiliza la herramienta de conversión 'Raster to Polygon' para la vectorización (Figura 15).
- ✦ Cálculo del área en unidad de hectáreas (ha) de cada uno de los polígonos del *shapefile* resultado de la conversión de ráster a polígono (Figura 15).



Polígono (*shapefile*)

Tabla de atributos de la capa resultante

Figura 15. Conversión de ráster a polígono y su tabla de atributos con el cálculo del área. Fuente: elaboración propia (2024).

- ✦ Eliminación de los polígonos menores a 25 ha, mediante la herramienta de generalización del software SIG. En ArcGIS se utiliza la herramienta de manejo de datos, 'Eliminate' (
- ✦ Figura 16).

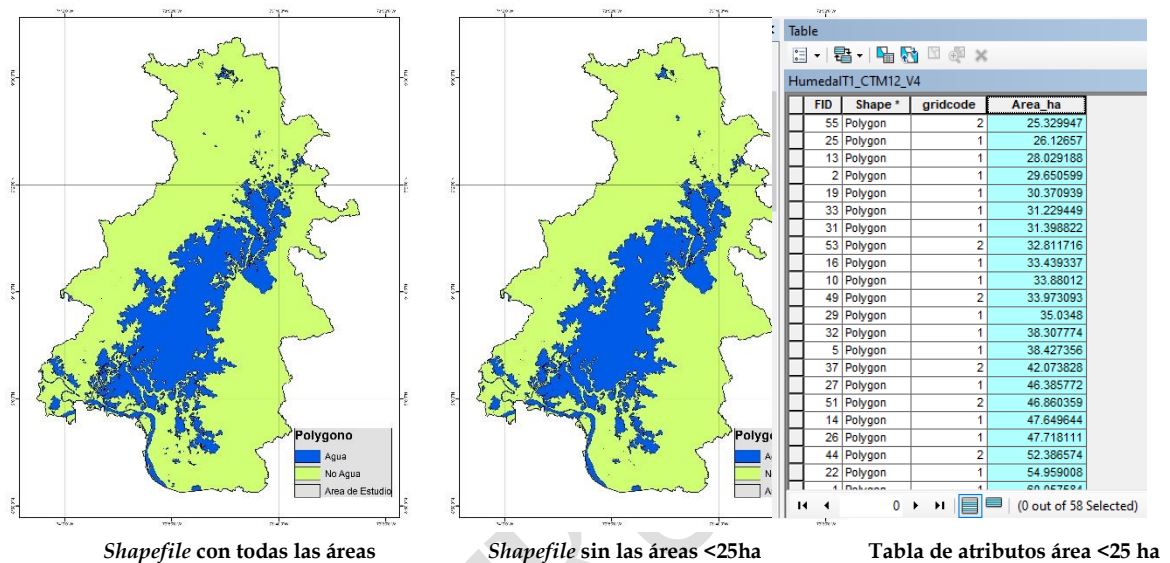
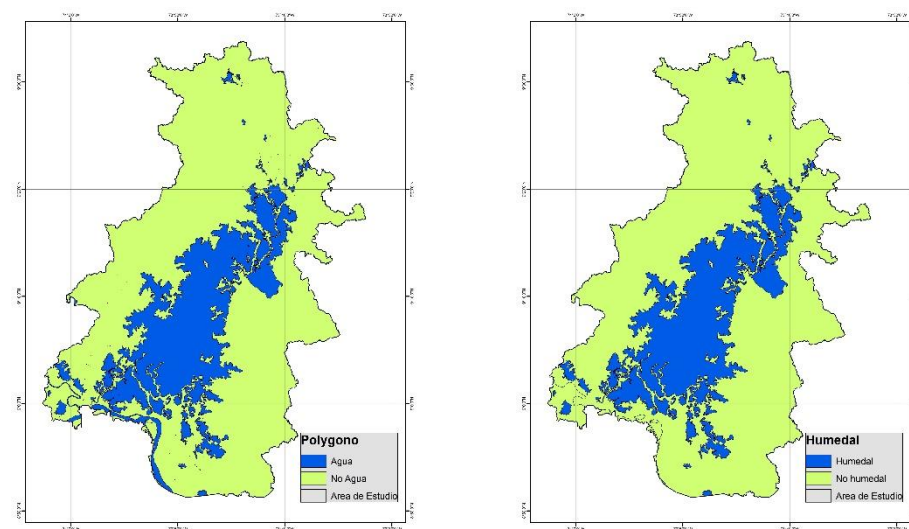


Figura 16. Proceso de eliminación de polígonos con áreas menores a 25 ha. Fuente: elaboración propia (2024).

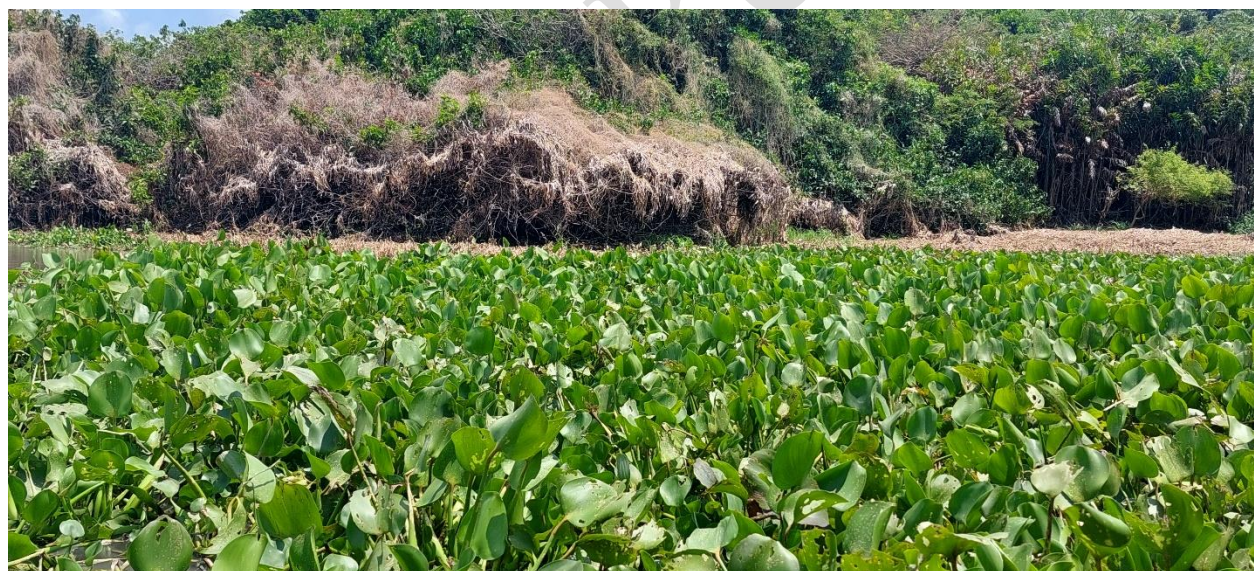
- ✦ Diferenciación de los polígonos que representan el humedal de los que representan quebradas, caños o ríos, que, aunque son cuerpos de agua, no corresponden a humedales, de acuerdo con la definición operativa de este protocolo; así se clasifican los polígonos del *shapefile* anterior, en humedal y no humedal. En la
- ✦ Figura 17 se presenta, a modo de ejemplo, el polígono final que define la extensión del humedal para el periodo seco.



Polígono con todas las áreas >25ha

Polígono clasificado en humedal y no humedal

Figura 17. Proceso de diferenciación y clasificación de humedal y no humedal. Fuente: elaboración propia (2024).



Macrófitas Complejo Cenagoso Zapatosa. Fotografía: Lina María Parada

REPRESENTATIVIDAD DEL MONITOREO

Luego del proceso de homologación de la información geográfica y de establecer los límites del humedal, bajo los lineamientos propuestos en la definición operativa, se debe analizar la representatividad de los ecosistemas en el diseño de muestreo definido. Para la asignación de las unidades muestrales dentro de un proceso de implementación (ventana piloto) se propone evaluar dicha representatividad bajo dos formas: asignación porcentual y asignación óptima.

En el caso de la asignación porcentual, se asignan de acuerdo con la representatividad de los estratos en el área, a partir de las combinaciones entre tipo de suelo y uso de suelo. En el caso de la asignación de forma óptima, se deben ver representadas todas las combinaciones generadas en la ventana piloto de implementación, producto del proceso de homologación al IPCC. Considerando que el objetivo del presente protocolo es establecer una línea base de contenidos de carbono en los diferentes ecosistemas identificados, se propone la asignación de 1 parcela para cada estrato encontrado en la ventana piloto de implementación.

Tabla 16. Ejemplo de la asignación de zonas de muestreo identificadas a partir del proceso de homologación en un humedal del Magdalena medio y bajo (Complejo Cenagoso de Zapatosa).

No.	Zona de muestreo (Estrato: Tipo de suelo-Uso de suelo)	Área estrato (ha)	% Área	No. Parcelas Asignación porcentual	No. Parcelas Asignación óptima
1	Arenales-Pastizales	19,928,34	22,02%	4	1
2	Arcillas de alta actividad-Pastizales	17,016,77	18,80%	4	1
3	Arenales-Humedales	9,994,64	11,04%	3	1
4	Arenales-Otra vegetación leñosa	6,413,07	7,09%	1	1
5	Otros suelos Minerales-Humedales	6,301,69	6,96%	1	1
6	Otros suelos Minerales-Pastizales	5,749,35	6,35%	1	1
7	Arcillas de alta actividad-Otra vegetación leñosa	4,803,20	5,31%	1	1
8	Arenales-Tierras de cultivo	3,858,44	4,26%	1	1
9	Humedales-Humedales	3,306,06	3,65%	1	1
10	Arcillas de alta actividad-Tierras de cultivo	3,288,13	3,63%	1	1
11	Arenales-Tierras forestales	2,823,24	3,12%	1	1

No.	Zona de muestreo (Estrato: Tipo de suelo-Uso de suelo)	Área estrato (ha)	% Área	No. Parcelas Asignación porcentual	No. Parcelas Asignación óptima
12	Arcillas de alta actividad-Humedales	1,410,18	1,56%	0	1
13	Otros suelos Minerales-Otra vegetación leñosa	1,228,17	1,36%	0	1
14	Arcillas de alta actividad-Tierras forestales	936,05	1,03%	0	1
15	Otros suelos Minerales-Tierras forestales	830,30	0,92%	0	1
16	Arenales-Herbazales	592,52	0,65%	0	1
17	Otros suelos Minerales-Herbazales	567,80	0,63%	0	1
18	Otros suelos Minerales-Tierras de cultivo	559,32	0,62%	0	1
19	Humedales-Pastizales	482,96	0,53%	0	1
20	Humedales-Tierras de cultivo	271,71	0,30%	0	1
21	Arcillas de alta actividad-Herbazales	83,13	0,09%	0	1
22	Humedales-Otra vegetación leñosa	57,91	0,06%	0	1

Fuente: elaboración propia (2024).

Como parte del proceso estadístico y con el objetivo de remover los posibles sesgos sistemáticos que se puedan presentar, se debe asegurar que las unidades muestrales sean seleccionadas de forma imparcial, mediante un proceso aleatorio. Para lograrlo, se implementa un procedimiento sencillo como la generación de números aleatorios para llevar a cabo el proceso de selección.

Con los resultados obtenidos de la identificación de los polígonos por cada estrato, se procede a seleccionar de forma aleatoria un polígono correspondiente a cada combinación entre tipo de suelo y uso de suelo. Para generar los números aleatorios se propone el uso del software Microsoft Excel, asignándole a cada polígono un valor aleatorio por medio de la función (=ALEATORIO()). Luego, se procede a ordenar el valor asignado de mayor a menor y se selecciona el primer polígono que corresponde al que tiene el mayor valor aleatorio. Al utilizar el mismo criterio para la selección de los polígonos, se asegura que la selección sea un proceso imparcial. Posterior a la aleatorización, se seleccionan los dos primeros polígonos para cada estrato, con el objetivo de evaluar el acceso en campo, considerando la estacionalidad hidrocimatológica propia del humedal a monitorear tanto en temporada seca (aguas bajas) como en temporada de lluvia (aguas altas).

DEFINICIÓN COMPARTIMIENTOS DE MONITOREO

De acuerdo con el IPCC (2003, 2006), existen cinco compartimientos, reservorios o depósitos de carbono que pueden ser medidos, siendo los cuatro principales: biomasa aérea, detritos o madera muerta, biomasa subterránea o sistema radical (raíces gruesas y finas) y suelos (Yepes et al., 2011; Tabla 17).

Tabla 17. Compartimientos de carbono. Modificado del IPCC (2003) y BioCarbon Fund (2008). Adaptado para la ejecución del proyecto*

Compartimiento		Descripción
Biomasa viva		Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, con inclusión de tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje.
	Biomasa aérea	Cuando el sotobosque es un componente relativamente pequeño del depósito de carbono de biomasa sobre el suelo, se puede excluir de las metodologías y datos asociados utilizados en algunos niveles, siempre y cuando los niveles se utilicen de manera coherente en todas las series cronológicas de inventarios.
	Biomasa subterránea (raíces)	Toda la biomasa viva de raíces. Se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque con frecuencia no se pueden distinguir empíricamente de la materia orgánica del suelo.
	Biomasa acuática*	Biomasa presente en la zona litoral de los ecosistemas acuáticos y diferenciada según su forma de vida. Se recomienda tener presente la morfoespecie dominante para el cálculo de la biomasa.
Materia orgánica muerta	Detritos o madera muerta	Comprende la madera no viva sobre el suelo, ya sea en pie o caída. La madera muerta comprende la que se encuentra en la superficie, raíces muertas y tocones de 10m de diámetro o más.
	Hojarasca	Comprende toda la masa no viva sobre el suelo (hojas, ramas y cáscaras de frutos) en varios estados de descomposición. Además, las capas de detritos, fúmica y húmica. Las raíces finas vivas (de tamaño inferior al límite de diámetro sugeridos para la biomasa baja del suelo) se incluyen en el mantillo cuando no se pueden distinguir empíricamente de él. Se puede establecer previamente un

Compartimiento		Descripción
		diámetro mínimo para diferenciar de los detritos e.g, <10 cm),
Suelos	Materia orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica seleccionada por el proponente del proyecto.
		Raíces finas vivas con diámetro menor a 2 mm.
Biodiversidad**	Comunidades hidrobiológicas y fauna de planos de inundación	Comprende el carbono disponible en el ecosistema acuático, presente en los organismos que lo habitan o usan como fuente de obtención energética o de hábitat frecuente o transicional, según el momento hidrológico.

Fuente: elaboración propia (2024).

*Para los ecosistemas acuáticos es de suma importancia la inclusión de la biomasa acuática por su aporte a los contenidos de Carbono y su relevancia en términos de biodiversidad propia y asociada.

**Se incluye el compartimiento de biodiversidad dada su importancia en la dinámica del Carbono en los ecosistemas acuáticos.

Directrices IPCC



Compartimientos de monitoreo:

Biomasa, MOM, suelos y biodiversidad

La decisión sobre cuáles compartimientos adicionales se debe incluir en un proyecto, dependerá de los recursos financieros disponibles, la magnitud del cambio potencial en los contenidos de carbono que pueda ocurrir por efecto de la deforestación/degradación, o bien, por principio de conservación, siguiendo las recomendaciones del IPCC o de la metodología que se seleccione (ejemplo MDL, VCS, CDBA, etc.). Algunas veces podría ocurrir que el costo de realizar el muestreo en determinados compartimientos, con el grado de precisión exigido o establecido, sea mayor que el retorno que se recibirá por el proyecto, por lo cual no se justifica su medición y monitoreo (Rügnitz et al., 2009, Tomado de Yepes et al., IDEAM, 2011).

A continuación, se describen los compartimientos que se incluyen en el protocolo para la estimación de contenidos de Carbono en humedales del Magdalena medio y bajo, junto con la propuesta metodológica para el levantamiento de información en campo dentro de las ventanas piloto de validación.



CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO DESDE DATOS DE ACTIVIDAD (DA)

IDENTIFICACIÓN DE DATOS DE ACTIVIDAD

La metodología completa para identificación de datos de actividad se presenta en dos pasos generales:

- ✦ Clasificación de imágenes de satélite, para la obtención de mapas de cobertura de la tierra según los períodos definidos para diferentes temporalidades.
- ✦ La detección de datos de actividad, o cambios en el uso del suelo durante dichas temporalidades.

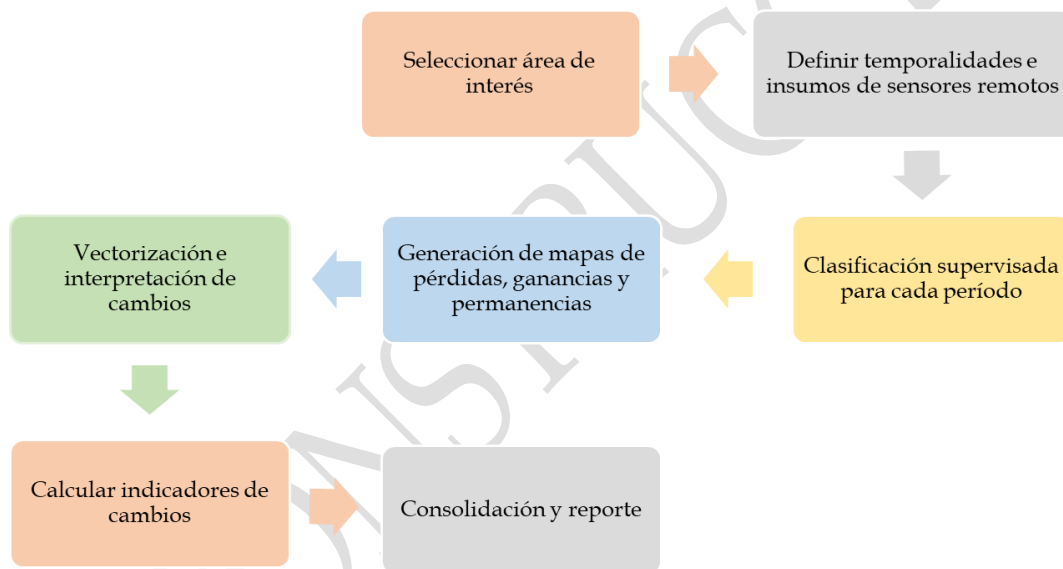


Figura 18. Esquema metodológico para la detección de Datos de Actividad. Fuente: elaboración propia (2024).

Clasificación de imágenes

La propuesta para el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales consta de diferentes pasos:

- ✦ Selección de las imágenes.
- ✦ Generación de mosaicos.
- ✦ Selección, adaptación y creación de códigos o algoritmos en GEE.
- ✦ Creación de mapas de puntos para entrenamiento de algoritmos de clasificación.

- ✦ Clasificación de las imágenes y creación de mapas de coberturas para cada una de las temporalidades.

Selección de imágenes

Para el cumplimiento del objetivo del protocolo, se propone la selección de imágenes multiespectrales Sentinel 2-, teniendo en cuenta que tienen una adecuada resolución espacial y temporal y son capturadas a diario; este conjunto de datos tiene imágenes disponibles desde el año 2015 hasta la fecha.

Las imágenes Sentinel-2 cuentan con trece canales espectrales (bandas) con una franja de 290 km y resoluciones espaciales de 10 m (4 bandas de rayos visibles y de infrarrojos cercanos), 20 m (6 red-edge / infrarrojos de onda corta) y 60 m (3 bandas de corrección). El amplio número de bandas espectrales hace que sean óptimas para las clasificaciones semiautomatizadas de las coberturas.

Tabla 18. Bandas espectrales de las imágenes Sentinel-2 (Gatti et al., 2015).

No.	Banda	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)
1	Ultra azul (Costero y aerosol)	430 - 450	60
2	Azul	450 - 520	10
3	Verde	540 - 570	10
4	Rojo	650 - 680	10
5	Rojo	690 - 710	20
6	Ultrarrojo	730 - 740	20
7	Rojo lejano	770 - 790	20
8	Infrarrojo cercano 1 (NIR 1)	780 - 900	10
8a	Infrarrojo cercano 2 (NIR 2)	850 - 870	20
9	Vapor de agua	930 - 950	60
10	Cirrus	1360 - 1390	60
11	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1560 - 1650	20
12	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2100 - 2280	20

Preprocesamiento

Las imágenes Sentinel 2 de GEE poseen ciertos niveles de preprocesamiento, para lo cual la clave es elegir las imágenes adecuadas dependiendo del trabajo que se quiera realizar con ellas (Franco, Hernández, & Arenas, 2019); no obstante, se pueden efectuar algunas labores previas al procesamiento dentro de la plataforma de GEE, como la selección de

colecciones de imágenes Sentinel-2 con dichas correcciones y reducción de estas a una sola imagen, la corrección atmosférica y el corte de las imágenes con el polígono del área de estudio. Los pasos anteriores se llevan a cabo en la plataforma GEE ejecutando el código que se presenta a continuación:

Enmascaramiento de nubes

```
/**
 * Function to mask clouds using the Sentinel-2 QA band
 * @param {ee.Image} image Sentinel-2 image
 * @return {ee.Image} cloud masked Sentinel-2 image
 */
function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');

  // Bits 10 and 11 are clouds and cirrus, respectively.
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;

  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

  return image.updateMask(mask).divide(10000);
}
```

Cargar colección Sentinel-2

```
// Map the function over one month of data and take the median.
// Load Sentinel-2 TOA reflectance data.
var S2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterDate('2016-07-01', '2016-11-30')
  // Pre-filter to get less cloudy granules.
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .map(maskS2clouds);

var rgbVis = {
  min: 0.0,
  max: 0.3,
  bands: ['B8', 'B4', 'B3'],
};
```

Recortar imagen al área de estudio

```
Map.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);
Map.addLayer(S2.mean().clip(table), rgbVis, 'RGB');
```

Letra azul son solo notas, no hacen parte del código.

Generación de mosaicos

Los mosaicos generan a partir de la unión o creación de imágenes compuestas de varias escenas que cubren en su totalidad el área de estudio. En el cuadro, se presenta la parte del código creado para generar los mosaicos de imágenes Sentinel 2-:

```
GeMap.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);  
Map.addLayer(dataset.mean().clip(table), rgbVis, 'RGB');  
Export.image.toDrive({  
  image:dataset.mean(),  
  region: table,  
  scale:10,  
  description:'MosS2_T1_2016_V4',  
  fileFormat:'GeoTIFF',  
  maxPixels:1000000000000000  
});generación de Mosaicos
```

Creación de mapas de puntos de entrenamiento

Se requiere crear un mapa con puntos que representen las muestras de cada clase de cobertura de la tierra del área de estudio. Se crea un mapa de muestras para cada uno de los períodos de las diferentes temporalidades sobre la imagen Sentinel-2. Para cada clase de cobertura se deben tomar las suficientes muestras de puntos para que la clasificación sea más precisa, se recomiendan alrededor de 100 a 200 puntos por clase de cobertura dependiendo del área de estudio a ser clasificada y de qué tan extendida esté la clase de cobertura respectiva. Estos puntos de entrenamiento deben estar distribuidos en toda la imagen. La tabla de atributos del mapa de puntos de entrenamiento debe contener una columna denominada “Clase”, que debe ser de formato “entero corto” y que contenga un identificador numérico de cada clase que va de 0 a n, siendo n el número total de clases (Figura 19).

Para la toma de muestras de entrenamiento se recomienda usar la combinación de falso color que corresponde a: infrarrojo cercano NIR 1 (banda 8), rojo (banda 4) y azul (banda 2), o la combinación NIR 1 (banda 8), verde (banda 3) y ultra azul (banda 1; Figura 19); lo anterior para resaltar la vegetación y facilitar la diferenciación de las diferentes coberturas.

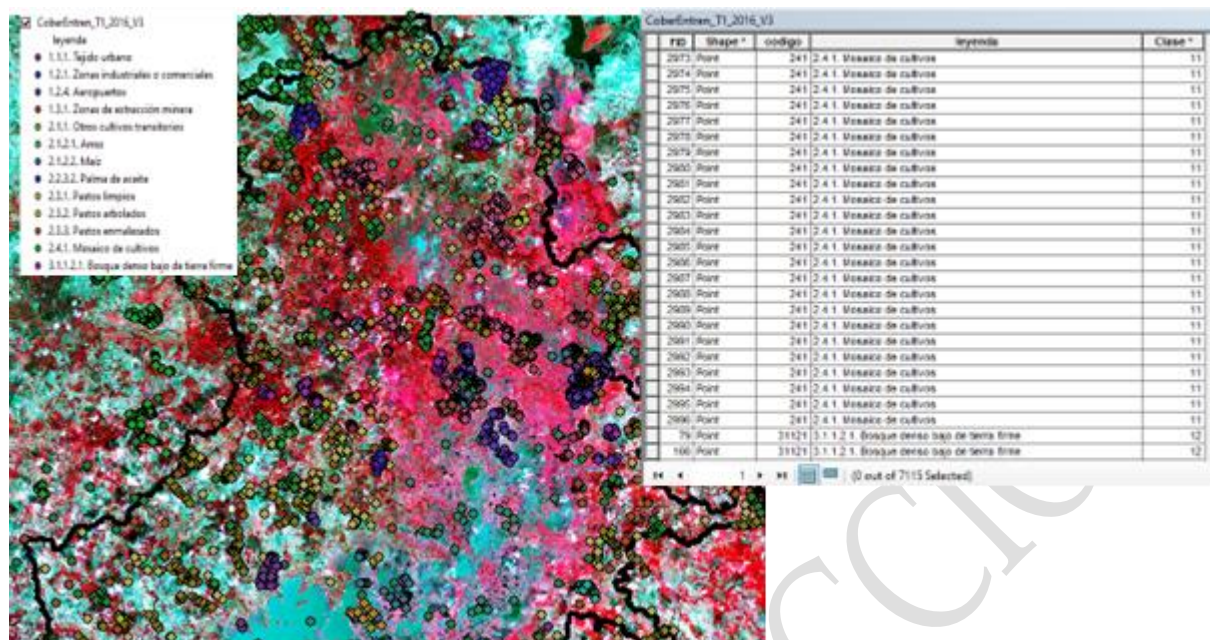


Figura 19. Ejemplo de imagen de satélite Sentinel 2-a, mapa de puntos de entrenamiento de las clases de cobertura y su tabla de atributos. Fuente: elaboración propia (2024).

La relación de colores respecto a las diferentes coberturas se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19. Relación de colores en la combinación RGB:8/4/2 y las coberturas de la tierra.

Color en la imagen RGB:8/4/2	Tipo de cobertura
Rojos	Bosques, vegetación secundaria alta, plantaciones forestales
Lilas	Vegetación acuática
Rosados	Cultivos
Verdes y azules agua marina	Herbazales y Pastos
Negros	Cuerpos de agua, ríos, zonas urbanas, tierras desnudas y degradadas, zonas mineras

Fuente: elaboración propia (2024).

Clasificación supervisada de imágenes satelitales

Existen varios métodos de clasificación de una imagen de satélite para la creación de mapas de cobertura de la tierra, entre estas, la clasificación visual, la clasificación automatizada no supervisada y la clasificación automatizada supervisada. Teniendo en cuenta que el objetivo de la clasificación es identificar cambios en el uso del suelo con una periodicidad de cada dos (2) años, para traducir dichos cambios de uso en factores de emisión o remoción de CO₂, se seleccionó la clasificación automatizada supervisada, que

puede ser efectuada de una manera ágil en GEE. Este método consiste en utilizar el mapa de puntos de entrenamiento con las clases de coberturas conocidas para entrenar (o supervisar) un clasificador matemático en la tarea de etiquetar el espacio espectral.

En la plataforma GEE, existen varias opciones de algoritmos automatizados para realizar clasificaciones de imágenes, para el protocolo se propone el clasificador “Random Forest”, el cual es un algoritmo de aprendizaje automático, que, como parámetros, tiene 10 árboles de decisión que usa para hacer una predicción. Cada árbol de decisión proporciona un resultado y, en función de la decisión de esos árboles, el clasificador produce una predicción definitiva para cada clase de cobertura que identifica.

Para esto se adaptó un código en GEE, con base en el código presentado por Franco, Hernández & Arenas (2019), cambiando el clasificador por Random Forest y utilizando las muestras de entrenamiento de acuerdo con las clases de cobertura de la zona, identificadas en el mapa de cobertura de la tierra para Colombia del año 2018 según la metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2021). Como ejemplo, se presenta la parte del código que clasifica el mosaico de las imágenes seleccionadas:

```
// Bandas empleadas para la predicción
var bandas = ['B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B11',
'B12'];

// Carga de zonas de entrenamiento.
Map.addLayer(table2, {}, 'CoberEntren');

// Esta propiedad de la tabla almacena las etiquetas de las clases en el campo "Clase"
var etiqueta = 'Clase';

// Superpone las zonas de entrenamiento con la imagen para entrenar el clasificador.
var training = S2.mean().clip(table).select(bandas).sampleRegions({collection: table2,
  properties: [etiqueta],
  scale: 10});
// Entrenamiento del clasificador con los paámetros por defecto.
var entrenamiento = ee.Classifier.smileRandomForest(50).train(training, etiqueta, bandas);

// Clasifica la imagen con las mismas bandas usadas para el entrenamiento.
```

```

var classified = S2.mean().clip(table).select(bandas).classify(entrenamiento);

// Despliega los resultados y emplea paleta de colores
Map.centerObject(table, 11);
Map.addLayer(S2.mean().clip(table), {bandas: ['B8', 'B4', 'B3'], min: 1000, max: 5000, gamma:
2.5}, 'Imagen Sentinel');
var paleta = [
'ED2110', // 1.1.1. Tejido urbano continuo (0) // rojo
'661610', // 1.2.1. Zonas industriales o comerciales (1) // cafe
'661610', // 1.2.4. Aeropuertos (2) // gris
'C16969', // 1.3.1. Zonas de extracción minera (3) // marrón rojizo
'F0B6DC', // 2.1.1. Otros cultivos transitorios (4) // rosado
'E79DF1', // 2.1.2.1. Arroz (5) // lila
'CCBA36', // 2.1.2.2. Maíz (6) // amarillo verdoso
'CCBA36', // 2.2.3.2. Palma de aceite (7) // cafe verdoso
'8CF7DE', // 2.3.1. Pastos limpios (8) // cian
'46CDAE', // 2.3.2. Pastos arbolados (9) // cian medio
'882ACE', // 2.4.1. Mosaico de cultivos (10) // morado
'336340', // 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme (11) // verde oscuro
'30A750', // 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable (12) // verde medio
'36C75D', // 3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable (13) // verde claro
'35F00C', // 3.1.4. Bosque de galería y ripario (14) // verde esmeralda
'64815D', // 3.1.5. Plantación forestal (15) // verde negrusco
'F0F31B', // 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado (16) // amarillo
'87C277', // 3.2.2.1. Arbustal denso (17) // verde amarilloso
'87AF5F', // 3.2.2.2. Arbustal abierto (18) // verde amarilloso oscuro
'EC8D1C', // 3.2.3. Vegetación secundaria (19) // naranja
'CC9C62', // 3.3.1. Zonas arenosas naturales (20) // cafe claro
'3D2B14', // 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas (21) // cafe oscuro
'7D9BB6', // 4.1.1. Zonas pantanosas (22) // azul claro
'B3D25B', // 4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua (23) // verde amarilloso claro
'1B45A5', // 5.1.1. Ríos (24) // azul oscuro
'3A73F3', // 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales (25) // azul claro
'000000', // 0.0.1 Sombras (26) // negro
];

Map.addLayer(classified,
{min: 0, max: 26, palette: paleta},
'Imagen clasificada');

```

```
var confusionMatrix = entrenamiento.confusionMatrix();
print('Confusion matrix: ', confusionMatrix);
print('Training Overall Accuracy: ', confusionMatrix.accuracy());
var kappa = confusionMatrix.kappa();
print('Training Kappa', kappa);

// Exporta imagen.
Export.image.toDrive({
  image:classified,
  region: table,
  scale:10,
  description:'Clas_T1_2016_V5',
  fileFormat:'GeoTIFF',
  maxPixels:1000000000000000
});
```

Fuente: elaboración propia (2024).

Detección y monitoreo de datos de actividad

Las actividades humanas modifican continuamente el paisaje, de tal forma que a veces resulta difícil identificar dichos cambios al mismo ritmo de ocurrencia. Actualmente, con la ayuda de las tecnologías de la información y el método de “machine learning” (aprendizaje de máquinas), es posible llevar a cabo la detección de cambios con mayor rapidez. En este contexto, la metodología propuesta a continuación es para monitoreo de cambios a través de teledetección y fue propuesta por (Zhe & Woodcock, 2014), quienes construyeron un algoritmo denominado CCDC, que por sus siglas en inglés se denomina “Continuous Change Detection and Classification” (Detección de Cambios Continuos y su Clasificación). El algoritmo se encuentra como una herramienta en GEE.

Paso 1. Clasificación de imágenes

El algoritmo parte de la clasificación de imágenes durante dos o más temporalidades, o incluso puede ser usado para series de tiempo; no obstante, para el propósito de este protocolo, se tiene en cuenta que se evalúan los cambios con una frecuencia de cada dos años.

Se crea un código para clasificar los mosaicos de imágenes Sentinel 2-, introduciendo tres variables previamente, el área de estudio (table), y los puntos de entrenamiento para cada fecha evaluada (por ejemplo, table 2: 2016 y table 3: 2018).

```
/**
 * Function to mask clouds using the Sentinel-2 QA band
 * @param {ee.Image} image Sentinel-2 image
 * @return {ee.Image} cloud masked Sentinel-2 image
 */
function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');

  // Bits 10 y 11 son cumulus y cirrus, respectivamente
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;

  // Ambas marcas deben establecerse en cero, lo que indica condiciones claras.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

  return image.updateMask(mask).divide(10000);
}

// Mapee la función sobre un mes y tome la mediana
// Cargue los datos de reflectancia de Sentinel-2 TOA
var S2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterDate('2015-12-01', '2016-02-28')
  // Pre-filter to get less cloudy granules.
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .map(maskS2clouds);

var S3 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterDate('2017-12-01', '2018-02-28')
  // Pre-filter to get less cloudy granules.
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .map(maskS2clouds);

var rgbVis = {
  min: 0.0,
  max: 0.3,
```

```

bands: ['B8', 'B4', 'B3'],
};

Map.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);
Map.addLayer(S2.mean().clip(table), rgbVis, 'RGB');
Map.addLayer(S3.mean().clip(table), rgbVis, 'RGB');

// Bandas empleadas para la predicción
var bandas = ['B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B11',
'B12'];

// Carga de zonas de entrenamiento.
Map.addLayer(table2, {}, 'CoberEntren');

// Esta propiedad de la tabla almacena las etiquetas de las clases en el campo "Clase"

var etiqueta = 'Clase';

// Superpone las zonas de entrenamiento con la imagen para entrenar el clasificador.

var training = S2.mean().clip(table).select(bandas).sampleRegions({collection: table2,
properties: [etiqueta],
scale: 10});

// Entrenamiento del clasificador con los parámetros por defecto.

var entrenamiento = ee.Classifier.smileRandomForest(50).train(training, etiqueta, bandas);

// Clasifica la imagen con las mismas bandas usadas para el entrenamiento.
var classified = S2.mean().clip(table).select(bandas).classify(entrenamiento);

// Despliega los resultados y emplea paleta de colores

Map.centerObject(table, 11);
Map.addLayer(S2.mean().clip(table), {bandas: ['B8', 'B4', 'B3'], min: 1000, max: 5000, gamma:
2.5}, 'Imagen Sentinel');
var paleta = [
'DFD6D3', // NoData (0) // Gris
'ED2110', // 1.1.1. Tejido urbano continuo (1) // rojo
'661610', // 1.2.1. Zonas industriales o comerciales (2) // cafe

```

```

'661610', // 1.2.4. Aeropuertos (3) // gris
'C16969', // 1.3.1. Zonas de extracción minera (4) // marrón rojizo
'F0B6DC', // 2.1.1. Otros cultivos transitorios (5) // rosado
'E79DF1', // 2.1.2.1. Arroz (6) // lila
'CCBA36', // 2.1.2.2. Maíz (7) // amarillo verdoso
'CCBA36', // 2.2.3.2. Palma de aceite (8) // café verdoso
'8CF7DE', // 2.3.1. Pastos limpios (9) // cian
'46CDAE', // 2.3.2. Pastos arbolados (10) // cian medio
'882ACE', // 2.4.1. Mosaico de cultivos (11) // morado
'336340', // 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme (12) // verde oscuro
'30A750', // 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable (13) // verde medio
'36C75D', // 3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable (14) // verde claro
'35F00C', // 3.1.4. Bosque de galería y ripario (15) // verde esmeralda
'64815D', // 3.1.5. Plantación forestal (16) // verde negrusco
'F0F31B', // 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado (17) // amarillo
'87C277', // 3.2.2.1. Arbustal denso (18) // verde amarilloso
'87AF5F', // 3.2.2.2. Arbustal abierto (19) // verde amarilloso oscuro
'EC8D1C', // 3.2.3. Vegetación secundaria (20) // naranja
'CC9C62', // 3.3.1. Zonas arenosas naturales (21) // café claro
'3D2B14', // 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas (22) // café oscuro
'7D9BB6', // 4.1.1. Zonas pantanosas (23) // azul claro
'B3D25B', // 4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua (24) // verde amarilloso claro
'1B45A5', // 5.1.1. Ríos (25) // azul oscuro
'3A73F3', // 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales (26) // azul claro
'000000', // 0.0.1 Sombras (27) // negro

```

```

];

```

```

Map.addLayer(classified,
    {min: 0, max: 27, palette: paleta},
    'Imagen clasificada');

```

```

var confusionMatrix = entrenamiento.confusionMatrix();
print('Confusion matrix: ', confusionMatrix);
print('Training Overall Accuracy: ', confusionMatrix.accuracy());
var kappa = confusionMatrix.kappa();
print('Training Kappa', kappa);

```

```

// Carga de zonas de entrenamiento.

```

```

Map.addLayer(table3, {}, 'CoberEntren');

```

```

// Esta propiedad de la tabla almacena las etiquetas de las clases en el campo "Clase"

```

```

var etiqueta = 'Clase';

// Superpone las zonas de entrenamiento con la imagen para entrenar el clasificador.

var training = S3.mean().clip(table).select(bandas).sampleRegions({collection: table3,
properties: [etiqueta],
scale: 10});

// Entrenamiento del clasificador con los paámetros por defecto.

var entrenamiento1 = ee.Classifier.smileRandomForest(50).train(training, etiqueta, bandas);

// Clasifica la imagen con las mismas bandas usadas para el entrenamiento.

var classified1 = S3.mean().clip(table).select(bandas).classify(entrenamiento1);

// Despliega los resultados y emplea paleta de colores

Map.centerObject(table, 11);
Map.addLayer(S3.mean().clip(table), {bandas: ['B8', 'B4', 'B3'], min: 1000, max: 5000, gamma:
2.5}, 'Imagen Sentinel');
var paleta = [
'DFD6D3', // NoData (0) // Gris
'ED2110', // 1.1.1. Tejido urbano continuo (1) // rojo
'661610', // 1.2.1. Zonas industriales o comerciales (2) // cafe
'661610', // 1.2.4. Aeropuertos (3) // gris
'C16969', // 1.3.1. Zonas de extracción minera (4) // marrón rojiso
'F0B6DC', // 2.1.1. Otros cultivos transitorios (5) // rosado
'E79DF1', // 2.1.2.1. Arroz (6) // lila
'CCBA36', // 2.1.2.2. Maíz (7) // amarillo verdoso
'CCBA36', // 2.2.3.2. Palma de aceite (8) // cafe verdoso
'8CF7DE', // 2.3.1. Pastos limpios (9) // cian
'46CDAE', // 2.3.2. Pastos arbolados (10) // cian medio
'882ACE', // 2.4.1. Mosaico de cultivos (11) // morado
'336340', // 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme (12) // verde oscuro
'30A750', // 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable (13) // verde medio
'36C75D', // 3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable (14) // verde claro
'35F00C', // 3.1.4. Bosque de galería y ripario (15) // verde esmeralda
'64815D', // 3.1.5. Plantación forestal (16) // verde negrusco

```

```
'F0F31B',//3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado(17) // amarillo
'87C277',//3.2.2.1. Arbustal denso(18) // verde amarilloso
'87AF5F',//3.2.2.2. Arbustal abierto(19) // verde amarilloso oscuro
'EC8D1C',//3.2.3. Vegetación secundaria(20) // naranja
'CC9C62',//3.3.1. Zonas arenosas naturales(21) // cafe claro
'3D2B14',//3.3.3. Tierras desnudas y degradadas(22) // cafe oscuro
'7D9BB6',//4.1.1. Zonas pantanosas(23) // azul claro
'B3D25B',//4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua(24) // verde amarilloso claro
'1B45A5',//5.1.1. Ríos(25) // azul oscuro
'3A73F3',//5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales(26) // azul claro
'000000',//0.0.1 Sombras(27) / negro
];
```

```
Map.addLayer(classified1,
    {min: 0, max: 27, palette: paleta},
    'Imagen clasificada');
```

```
var confusionMatrix1 = entrenamiento1.confusionMatrix();
print('Confusion matrix1: ', confusionMatrix1);
print('Training Overall Accuracy: ', confusionMatrix1.accuracy());
var kappa1 = confusionMatrix1.kappa();
print('Training Kappa1', kappa1);
```

```
// Exporta imagen.
Export.image.toDrive({
  image:classified,
  region: table,
  scale:10,
  description:'Clas_t1_2016',
  fileFormat:'GeoTIFF',
  maxPixels:1000000000000000
});
```

```
// Exporta imagen.
Export.image.toDrive({
  image:classified1,
  region: table,
  scale:10,
  description:'Clas_t1_2018',
  fileFormat:'GeoTIFF',
```

```
maxPixels:1000000000000000);
```

Fuente: elaboración propia (2024).

Paso 2. Generación de mapas de pérdidas, ganancias y permanencias

Se sugiere crear mapas de pérdidas, ganancias y permanencias (se mantienen estables) de bosques y otras coberturas naturales, incluyendo coberturas acuáticas. La función 'remap' (reasignar) se usa para crear una clase 'No Natural' a partir de las clases de cobertura empleadas en las clasificaciones y la función 'where' (donde) se usa para cambiar el valor de la capa a 3, en píxeles de pérdidas para identificar cambios de cobertura natural a no natural y a 4 en ganancias para identificar el paso de coberturas no naturales (antrópicas) a naturales. El valor de 1 se asigna a las coberturas naturales que se mantienen y el valor de 2 a los cambios de las coberturas acuáticas (únicamente espejos de agua, dado que la vegetación acuática se toma como una cobertura vegetal natural).

```
// Crear mapas de perdida y ganancia de bosque
var forestLoss = classified.eq(1).and(classified1.neq(1))
var forestGain = classified.neq(1).and(classified1.eq(1))

// Iniciar imagen de estratificación. La función de EE, Image.remap, es usada para convertir
todas las clases no-naturales en 2.

var stratification =
classified.remap([0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27],[2,2,2,2,
2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,2])

// Use la función EE, Image.where, para convertir deforestación en 3 y ganancia de bosque en
4.

stratification = stratification.where(forestLoss, 3).where(forestGain, 4)

// Convierta la transición a agua en una clase No-Natural para omitirla del estrato de 'Pérdida
de Bosque o Cobertura Natural'. Note que, en este conjunto de datos, el valor de 5 indica Agua.

stratification = stratification.where(classified1.eq(5), 5)

Map.addLayer(stratification, {min: 1, max: 4, palette: ['green','black','red','cyan','blue']},
'Stratification')
```

```
Export.image.toDrive({  
  image:stratification,  
  region: table,  
  scale:10,  
  description:'CambioT1_2016_2018_V3',  
  fileFormat:'GeoTIFF',  
  maxPixels:1000000000000000  
});
```

Fuente: elaboración propia (2024).

Paso 3. Visualización e interpretación de cambios

Una vez se obtiene el mapa de cambios en términos de pérdidas, ganancias y permanencias de coberturas naturales y antrópicas, se debe evaluar el resultado. Para ello, se abren simultáneamente el mapa de cambios y los mapas de las clasificaciones para cada una de las temporalidades evaluadas, en un software de SIG (ArcGIS o QGIS) y allí, mediante una herramienta que combine los tres ráster, se evalúan los cambios. Por ejemplo, en ArcGIS 10.8, con la herramienta “Combine”, localizada en la caja de herramientas de ‘Spatial Analysis Tool’, se pueden observar los cambios de las coberturas del 2016, sucedidos en el 2018.

La tabla del ráster resultante al ejecutar la herramienta “Combine”, contiene el valor de los cambios que van de 1 a 4 y los valores del tipo de cobertura en cada año analizado (Figura 20).

	OBJECTID *	Value	Count	CambioT1_2016_20	Clas_t1_2016_V6	Clas_t1_2018_V6
▶	1	1	20908030	0	0	0
	2	2	59896	1	12	15
	3	3	40994	1	12	13
	4	4	262741	1	20	15
	5	5	274116	1	15	15
	6	6	1011239	3	17	9
	7	7	3666960	2	9	9
	8	8	72879	2	9	11
	9	9	121628	1	13	13
	10	10	99868	1	13	15
	11	11	91212	1	15	12
	12	12	127380	1	20	13
	13	13	33534	4	9	14
	14	14	58002	1	12	20
	15	15	424697	1	20	20
	16	16	56609	1	12	12
	17	17	51933	1	13	12
	18	18	298651	2	1	9
	19	19	411052	4	9	24
	20	20	224453	4	9	15

Figura 20. Tabla de atributos del ráster resultante de aplicar la herramienta "Combine". Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores de las coberturas, mostrados en el cuadro de clasificación de imágenes, se asocian con las leyendas respectivas para cada año, con el fin de visualizar con mayor facilidad los respectivos cambios (Figura 26). Es importante examinar la coherencia de los cambios y determinar si son posibles, en caso de encontrar inconsistencias, se debe mejorar el mapa de entrenamiento de cada fecha, a fin de corregir la precisión de las clasificaciones y tener mayor certeza de los cambios o permanencias obtenidas.

OBJECTID *	Value	Count	CambioT1_2016_20	Clas_t1_2016_V6	Clas_t1_2018_V6	Cober2016	Cober2018
▶	1	1	20908030	0	0	0 NoData	NoData
	2	2	59896	1	12	15 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.4. Bosque de galería y ripario
	3	3	40994	1	12	13 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
	4	4	262741	1	20	15 3.2.3. Vegetación secundaria	3.1.4. Bosque de galería y ripario
	5	5	274116	1	15	15 3.1.4. Bosque de galería y ripario	3.1.4. Bosque de galería y ripario
	6	6	1011239	3	17	9 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	2.3.1. Pastos limpios
	7	7	3666960	2	9	9 2.3.1. Pastos limpios	2.3.1. Pastos limpios
	8	8	72879	2	9	11 2.3.1. Pastos limpios	2.4.1. Mosaico de cultivos
	9	9	121628	1	13	13 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
	10	10	99868	1	13	15 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.1.4. Bosque de galería y ripario
	11	11	91212	1	15	12 3.1.4. Bosque de galería y ripario	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
	12	12	127380	1	20	13 3.2.3. Vegetación secundaria	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
	13	13	33534	4	9	14 2.3.1. Pastos limpios	3.1.2.2. Bosque abierto bajo inundable
	14	14	58002	1	12	20 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.2.3. Vegetación secundaria
	15	15	424697	1	20	20 3.2.3. Vegetación secundaria	3.2.3. Vegetación secundaria
	16	16	56609	1	12	12 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
	17	17	51933	1	13	12 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
	18	18	298651	2	1	9 1.1.1. Tejido urbano	2.3.1. Pastos limpios
	19	19	411052	4	9	24 2.3.1. Pastos limpios	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	20	20	224453	4	9	15 2.3.1. Pastos limpios	3.1.4. Bosque de galería y ripario
	21	21	31762	4	9	12 2.3.1. Pastos limpios	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
	22	22	98160	1	13	20 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.2.3. Vegetación secundaria
	23	23	292882	3	20	9 3.2.3. Vegetación secundaria	2.3.1. Pastos limpios
	24	24	339782	4	9	20 2.3.1. Pastos limpios	3.2.3. Vegetación secundaria
	25	25	28081	1	17	14 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
	26	26	23675	3	17	11 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	2.4.1. Mosaico de cultivos
	27	27	116851	1	15	13 3.1.4. Bosque de galería y ripario	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable

Figura 21. Tabla de atributos comparativa del ráster combine de las coberturas en el 2016 y 2018. Fuente: elaboración propia (2024).

Paso 4. Conversión del mapa de cambios (pérdidas, ganancias y estable) y el mapa ráster comparativo de cambios a polígono

Aplicando herramientas SIG, se pueden convertir los ráster resultantes de los pasos anteriores a formato vectorial (polígonos). En ArcGIS, se usa la herramienta “raster to polygon”, localizada en la caja de herramientas “Conversión Tools”. En el mapa de cambios, la conversión se efectúa utilizando la columna “cambio” (Figura 22), en el ráster comparativo, la conversión se realiza utilizando como identificador la columna “Value”, de la tabla mostrada en la Figura 21; columna que identifica todos los posibles cambios de coberturas entre dos fechas, en este caso 2016 y 2018.

CambioT1_2016_2018_V6.tif				
	OID	Value	Count	Cambio
▶	0	0	21147321	NoData
	1	1	10620555	Estable Cobertura Natural
	2	2	5602147	Estable Cobertura No Natural
	3	3	2787760	Perdidas de cobertura natural
	4	4	4079163	Ganancias de cobertura natural

Figura 22. Tabla de atributos del ráster de cambios de coberturas de la tierra (ganancias, pérdidas y estable). Fuente: elaboración propia (2024).

A continuación, a los polígonos resultantes, se les efectúa una generalización utilizando la herramienta “Dissolve”, de la caja de herramientas de “Data management/generalization”, para hacer el *shapefile* más manejable y se calculan los totales de las áreas de cambio. En el *shapefile* de cambio se utiliza la columna “Cambio”, y en el *shapefile* combinado la columna “value”. Luego, sobre el polígono resultante del mapa combinado, se realiza la unión de los datos de cambio presentes en la tabla de atributos del ráster “combine”, utilizando de enlace el identificador “value”; de manera que se trae la información de las coberturas de cada fecha. Con esta información se puede crear una nueva columna en este *shapefile* y calcular el área respectiva para cambio producido entre las dos fechas evaluadas (Figura 23).

FID	Shape *	gridcode	OBJECTID	Value	Count	CambioT1	Clas_t1_20	Clas_t1_21	Cober2016	Cober2018	Area_ha
0	Polygon	1	1	20908030	0	0	0	0	NoData	NoData	204765.088
1	Polygon	2	2	59096	1	12	15	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.4. Bosque de galería y ripario	584.070699	594.070699
2	Polygon	3	3	40994	1	12	13	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	399.83594	2561.35306
3	Polygon	4	4	262741	1	20	15	3.2.3. Vegetación secundaria	3.1.4. Bosque de galería y ripario	2697.58485	979.01608
4	Polygon	5	5	274116	1	15	15	3.1.4. Bosque de galería y ripario	2.3.1. Pastos limpios	36842.9952	714.476305
5	Polygon	6	6	1011239	3	17	9	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	2.3.1. Pastos limpios	1202.44060	975.437368
6	Polygon	7	7	3668960	2	9	9	2.3.1. Pastos limpios	2.3.1. Pastos limpios	896.293174	1240.13205
7	Polygon	8	8	72879	2	9	11	2.3.1. Pastos limpios	2.4.1. Mosaico de cultivos	325.876853	566.800449
8	Polygon	9	9	121628	1	13	13	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	4199.69112	554.406552
9	Polygon	10	10	99868	1	13	15	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.1.4. Bosque de galería y ripario	510.937204	2883.02194
10	Polygon	11	11	91212	1	15	12	3.1.4. Bosque de galería y ripario	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	4028.48669	2188.08717
11	Polygon	12	12	127380	1	20	13	3.2.3. Vegetación secundaria	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	310.895832	959.011916
12	Polygon	13	13	33534	4	9	14	2.3.1. Pastos limpios	3.1.2.2. Bosque abierto bajo inundable	2847.16227	3294.85111
13	Polygon	14	14	58002	1	12	20	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.2.3. Vegetación secundaria	271.36309	230.44495
14	Polygon	15	15	424697	1	20	20	3.2.3. Vegetación secundaria	3.2.3. Vegetación secundaria	1140.14888	1266.51729
15	Polygon	16	16	56609	1	12	12	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	1556.34722	10334.5030
16	Polygon	17	17	51933	1	13	12	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	95.78353	2182.97553
17	Polygon	18	18	298651	2	1	9	1.1.1. Tejido urbano	2.3.1. Pastos limpios	6859.51103	1398.85540
18	Polygon	19	19	411052	4	9	24	2.3.1. Pastos limpios	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	2372.67515	126.231168
19	Polygon	20	20	224453	4	9	15	2.3.1. Pastos limpios	3.1.4. Bosque de galería y ripario	857.612016	
20	Polygon	21	21	31762	4	9	12	2.3.1. Pastos limpios	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme		
21	Polygon	22	22	98160	1	13	20	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	3.2.3. Vegetación secundaria		
22	Polygon	23	23	292382	3	20	9	3.2.3. Vegetación secundaria	2.3.1. Pastos limpios		
23	Polygon	24	24	339782	4	9	20	2.3.1. Pastos limpios	3.2.3. Vegetación secundaria		
24	Polygon	25	25	23801	1	17	14	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	3.1.2.2. Bosque abierto bajo inundable		
25	Polygon	26	26	23675	3	17	11	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	2.4.1. Mosaico de cultivos		
26	Polygon	27	27	116551	1	15	13	3.1.4. Bosque de galería y ripario	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable		
27	Polygon	28	28	129805	3	15	9	3.1.4. Bosque de galería y ripario	2.3.1. Pastos limpios		
28	Polygon	29	29	161651	2	11	9	2.4.1. Mosaico de cultivos	2.3.1. Pastos limpios		
29	Polygon	30	30	1083127	4	9	17	2.3.1. Pastos limpios	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado		
30	Polygon	31	31	10725	2	5	9	2.1.1. Otros cultivos transitorios	2.3.1. Pastos limpios		
31	Polygon	32	32	222988	1	17	20	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	3.2.3. Vegetación secundaria		
32	Polygon	33	33	700660	1	17	17	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado		
33	Polygon	34	34	144756	3	26	9	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	2.3.1. Pastos limpios		
34	Polygon	35	35	243717	1	15	20	3.1.4. Bosque de galería y ripario	3.2.3. Vegetación secundaria		
35	Polygon	36	36	12920	4	6	15	2.1.2.1. Arroz	3.1.4. Bosque de galería y ripario		
36	Polygon	37	37	87882	2	10	9	2.3.2. Pastos arbolados	2.3.1. Pastos limpios		

Figura 23. Tabla de atributos del *shapefile* (polígono) de cambios de cobertura entre los años 2016 a 2018. Fuente: elaboración propia (2024).

Indicadores de cambio

Se proponen los siguientes indicadores de cambio, los cuales son adaptados de los indicadores propuestos por IDEAM a escala nacional para el monitoreo de la superficie de bosque natural (IDEAM, 2019).

Tasa promedio anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas

Corresponde a la variación de la superficie cubierta por coberturas naturales, incluidos los bosques naturales que no estén siendo previamente monitoreados a escala nacional por el IDEAM. El indicador debe calcularse para cada una de las coberturas naturales en el área de referencia y en el intervalo de tiempo entre el año inicial t_1 y el año final t_2 . Para su cálculo se utiliza la expresión de (IDEAM, 2019)

$$TC_{i,(t_1:t_2)} = \left[\frac{ACT_{i,t_2} - ACT_{i,t_1}}{ACT_{i,t_1}} \right] \cdot 100$$

Donde:

$TC_{i,(t_1:t_2)}$: Tasa promedio de cambio anual del área que ocupa la cobertura de la tierra natural i , entre las dos fechas t_1 , t_2 .

$ACT_{i,t2}$: Área cubierta por la cobertura de la tierra natural i, en el momento t1, expresada en hectáreas (ha)

$ACT_{i,t2}$: Área cubierta por la cobertura de la tierra i, en el momento t2, expresada en hectáreas (ha)

Tabla 20. Interpretación del índice de promedio anual de la variación de la superficie por tipo de cobertura.

Índice $TC_{i,(t1:t2)}$	Descripción
<0	Disminución de la superficie de la cobertura i
0	La cobertura i no presentó variación (estable)
>0	Aumento de la superficie de la cobertura i

Fuente: (IDEAM, 2019)

Porcentaje total de cobertura natural estable

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se mantiene estable durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de evaluación t1 y la fecha final t2, dada en porcentaje, la cual se establece como se expresa en la ecuación:

$$PACNE = \frac{ACNE}{AT} * 100$$

Donde:

$PACNE$: Porcentaje de cobertura natural que se mantiene estable

$ACNE$: Área de cobertura natural que se mantiene estable

AT : Área total de referencia

Porcentaje total de ganancia de cobertura natural

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se gana durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de evaluación t1 y la fecha final t2, dada en porcentaje, según la ecuación:

$$PAGCN = \frac{AGCN}{AT} * 100$$

Donde:

$PAGCN$: Porcentaje de ganancia de cobertura natural

AGCN: Área de ganancia de cobertura natural

AT: Área total de referencia

Porcentaje total de pérdida de cobertura natural

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se pierde durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de evaluación t_1 y la fecha final t_2 , dada en porcentaje, según la ecuación:

$$PAPCN = \frac{APCN}{AT} * 100$$

Donde:

PAPCN: Porcentaje de pérdidas de cobertura natural

APCN: Área de pérdidas de cobertura natural

AT: Área total de referencia

Porcentaje total de permanencia de cobertura natural

Corresponde a la proporción de cobertura natural que se mantiene estable durante el periodo comprendido entre la fecha inicial de evaluación t_1 y la fecha final t_2 , dada en porcentaje. Se establece como se expresa en la ecuación:

$$PAECN = \frac{AECN}{AT} * 100$$

Donde:

PAPCN: Porcentaje de área de cobertura natural que se mantiene estable

APCN: Área de cobertura natural que se mantiene estable

AT: Área total de referencia

Cálculo de indicadores de cambio

Para el cálculo de los indicadores anteriores es necesario realizar los siguientes pasos sobre los mapas de cobertura de la tierra para los dos momentos de análisis (t_1 y t_2) y el mapa de ganancias, pérdidas y permanencias:

- ✚ Tomar los archivos en formato ráster de los resultados de las clasificaciones supervisadas de las imágenes y del algoritmo de cambio y aplicar uno o dos filtros para eliminar píxeles sueltos, para ello se usan herramientas de algún software de SIG, en el caso de ArcGIS la herramienta "Majority", localizada en la caja de herramientas denominada "Generalization" dentro de "Spatial Analysis Tools".

- ✦ Convertir los rásters de clasificación de coberturas para los dos momentos t1 y t2 y el ráster de cambio a polígonos (*shapefile*), utilizando las herramientas de conversión de ráster a polígono de un software de SIG. En ArcGIS esta herramienta se llama “Raster to Polygon” y se encuentra en la caja de herramientas “Conversion Tools”.
- ✦ Verificar que los dos polígonos se encuentren en coordenadas planas, en caso contrario, se deben convertir de coordenadas geométricas a planas, utilizando herramientas de proyección de un software de SIG. En el caso de ArcGIS, se usa la herramienta “Projections and Transformations”, dentro de la caja de herramientas “Data Management” y transformar la proyección que tengan los ráster de cobertura al sistema de coordenadas CTM12 que se presenta a continuación;

Projected Coordinate System: CTM12

Projection: Transverse_Mercator

False_Easting: 5000000.00000000

False_Northing: 2000000.00000000

Central_Meridian: -73.00000000

Scale_Factor: 0.99920000

Latitude_Of_Origin: 4.00000000

Linear Unit: Meter

Geographic Coordinate System: GCS_MAGNA

Datum: D_MAGNA

Prime Meridian: Greenwich

Angular Unit: Degree

- ✦ Dentro de la tabla de atributos de los *shapefiles* de coberturas y del *shapefile* de cambio, adicionar un campo numérico doble denominado “Area_ha” y calcular las áreas respectivas de cada polígono de cobertura o categoría de cambio, según corresponda.
- ✦ Aplicar herramientas de generalización para eliminar polígonos menores a 1 ha que hayan quedado en los *shapefiles* de coberturas. Es posible que este paso deba ser repetido hasta eliminar el total de polígonos menores de 1ha. Se seleccionó 1ha como el área mínima, con el objeto de evaluar hasta los cambios más pequeños ocurridos y no perder información con una generalización a polígonos mayores.

- ✦ Para los *shapefiles* cobertura de la tierra, calcular las áreas totales por tipo de cobertura y para las dos fechas en evaluación (t1 y t2) y colocar en una sola tabla.
- ✦ Para el *shapefile* de cambio, calcular el área de pérdidas, ganancias y permanencias (cobertura estable)
- ✦ Aplicar las ecuaciones arriba mencionadas para cada indicador, respectivamente.

Consolidación y reporte

Para el caso específico de datos de actividad calculados, se propone estructurar una base de datos alfanumérica que se ajuste a los formatos definidos en el Sistema Nacional de Inventarios de Emisiones de Gases Efecto Invernadero para Colombia - SINGEI, en los formatos unificados (FU), los cuales se presentan en Excel, donde se diligencian los campos específicos (p.e. Región, Departamento, Año, Entidad, Instrumento, Fuente específica, Categoría IPCC, Nombre de la actividad, Clasificación 1 / 2 / 3 / 4, Valor, Unidades, Incertidumbre (u-) / (u+), Observaciones); así como una base de datos espacial, donde se dispongan tanto la línea base como los productos correspondientes a cada monitoreo. El almacenamiento y disposición de esta información será responsabilidad del IDEAM.

ÍNDICES ESPECTRALES

El cálculo de índices se basa en los valores de la radiación entrante que se refleja en la superficie del agua, parte de la que penetra la misma y la radiación reflejada por las coberturas terrestres colindantes ubicadas hacia afuera de los límites de los espejos de agua. Es así como, dado que el enfoque del protocolo es el análisis de humedales, se propone el cálculo de índices espectrales siguiendo diferentes etapas que van desde la búsqueda y generación de mosaicos con cubrimiento para el área de interés hasta el análisis de los resultados a partir de datos estadísticos. Es así como, a continuación, en la Figura 24 se presenta cada etapa para luego describirlas.

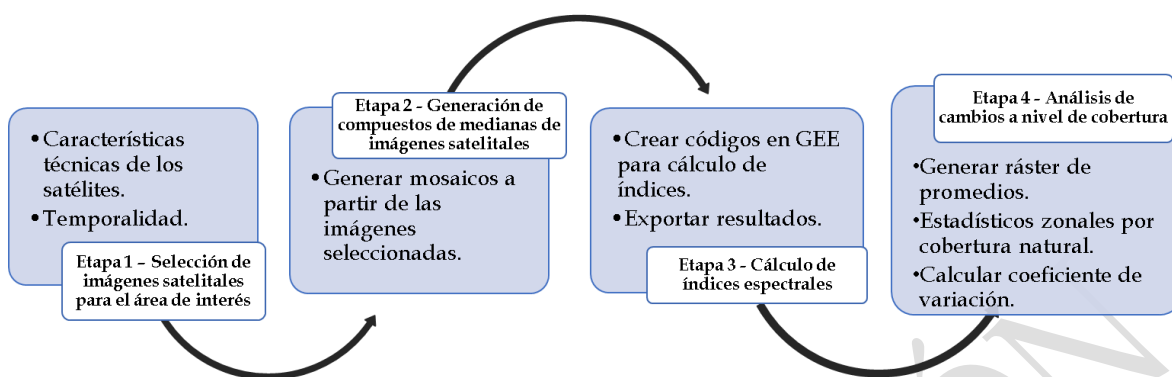


Figura 24. Etapas de la metodología para el cálculo y análisis de índices espectrales para el monitoreo de humedales del Magdalena medio y bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Etapa 1 – Selección de imágenes satelitales para el área de interés

Para el cálculo de índices espectrales para el monitoreo de humedales del Magdalena medio y bajo se propone usar imágenes Sentinel-2 del programa Copernicus de la Comisión Europea. Este programa satelital se caracteriza por disponer sus imágenes de manera gratuita en las siguientes plataformas de descarga:

- ✦ Plataforma Earth Explorer del United States Geological Survey (USGS): <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- ✦ Plataforma Copernicus Services Data Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA): <https://sentinel-hub.com/develop/capabilities>
- ✦ Plataforma Google Earth Engine donde se disponen diferentes catálogos de datos: <https://earthengine.google.com/>

Etapa 2 - Generación de compuestos de medianas de imágenes satelitales

De acuerdo al área geográfica definida se identifican y seleccionan las escenas Sentinel-2 que cubren en su totalidad el polígono delimitado para tal fin. En cuanto a la temporalidad de los mosaicos de Sentinel-2 requeridos, de acuerdo con la periodicidad del monitoreo planteada en el protocolo es cada dos años, por lo tanto, la búsqueda y selección de escenas debe hacerse según dicha temporalidad. Así mismo, para cada año se establecen temporalidades trimestrales según los análisis de variables climatológicas para identificar los regímenes climáticos de la ventana seleccionada (monomodales o bimodales).

Teniendo definida el área de interés y la temporalidad de las imágenes se procede con la búsqueda, revisión y descarga de los compuestos temporales de medianas (mosaicos) en Google Earth Engine. Este proceso se realiza mediante la creación del código para la

descarga de los compuestos temporales de medianas de las imágenes Sentinel-2 presentado a continuación en la Tabla 21.

Este código incluye una línea específica para el enmascaramiento de nubes para ser eliminadas del área de interés, así mismo, los resultados que se obtienen cuentan con una corrección atmosférica por lo que los valores de píxel se encuentran en valores de reflectancia de superficie, siendo óptimos para calcular los índices espectrales posteriormente.

Tabla 21. Código desarrollado en Google Earth Engine para la descarga de compuestos de medianas de imágenes ópticas Sentinel-2.

Criterio	Código
Enmascaramiento de nubes	<pre>function maskS2clouds(image) { var qa = image.select('QA60');</pre>
Indicar bits para identificar: Nubes: bits = 10 Cirrus: bits = 11	<pre> var cloudBitMask = 1 << 10; var cirrusBitMask = 1 << 11;</pre>
Función para leer los valores de máscara de bits de nubes, cirros o sin nubes de la banda QA60 y agregar cada tipo de nube como una nueva banda a nuestra imagen original.	<pre> var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0) .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0)); return image.updateMask(mask).divide(10000); }</pre>
Cargar colección Sentinel-2	<pre>var dataset = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')</pre>
Filtrar para el área de interés	<pre>.filterBounds(table)</pre>
Filtrar por rango de fechas	<pre>.filterDate ('2016-09-01', '2016-11-30');</pre>
Prefiltrado para obtener los gránulos con menos nubes	<pre>.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10)) .map(maskS2clouds);</pre>
Parámetros de visualización	<pre>var rgbVis = { min: 0.0, max: 0.3, bands: ['B8', 'B4', 'B3'], };</pre>
Centrar para visualizar sobre área de interés Complejo Cenagoso de Zapotosa	<pre>Map.setCenter(-73.920171, 9.031563, 9);</pre>
Adicionar la capa al mapa base	<pre>Map.addLayer(dataset.mean().clip(table), rgbVis, 'RGB');</pre>

Criterio	Código
Exportar mosaico Sentinel-2 a Google Drive	<pre>Export.image.toDrive({ image:dataset.mean(), region: table, scale:10, description:'MosS2_T1_2016_V4', fileFormat:'GeoTIFF', maxPixels:1e13 });</pre>

Fuente: elaboración propia (2024).

Etapas 3 - Cálculo de índices espectrales

Se calculan los índices espectrales de vegetación, agua y quemados que se presentan en la Tabla 22 con las respectivas fórmulas.

Tabla 22. Ecuaciones y funcionalidad de los índices espectrales propuestos para el monitoreo de los humedales del Magdalena medio y bajo. NIR: Infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta.

No	Índice espectral	Tipo de medición	Fuente
1	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI). $NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$	Productividad de la vegetación acuática y ecosistemas inundables. Análisis multitemporales de los estados fenológicos de la vegetación.	(Hilker et al., 2007)
		Estado de la vegetación acuática o vegetación de ecosistemas inundables.	(Song et al., 2013)
2	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). $SAVI = \left(\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo + L} \right) * (1 + L)$	Presencia de biomasa con corrección del brillo del suelo.	(Rondeaux et al., 1996)
3	Índice de Área Foliar (LAI). $LAI = - \frac{\ln \left(0,69 - \frac{SAVI}{0,59} \right)}{0,91}$	Características biofísicas asociadas a las copas de los árboles.	(Tucker & Sellers, 1986)
4	Índice de clorofila (GCI) $GCI = \left(\frac{NIR}{Verde} \right) - 1$	Presencia de clorofila, que indica contaminación por nutrientes que impulsa el crecimiento de las algas.	(Gitelson et al., 2003)

5	Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI) $NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$	Cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo.	(McFeeters, 2013)
6	Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) $MNDWI = \frac{Verde - SWIR}{Verde + SWIR}$	Medición de la extensión de los territorios cubiertos de agua que separa de las demás coberturas terrestres.	(Xu, 2006)
7	Índice Normalizado de Área Quemada (NBRI) $NBRI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Resalta áreas quemadas en grandes zonas de incendio.	(De Santis & Vaughan, 2009)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes de información presentadas.

Para ejecutar los procesos del cálculo de cada índice espectral, en GEE en la ventana de editor de código se insertan primero las líneas de código creadas para la generación de mosaicos como se presentó en la Tabla 22 con el fin de tener el conjunto de imágenes disponibles. Seguido a esto se crea el código para cada índice (tabla 4), donde se indican las bandas a tener en cuenta de acuerdo con cada ecuación presentada en la Tabla 23.

Cabe mencionar que para el cálculo del LAI, debido a que su fórmula se basa en los resultados obtenidos con el SAVI, el proceso se realiza teniendo en el código las líneas requeridas para el cálculo del SAVI y seguido a estas se incluyen las del LAI como tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 23. Códigos desarrollados en Google Earth Engine para el cálculo de los índices espectrales.

No	Índice espectral	Código
1	NDVI	<pre>var NDVI = Vegetacion.expression ('float ((NIR - RED) / (NIR + RED))',{ 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'RED': Vegetacion.select ('B4')});</pre>

2	SAVI	var SAVI = Vegetacion.expression ('float (((NIR - RED) / (NIR + RED + L))* (1+L))',{ 'L': 0.5, // Cobertura vegetación 0-1 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'RED': Vegetacion.select ('B4'))});
3	LAI	var SAVI = Vegetacion.expression ('float (((NIR - RED) / (NIR + RED + L))* (1+L))',{ 'L': 0.5, // Cobertura vegetación 0-1 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'RED': Vegetacion.select ('B4'))}); var LAIg = SAVI.multiply(5.405).subtract(0.114)
4	GCI	var GCI = Vegetacion.expression ('float (((NIR) / (GREEN)) - 1)', { 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'GREEN': Vegetacion.select ('B3'))});
5	NDWI	var NDWI = Agua.normalizedDifference(['B3', 'B8']);
6	MNDWI	var MNDWI = Agua.normalizedDifference(['B3', 'B11']);
7	NBRI	var NBRI = Vegetacion.expression ('float (NIR - SWIR) / float (NIR + SWIR)', { 'NIR': Vegetacion.select ('B8'), 'SWIR': Vegetacion.select ('B12'))});

Fuente: elaboración propia (2024).

Adicionalmente, para recortar el resultado de cada índice a partir el polígono del área de interés, se inserta la siguiente línea de código con la función 'Clip':

```
var NDVI_clip = NDVI.clip(table);
```

Para visualizar cada resultado sobre la plataforma se crean las líneas de código con el gradiente de colores de la simbología más apropiada según sea el caso; sin embargo, cada usuario es libre de crear su propia escala de colores según lo requiera:

- a. Índices de vegetación: colores en escala de semáforo que van desde rojo hasta verde.

```
var vis = {  
  min: -1,  
  max: 1,  
  palette: ['FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718', '74A901',  
    '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201', '004C00', '023B01', '012E01', '011D01',  
    '011301']};
```

- b. Índices de agua: colores en escala de azules que van desde azul claro hasta azul oscuro.

```
var vis = {  
  min: -1,  
  max: 1,  
  palette: ['F4F6F6', 'AED6F1', '2980B9', '1A5276']};
```

- c. Índices de áreas quemadas: colores en escala de amarillos, rojos y negros.

```
var vis = {  
  min: -5,  
  max: 1.3,  
  palette: ['DAF7A6', 'FFC300', 'FF5733', 'C70039', '900C3F', '581845']};
```

Para exportar los resultados a Google Drive se insertan las siguientes líneas de código para cada temporalidad y cada índice calculado:

```
Export.image.toDrive({  
  image: ndvi1 // nombre imagen  
  description: 'NDVI_S2_T1_2022', // nombre archivo  
  scale: 10, // resolución espacial de la imagen  
  fileFormat: 'GeoTIFF', // formato en que se exporta la imagen  
  region: table}); // recortar al área de interés
```

Luego se descarga el resultado de cada proceso para cada temporalidad establecida y se verifica en el software SIG que los índices hayan sido calculados de manera correcta.

Etapa 4 - Análisis de cambios a nivel de cobertura

En este paso se analizan los cambios de cada índice por cada cobertura presente para la temporalidad de análisis. Para esto en el software SIG seleccionado se ejecutan geoprocursos como se describe a continuación.

Paso 1 - Generación de archivos ráster que representan la media de cada período

Para cada índice espectral de cada período (seco y de lluvias) se genera un nuevo archivo ráster a partir del cálculo del promedio (media) de los valores del píxel tomando como datos de entrada los resultados de cada temporalidad. Este proceso se hace con la herramienta 'Raster calculator' con la que se suman primero los archivos de las diferentes temporalidades y luego se dividen entre el número total de años de análisis:

$$Media_{Indice} = \frac{Indice_{Año1} + Indice_{Año2} + +Indice_{Año3} + Indice_{Año4}}{4}$$

Al tener los resultados de la media de cada temporalidad, dado que en la mayoría de casos los archivos resultantes tienen vacíos de información por presencia de nubes especialmente en épocas de lluvias, se deben realizar tres procesos para rellenar los píxeles sin información y así contar con datos completos para el análisis. Estos se realizan con la calculadora ráster insertando los siguientes códigos:

- Identificar zonas vacías: `IsNull("media_indice")`
- Rellenar los píxeles vacíos ajustando el valor de píxeles que entre más grande sea más mayor cantidad de vacíos rellenará: `FocalStatistics("media_indice", NbrCircle(100,"CELL"),"MEAN")`
- Condicional para identificar valores iguales a 1 que son valores faltantes: `Con("%isnul%" == 1,"%relleno%"," media_indice")`

Paso 2 - Cálculo de estadísticos zonales por cobertura terrestre

Debido a que los humedales presentan variaciones en su dinámica, el cálculo de los estadísticos zonales a partir de cada imagen ráster resultante del cálculo de los índices espectrales se hace para calcular diversos estadísticos para áreas delimitadas en un archivo vectorial.

Para este proceso, dado que en el protocolo los datos de biomasa se analizan a partir de las coberturas terrestres, la capa a partir de la cual se calculan los estadísticos zonales es la de coberturas de la tierra (clasificación Corine Land Cover - CLC) presentes en el área de interés y que corresponden a las clases: bosques y áreas seminaturales (clase 3), áreas húmedas (clase 4) y superficies de agua (clase 5).

El proceso se realiza usando la herramienta 'Zonal statistics' del software ArcGIS que calcula diversos estadísticos para una o varias zonas en base a los datos de las imágenes ráster que representan los valores de la media de los índices espectrales calculados para el período seco y período de lluvias.

Los estadísticos calculados son seleccionados acorde a las necesidades, se recomienda calcular los estadísticos descritos a continuación (ESRI, 2023), sin embargo, los requeridos principalmente son la media y la desviación estándar para el cálculo del coeficiente de variación en el paso 3.

- ✦ Mínimo: se asigna el valor más bajo de cada zona.

- └ Máximo: se asigna el valor más alto en cada zona.
- └ Rango: la diferencia entre los valores máximos y mínimos en cada zona.
- └ Media: se asigna el promedio de los valores de cada zona.
- └ Desviación estándar: se asigna la desviación estándar de los valores en cada zona.

El resultado es una tabla con los estadísticos seleccionados donde se presentan los valores por polígono según la clasificación CLC. Un ejemplo de cómo funciona el proceso se presenta en la Figura 25.

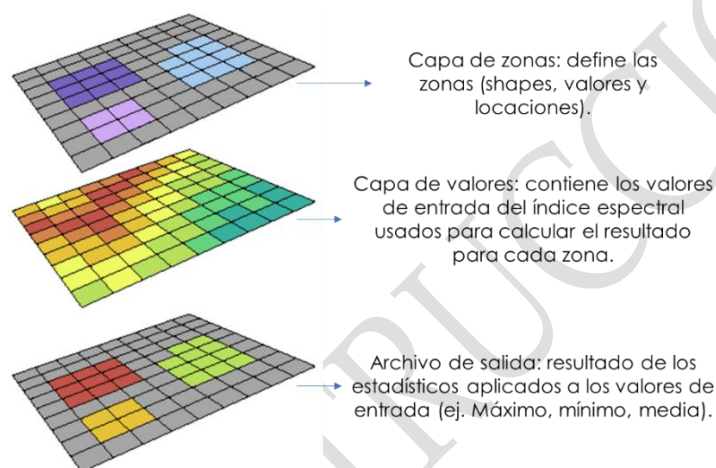


Figura 25. Archivos de entrada y archivo de salida para el proceso de cálculo de estadísticos zonales como tabla. Fuente: tomado y ajustado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-zonal-statistics-works.htm>

Paso 3 - Cálculo del coeficiente de variación (CV)

A partir de los valores obtenidos con los estadísticos zonales para la desviación estándar y la media, se procede con el cálculo del coeficiente de variación (CV) que representa el cambio que experimenta el área de interés a través de la serie de tiempo, en este caso, a nivel de polígono de coberturas. El CV se expresa en porcentaje para tener mayor facilidad en su interpretación, y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$CV = \left(\frac{DS}{Media} \right) * 100$$

Donde CV: Coeficiente de variación

DS: Desviación estándar

Para el caso de los índices espectrales de agua, la media se debe tomar como valor absoluto en caso que los valores sean negativos, de forma tal que estos valores sean positivos antes de proceder con el cálculo del CV.

La interpretación del CV se hace de la siguiente forma:

- ✦ Valores altos indican que hubo cambios representativos en la dinámica del ecosistema.
- ✦ Valores bajos indican que el ecosistema acuático es estable y que no hubo mayores cambios.

Directrices IPCC



Compartimientos de monitoreo:
Biomasa, MOM, suelos y biodiversidad

ETAPA DE MUESTREO

BIOMASA Y MATERIA ORGÁNICA MUERTA

A continuación, se presentan las variables definidas para la medición en campo de reservas de carbono provenientes de la vegetación acuática y vegetación inundable, de acuerdo con los estándares internacionales establecidos por el IPCC para la definición de los depósitos a considerar y las categorías de uso de tierras homologadas a partir de la capa de coberturas de la tierra del período 2018, metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2021).

Definición de los depósitos de carbono

Se define la biomasa aérea arbórea (BARA) proveniente de coberturas tipo bosque y no arbórea (BNAA) proveniente de coberturas definidas como no bosque, de acuerdo con Proclima (2021). Del mismo modo, la biomasa subterránea se diferencia en biomasa arbórea subterránea (BARS) y biomasa no arbórea subterránea (BNAS). Para el diseño del protocolo y la definición de variables en este documento se tuvo en cuenta esta diferenciación (Tabla 24).

Tabla 24. Definición de depósitos de carbono asociados a la biomasa. Modificado de Yepes et al., (2011); Cisneros-de la Cruz et al (2021).

Depósito de carbono		Definición
Biomasa viva	Biomasa aérea	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo (o sobre el espejo de agua o zona de encharcamiento), con inclusión de tallos, ramas, corteza, semillas y follaje.
	Biomasa subterránea o radicular	Toda la biomasa viva de raíces: incluye raíces finas < 2 mm que sirven para la absorción de agua y nutrientes y raíces gruesas > 2 mm que sirven como estructuras de transporte y sostén.
Biomasa muerta (MO)	Detritos o madera muerta	Madera no viva sobre el suelo, ya sea en pie o caída. La madera muerta comprende la que se encuentra en la superficie, raíces muertas y tocones de 10 cm de diámetro o más.

Depósito de carbono		Definición
	Hojarasca o mantillo	Biomasa muerta en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico (hojas, ramas y cáscaras de frutos). Comprende las capas de detritos, fúmica y húmica.

Estratificación del área de muestreo

En este documento la estratificación se refiere a la definición de sitios de muestreo y en ese sentido, cada estrato corresponde a un sitio de muestreo, teniendo en cuenta la homologación según IPCC. Adicionalmente, es importante considerar que la biomasa proviene de dos fuentes importantes según el tipo de vegetación, de esta forma se define la biomasa arbórea, proveniente de coberturas tipo bosque y no arbórea, proveniente de coberturas definidas como no bosque. Para el diseño del protocolo y la definición de variables se deber tener en cuenta esta diferenciación (Tabla 25).

Tabla 25. Componentes de vegetación para la captura de CO2 en humedales.

Tipo de cobertura			
Ilustración			
			
	No bosque		Bosque
	Definición Vegetación acuática Macrófitas o hidrófitas, incluye plantas emergentes, flotantes o sumergidas.		Definición Vegetación de pantano.
Especies comunes	<i>Eichhornia crassipes</i> , <i>E. azurea</i> , <i>Pistia stratiotes</i> , <i>Lemna sp.</i> , <i>Ludwigia helminthorrhiza</i> , <i>L. sedoides</i> , <i>Neptunia oleracea</i> .		<i>Paspalum repens</i> , <i>Oxycaryum cubense</i> , <i>Polygonum densiflorum</i> , <i>Mimosa pigra</i> .
			Palmar de <i>Attalea butyracea</i> . Bosques <i>Symmeria paniculata</i> , <i>Bactris guineensis</i> , <i>Phyllanthus elsiae</i>

Fuente: elaboración propia (2024).



Vegetación de áreas inundadas
(árboles y palmas)



Vegetación de pantano



Vegetación acuática



Bosque



No bosque

Figura 26. Zonificación de la vegetación de los humedales del Magdalena medio y bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Cobertura tipo bosque

Es la vegetación de tipo leñosa definida por unidades de vegetación dominadas por plantas con una altura >5 m, caracterizadas por tener tallo o eje principal, en donde se incluyen elementos como árboles y palmas (Proclima, 2021), en los humedales del Magdalena medio y bajo, se distribuye principalmente sobre las áreas inundadas o llanura de inundación de manera continua, formando coberturas boscosas o dispersas.

Cobertura tipo no bosque

Corresponde a las coberturas compuestas por vegetación acuática (macrófitas asociadas a humedales de agua dulce), vegetación a nivel del suelo dominadas por plantas herbáceas con altura menor a 30 cm, vegetación herbácea (dominada por plantas con altura entre 0,3 y 1,5 m) y vegetación de tipo arbustiva (plantas con altura entre 1,5 y 5 m) (Proclima, 2021). Para el presente protocolo se tienen en cuenta principalmente las acuáticas flotantes y enraizadas emergentes que se encuentren sobre el espejo de agua y la vegetación de pantano que puede incluir elementos herbáceos y arbustivos.

Definición de las variables de monitoreo según el reservorio o depósito de carbono

Cobertura tipo bosque

Biomasa aérea arbórea (BARA). Se recomienda emplear el método indirecto que consiste en utilizar ecuaciones alométricas o factores de expansión, para el cual se emplean las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura y densidad de madera e incluirlas posteriormente en la ecuación seleccionada (Yepes et al., 2011; Kauffman et al., 2013-2016; Cisneros-De la Cruz et al., 2021). De acuerdo con Acosta et al., (2002), el uso de ecuaciones alométricas permite una estimación confiable de la biomasa, ya que en la ecuación se contempla la variabilidad asociada con la edad de los árboles.

Biomasa arbórea subterránea o radicular (BARS). El método indirecto contempla el empleo de ecuaciones alométricas. Existe un grupo de ecuaciones que se pueden emplear, la ecuación pantropical de Cairns et al., (1997) recomendada por el IPCC (2003, 2006) para bosques tropicales (Yepes, et al., 2011) y las ecuaciones desarrolladas por Kauffman et al (2016) para bosques de pantano tropicales, que tienen como variable predictiva el diámetro o la biomasa aérea calculada para cada individuo registrado en las parcelas de muestreo.

Cobertura tipo no bosque

Biomasa no arbórea aérea (BNAA). Para la vegetación de tipo herbáceo se emplea el método directo, el cual consiste en cosechar a ras del suelo (o sobre el espejo de agua para el caso de las macrófitas) todo el material que se encuentre dentro de la subparcela o cuadrante definido para tal fin.

Biomasa no arbórea subterránea (BNAS). Para el presente protocolo se realiza la estimación de este compartimiento en la vegetación acuática exclusivamente, en la cual, de la muestra cosechada para el ítem anterior, se separa el sistema radicular de las macrófitas.

Materia Orgánica Muerta

Contempla la biomasa muerta (hojarasca o mantillo) en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico (Yepes et al., 2011). Para su medición, se emplea también el método directo, considerando el material que se encuentre sobre el suelo.

Tabla 26. Definición de depósitos de carbono asociados a la biomasa. Definición de variables para la determinación de biomasa en cobertura tipo bosque, no bosque y materia orgánica muerta (MOM).

Depósito de carbono	Variable	Tipo de variable	Revisión ecuaciones alométricas (factor de expansión)
Biomasa aérea arbórea (BARA)	DAP	Independiente	Modelo para bosques secos tropicales (Chave et al., 2014).
	Altura Densidad de madera	Dependiente	Modelo bosques tropicales de Colombia (Álvarez et al., 2012). Modelos alométricos especie (género) – específicos.
Biomasa arbórea subterránea o radicular (BARS)	Altura, DAP ó BA (biomasa aérea)	Variables predictivas	Ecuación pantropical (Cairns et al., 1997). Bosques tropicales (Yepes, et al. 2011). Bosques de pantano tropicales (Kauffman et al., 2016).
Biomasa no arbórea aérea (BNAA)	Peso fresco Peso seco Contenido de C (%)	N/A	N/A
MOM (Hojarasca)	Peso fresco Peso seco Contenido de C (%)		

Fuente: elaboración propia (2024).

Tipo, tamaño, número y diseño de parcelas de monitoreo

La parcela es la unidad de muestreo propuesta para cada uno de los estratos, que permite realizar el reporte de las mediciones de los depósitos de carbono por hectárea (Kauffman et al., 2016). Para los humedales del Magdalena medio y bajo se recomienda establecer parcelas “semipermanentes”, denominadas así debido a que el monitoreo debe realizarse por lo menos dos veces al año, teniendo en cuenta la estacionalidad según los regímenes de lluvias y el pulso de inundación de los ríos; por tanto, se necesita que perduren durante esta frecuencia de medición. Otra ventaja es que el montaje de la parcela se realiza una vez al año, además son más precisas desde el punto de vista estadístico para determinar los cambios en las existencias de carbono en los periodos definidos, ya que se mide la misma parcela en los dos momentos (Howard, Hoyt, Isensee, Pidgeon, & Telszewski, 2019).

Se definen parcelas rectangulares 50 m x 10 m para un área total de 500 m², de acuerdo con (Kauffman et al., 2016). En humedales tropicales el movimiento en campo del personal se dificulta, debido a la presencia de agua estancada y zonas pantanosas, por lo que se suelen utilizar este tipo de parcelas para las estimaciones de contenido de carbono, ya que su establecimiento es más eficiente; además, cuando existe evidencia de explotación selectiva, que es el caso de la mayoría de los humedales del Magdalena medio y bajo. Sus límites son más fáciles de reconocer al estar marcados por líneas rectas con ángulos de 90°, son fáciles de replantear con el empleo de cintas métricas y brújulas y su localización posterior se facilita al contar con cinco puntos de referencia (cuatro esquinas y el centro), por lo que son las recomendadas para el monitoreo en tierras medias y bajas de Colombia (Rangel-Ch. & Velázquez, 1997).

Es importante mencionar que la parcela debe establecerse de manera perpendicular a la orilla, desde esta hacia la zona de pantano (zona de transición) y de ribera (llanura aluvial), para considerar realmente la zonificación de la vegetación descrita anteriormente; además, debe establecerse durante la temporada seca (aguas bajas) para fijar los límites de forma adecuada. De no ser posible disponerla desde el inicio de la orilla, en el límite de esta y el espejo de agua, se recomienda desplazarla unos metros hacia el interior (alejándose un poco del espejo de agua), hasta encontrar una zona donde se puedan fijar las estacas para demarcarla y poder monitorear la vegetación acuática ubicada en ese límite.

- ✦ Se recomienda que las parcelas tengan un diseño anidado que, según (Kauffman, y otros, 2016) permite considerar las variaciones de composición y estructura a través del tiempo. Este diseño consiste en una parcela grande y dentro de esta, subparcelas más pequeñas, de acuerdo con los parámetros de estudio de la vegetación establecidos por (Rangel-Ch. & Lozano, 1986).
- ✦ Al interior de esta, se definen dos subparcelas de 25 m² para los elementos arbustivos, las cuales se recomienda establecer en el extremo norte de la parcela. También se puede considerar montar cuatro subparcelas para asegurar el muestreo de este tipo de vegetación, ubicando dos en el extremo norte y las dos siguientes contiguas; en caso de que no se encuentren elementos arbustivos de acuerdo con el diseño propuesto, se recomienda realizar el levantamiento de información de este estrato en el área total de la parcela.
- ✦ Dos subparcelas de 4 m² para el muestreo del estrato herbáceo, las cuales se recomienda disponerlas unos dos o tres metros inmediatamente después de la lámina de agua, en la zona de transición (pantano), en el extremo sur de la parcela.
- ✦ Finalmente, dos subparcelas de 1 m² para el muestreo de la vegetación acuática que se encuentre en el espejo de agua, que se pueden disponer también en el extremo sur de la parcela. En la parcela grande se monitorean los elementos arbóreos (y estrato arbustivo según sea el caso), los cuales se recomiendan monitorear en sentido de las manecillas del reloj.

El diseño elegido debe ser el mismo para todos los sitios y durante las dos temporalidades de medición, con el fin de hacer las comparaciones necesarias y asegurar el ajuste en términos estadísticos. Para esto, se recomienda realizar validaciones previas en campo de los sitios de muestreo. Adicionalmente, es necesario definir puntos de referencia y llevar un buen registro fotográfico que permitan ubicar la parcela de forma posterior (durante la segunda medición (Figura 27).

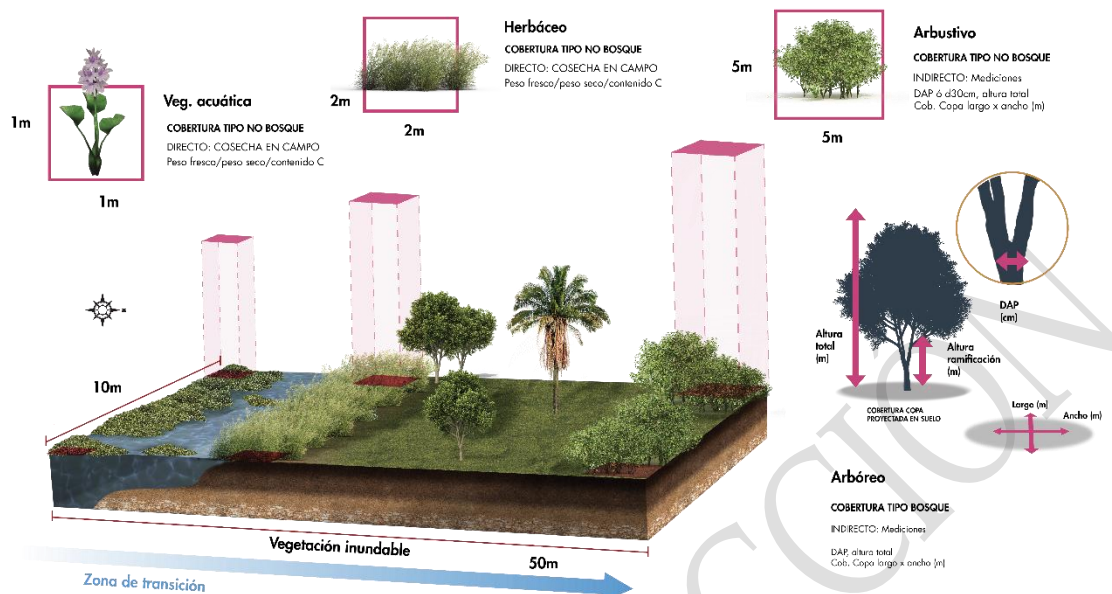


Figura 27. Diseño de la parcela para la estimación de depósitos de carbono asociados a la vegetación en humedales continentales del Magdalena medio y bajo. Fuente: elaboración propia (2024).

Para el muestreo de la MOM se propone establecer dentro de la parcela cinco cuadrantes de 25 cm x 25 cm, ubicados en los cuatro extremos y en el centro (Figura 28).

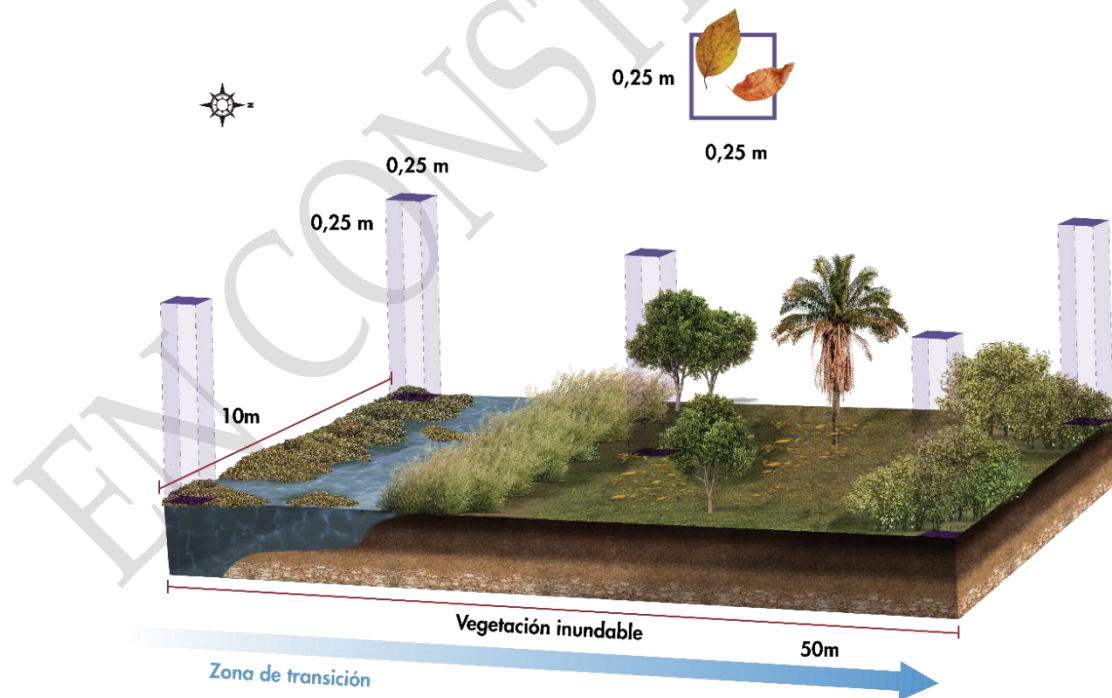


Figura 28. Subparcelas para MOM (hojarasca) en parcela principal. Fuente: elaboración propia (2024).

Frecuencia de las mediciones

Se recomienda realizar las mediciones de los depósitos de carbono seleccionados por lo menos dos veces en el año, teniendo en cuenta los periodos de aguas altas y bajas; esto con el fin de realizar el monitoreo con énfasis en la vegetación de tipo bosque durante el periodo de aguas bajas, cuando es más fácil el movimiento en campo y concentrar los esfuerzos en el monitoreo de la cobertura no bosque, asociada con la vegetación acuática, en el periodo de aguas altas, cuando se encuentra en su máxima expresión. Esto permitirá realizar una estimación más certera del almacenamiento de carbono.

Otra consideración importante es la dinámica de acumulación de carbono en el ecosistema que, de acuerdo con (Hernández, 2010) y (Kayranli, Scholz, Mustafa, & Hedmark, 2010), resulta de la productividad primaria y el depósito y acumulación de sustancias húmicas en el suelo. En ecosistemas terrestres, parte de la materia orgánica que cae al suelo se descompone rápidamente, al estar sujeta a condiciones aeróbicas, pero en los humedales esa descomposición es más lenta, debido a las condiciones anaerobias que se dan cuando el suelo es cubierto por agua, sumado a otros factores como la temperatura, el pH, el tipo de sustrato y el nivel freático.

En los humedales del Magdalena medio y bajo dicho fenómeno ocurre generalmente durante los periodos de estiaje y lluvias. En aguas altas, las zonas de humedal y de transición se encuentran cubiertas por agua y son colonizadas por vegetación acuática; gran parte de ese material vegetal muere y se acumula en el suelo durante la temporada seca (aguas bajas). De esta forma, cuando el nivel del agua vuelve a subir, ese material queda bajo la lámina de agua en condiciones anaeróbicas, lo que reduce su tasa de descomposición y produce la acumulación de carbono en el suelo; por esta razón se dice que el potencial de almacenamiento de carbono en humedales es alto (Figura 29). Esta situación refuerza la necesidad de realizar el monitoreo con la frecuencia propuesta, con el fin de cuantificar el carbono almacenado en la materia orgánica y compararlo con el depositado en el suelo.

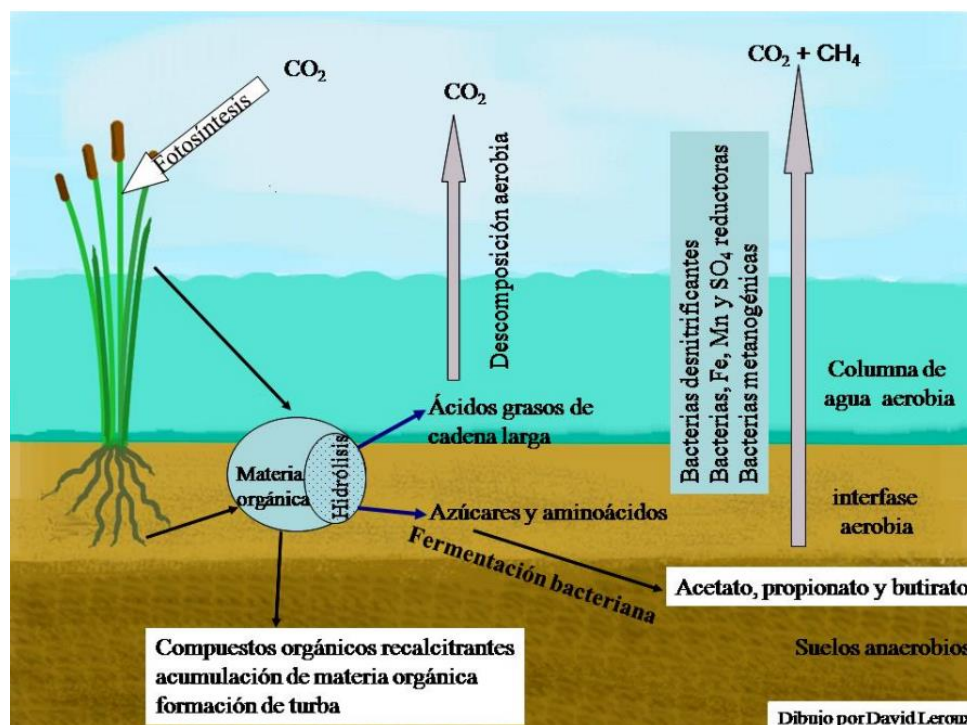


Figura 29. Principales transformaciones de carbono en los humedales modificado de (Hernández, 2010).

El monitoreo se puede repetir cada dos o tres años, dependiendo de las dinámicas de uso, para identificar los cambios en los depósitos de carbono que puedan ocurrir por cambios de uso de suelo. Asimismo, es recomendable para ecosistemas donde se estén desarrollando acciones de restauración para la mayor comprensión de los procesos y dinámicas ecológicas y su relación con la captura y almacenamiento de carbono (Kauffman, Donato, & Adame, 2013), (Kauffman, y otros, 2016).

Mediciones y toma de muestras

Cobertura tipo no bosque: vegetación acuática

Biomasa aérea

- Para estimar el contenido de carbono en este componente, (Palomino & Cabrera, 2008; Medrano et al., 2012; Aldave & Aponte, 2019) recomiendan trabajar con las especies dominantes en el ecosistema. En el caso particular de los humedales continentales del Magdalena medio y bajo, una de las macrófitas de mayor representación es el buchón de agua *Eichhornia crassipes*, especie de rápido crecimiento y de gran porte, que, de no considerarse, por ser una especie flotante libre, podría subestimarse el potencial de captura de carbono de estos humedales.

Otras macrófitas que se deben considerar son las enraizadas con hojas flotantes (EF) y las enraizadas emergentes (EE) como *Ludwigia helminthorrhiza* o *Neptunia oleracea*; las enraizadas en zonas húmedas (EH) como *Mimosa pigra* y algunas especies del género *Polygonum*. Para la estimación se utiliza el método directo, también denominado cosecha:

- ✦ Se definen dos subparcelas de 1 m², para lo que se recomienda utilizar un cuadrante elaborado en tubos de PVC.
- ✦ En cada subparcela se cosecha la macrófita más abundante (cobertura entre 50% y 70% en el cuadrante).
- ✦ Se lava el material para separar la necromasa y otros elementos que puedan estar adheridos a las macrófitas.
- ✦ Se separan también las raíces, las cuales se deben procesar por aparte.
- ✦ El material cosechado debe ser pesado en campo para determinar el peso fresco y esta información se debe registrar en un formato dispuesto para ese fin.
- ✦ Se recolecta una muestra de peso fresco de 300g para la determinación del peso seco en laboratorio.
- ✦ Las muestras recolectadas deben ser almacenadas en bolsas plásticas debidamente rotuladas con los datos del sitio de muestreo y la subparcela.
- ✦ Finalmente, se registran las demás especies que se encuentren dentro de cada cuadrante y se estima la cobertura de cada especie en términos de porcentaje (Figura 30).





Figura 30. Muestreo de biomasa de la vegetación acuática. Fuente: elaboración propia (2024).

Biomasa subterránea o radicular

De la muestra cosechada en el paso anterior se seleccionan las raíces, se lavan para separar la necromasa y otro material que pueda estar adherido a las mismas, se determina el peso fresco y se separa una submuestra de 300 g, la cual se debe guardar en una bolsa plástica debidamente marcada para la determinación de peso seco en laboratorio.

Cobertura tipo no bosque: vegetación de pantano herbáceas

Biomasa aérea

Se definen dos subparcelas de 4 m², en cada subparcela se cortan a ras del suelo y se cosechan toda las herbáceas, separando otros elementos que puedan estar adheridos al material cosechado. Dicho material debe ser pesado en campo para determinar el peso fresco y separar una muestra de 300 g para la determinación del peso seco en laboratorio, la cual se almacena y rotula siguiendo las indicaciones de los componentes descritos (Figura 31).



Figura 31. Muestreo de biomasa de herbáceas. Fuente: elaboración propia (2024).

Cobertura tipo no bosque: vegetación de ribera arbustiva

Biomasa aérea y radicular

La determinación de estas biomazas se realiza de forma indirecta empleando ecuaciones alométricas. Dentro de las subparcelas de 5 m x 5 m o dentro de la parcela principal (según sea el caso), se deben registrar las especies con Diámetro a la Altura del Pecho - DAP < 2,5 cm y alturas entre 5 y 1,5 m, estimando para cada una el DAP o el diámetro a 30 cm (d30), la altura total y la cobertura de la copa (ancho por largo en metros).

Cobertura tipo bosque: árboles y palmas

Biomasa aérea y radicular

Esta determinación se realiza empleando ecuaciones alométricas o factores de expansión. Dentro de la parcela de 500 m² se deben registrar todas las especies con DAP $\geq$ 2,5 cm y altura mayor a 5 m y estimar para cada una el DAP con una cinta métrica, la altura total, la altura de ramificación (puede ser por estimación visual o con la ayuda de una vara graduada) y la cobertura de copa (ancho x largo) en metros (m), calculando el área

proyectada sobre el suelo de la copa de cada individuo (Figura 32). Todos los ejemplares deben ser marcados, con el fin de realizar las remediciones en los dos o tres años posteriores; para la marcación se recomienda utilizar placas de aluminio, donde se puede indicar el nombre común de la especie y se debe incluir el número de identificación del individuo dentro de la parcela.



Figura 32. Muestreo de biomasa de cobertura tipo bosque. Fuente: elaboración propia (2024).

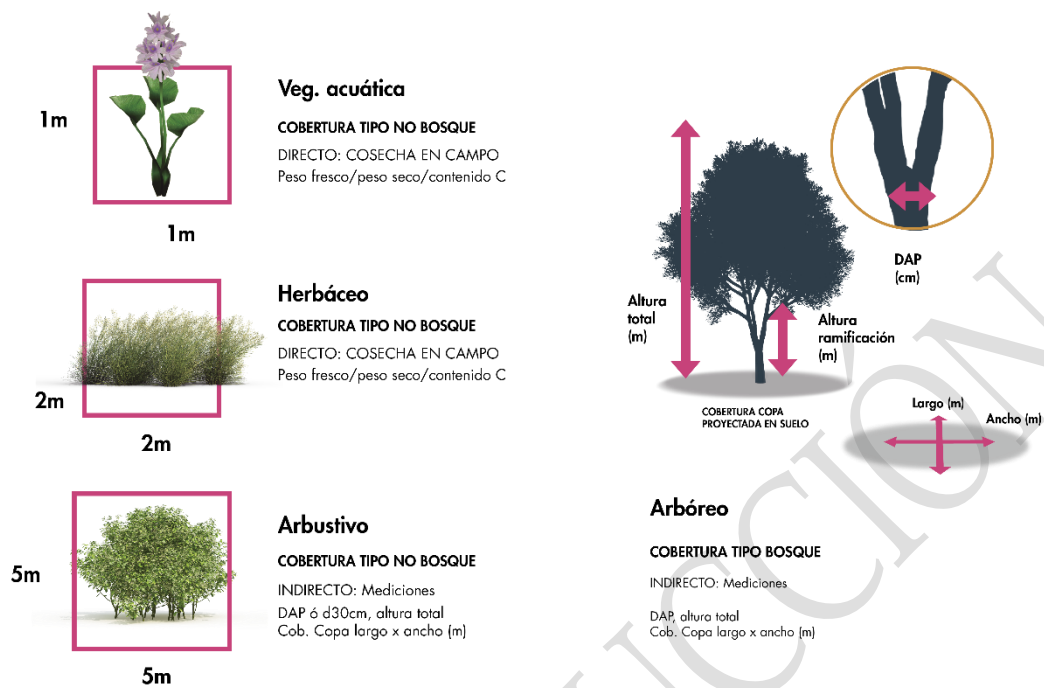


Figura 33. Metodología para el levantamiento en campo de información para la estimación de biomasa arbórea y no arbórea. Fuente: elaboración propia (2024).

Materia Orgánica Muerta (MOM): hojarasca o mantillo

Se establecen cinco cuadrantes de 25 cm x 25 cm dentro de la parcela, ubicados en los cuatro extremos y en el centro. Se debe combinar todo el material colectado, determinar el peso fresco y separar una muestra (250-300 g) para las posteriores determinaciones en laboratorio (peso seco) (Figura 34).





Figura 34. Muestreo de materia orgánica muerta (MOM). Fuente: elaboración propia (2024).

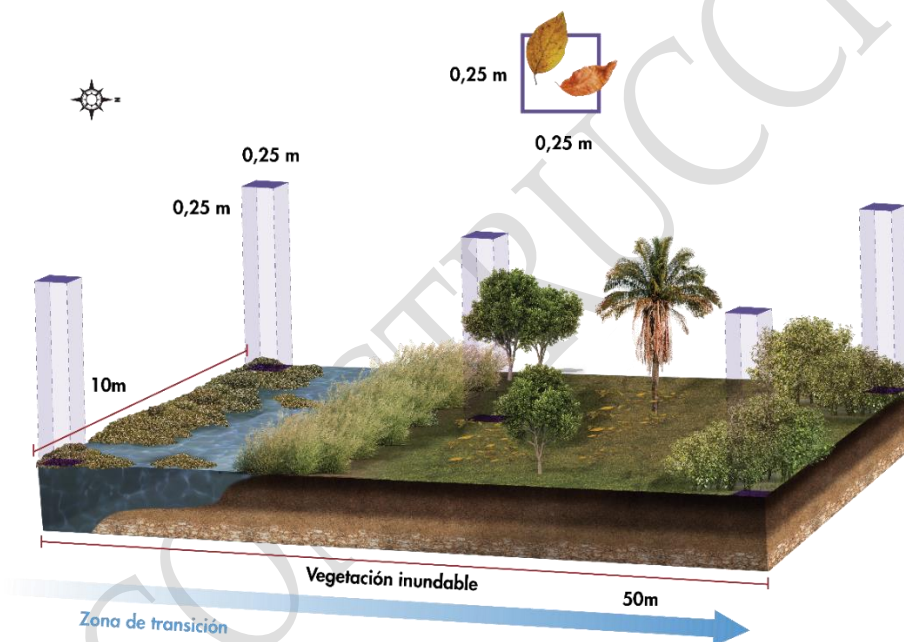


Figura 35. Subparcelas para MOM (hojarasca o mantillo) en parcela principal. Fuente: elaboración propia (2024).

Identificación del material botánico

Es una actividad muy importante que permite la correcta estimación de la biomasa y el contenido de carbono; en este caso será necesario generar un inventario de las especies registradas en cada sitio de muestreo para las estimaciones posteriores. Para su desarrollo se recomienda contar con el apoyo de un local conocedor de la flora de la zona, además del profesional experto en botánica quien realiza la identificación (Figura 36). Además, se recomienda utilizar claves taxonómicas como (Gentry, 1996); (Mahecha, 1997), entre otras que el profesional considere.



Centello Vochysia lehmannii

Figura 36. Identificación del material botánico. Fuente: elaboración propia (2024).

SUELOS Y SEDIMENTOS

El suelo constituye uno de los principales sumideros de carbono, donde se almacena en formas orgánicas, correspondiente al Carbono Orgánico del Suelo (COS) y en formas inorgánicas, asociadas al contenido de carbono en el material parental del suelo y al contenido en la atmósfera de suelo en forma de CO_2 . Además, el suelo es un recurso muy vulnerable frente al cambio climático, los impactos generados por la intervención y uso inadecuado pueden degradar el suelo y con ello convertir la reserva de carbón en gases de efecto invernadero (GEI).

Para estimar los contenidos de carbono en el suelo, Colombia acogió la metodología proporcionada por el IPCC en sus Directrices para Inventarios Nacionales de Carbono y GEI que conforman el volumen 4 ("Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo" - AFOLU) centrado en zonas de humedales (suelos orgánicos, suelos costeros y suelos minerales de humedales continentales) y, por tanto, se deben reportar estimaciones para la biomasa por encima del suelo, la biomasa subterránea, la madera muerta y restos vegetales y los productos de madera recolectados (IPCC, 2006).

Clasificación de los suelos para procesos de homologación

Este proceso consiste en ubicar los suelos en categorías definidas dentro de un sistema taxonómico, que agrupa características y propiedades homogéneas determinadas por rangos de variación. En Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entidad encargada de realizar los estudios de suelos del país, ha adoptado el Sistema de

Taxonomía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA Soil taxonomy), el cual es un sistema de clasificación jerárquico, que toma en cuenta la descripción del perfil de suelo, con sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Por su parte, el IPCC establece un sistema de clasificación orientado al monitoreo de suelos para estimaciones de carbono y Gases de Efecto Invernadero – GEI (IPCC, 2006).

El primer paso para el desarrollo del proceso de homologación es establecer la relación entre estos dos sistemas de clasificación, con el fin de unificar criterios para que la información a levantar permita realizar las estimaciones de contenidos de Carbono en el suelo presente en los ecosistemas de humedal.

Sistema taxonómico norteamericano USDA

Este sistema es jerárquico y clasifica los suelos en seis categorías según su génesis: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie, lo que permite adecuar el sistema de clasificación a diferentes tipos de estudio. En Colombia, los estudios generales de suelos (Escala 1:100.000) llegan hasta la categoría de “Subgrupo”, mientras que los estudios semidetallados (Escala 1:25.000) llegan a la categoría de “Familia” y los detallados a nivel de “Serie”. Cualquiera sea el caso, el nombre taxonómico de cada suelo que compone las Unidades Cartográficas de suelos (UCS), es tomado de los correspondientes estudios de suelos elaborados por el IGAC. A nivel de Orden, los suelos se definen de la siguiente manera (Tabla 27):

Tabla 27. Clave simplificada de los órdenes de suelos del sistema de clasificación del USDA (SSS, 2010).

Categoría a nivel de orden	Definición general
Gelisoles	Suelos que tienen permafrost o materiales gélidos.
Histosoiles	Suelos que no tienen propiedades ándicas en más del 60% de los primeros 60 cm del suelo y están formados por materiales orgánicos.
Espodosoles	Otros suelos que tienen Ap con 85% o más de materiales espódicos, o un horizonte espódico y no tienen propiedades ándicas en 60% o más de los primeros 60 cm de suelo mineral.
Andisoiles	Otros suelos con propiedades ándicas en 60% o más de los primeros 60 cm de suelo mineral.
Oxisoles	Otros suelos que tienen horizonte óxico en los 150 cm superiores del suelo mineral o 40% o más de arcilla en la tierra fina en los primeros 18 cm de suelo mineral y un horizonte kándico en los primeros 100 cm de suelo mineral

Categoría a nivel de orden	Definición general
Vertisoles	Otros suelos que tienen un horizonte de 25 cm o más de espesor que tiene slickensides y que tienen 30% o más de arcilla hasta 50 cm de profundidad o más y grietas que se abren y cierran periódicamente.
Aridisoles	Otros suelos que tienen régimen de humedad arídico y epipedón ócrico o antrópico y alguno de los siguientes horizontes en los primeros 100 cm del suelo: argílico, cálcico, cámbico, gypsico, nátrico, petrocálcico, petrogypsico o sálico, o tienen un horizonte sálico y saturación con agua en alguna capa en los primeros 100 cm del suelo durante un mes o más al año y no tienen horizonte sulfúrico
Ultisoles	Otros suelos que tienen un argílico o un kándico con saturación de bases menor de 35% en los primeros 200 cm de suelo o un fragipán.
Mollisoles	Otros suelos que tienen un epipedón mólico o un horizonte superficial que cumple los requerimientos del mólico, excepto el espesor.
Alfisoles	Otros suelos que tienen argílico, kándico o nátrico o tiene un fragipán con películas de arcilla.
Inceptisoles	Otros suelos que tienen un cámbico, o condiciones ácuicas en los primeros 50 cm de suelo, o tienen cálcico, petrocálcico, gypsico, petrogypsico, plácico o duripán en los primeros 100 cm de suelo mineral, o tienen fragipán u óxico en los primeros 200 cm de suelo mineral, o tienen un horizonte sulfúrico en los primeros 150 cm de suelo mineral, o tienen epipedones mólico, plágeno o úmbrico.
Entisoles	Otros suelos.

Sistema de clasificación de suelos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

El IPCC establece un sistema de clasificación orientado al monitoreo de suelos para estimaciones de Gases de Efecto Invernadero – GEI (IPCC, 2006); contiene siete tipos de suelos: Humedales, Arenales, Orgánicos, Volcánicos, Espódicos, de Arcillas de Baja Actividad (LAC, por sus siglas en inglés) y de Arcillas de Alta Actividad.

Tabla 28. Clasificación de suelos orientado al monitoreo de suelos para estimaciones de GEI (IPCC, 2006)

Tipo de suelos	Definición general
Arenales	Suelos con contenidos de arenas mayor a 70% de la fracción mineral de los suelos y contenidos de arcillas menores a 8%. Se incluyen desde vegas y sobrevegas arenosas en zonas inundables de cuerpos de agua lóticos como en zonas costeras, en manglares. Por su alto contenido de arenas, presentan características como

Tipo de suelos	Definición general
	baja capacidad de retención de humedad, altísima infiltración y lixiviación
Humedales	Suelos saturados la mayor parte del año, con régimen de humedad ácuico.
Orgánicos	Corresponden a suelos de materiales orgánicos, asociados a zonas inundadas con bajo grado de descomposición de los materiales.
Volcánicos	Corresponden a los suelos clasificados como Andisoles en la taxonomía USDA. Se presentan principalmente en zonas de alta montaña, en climas fríos y por su predominancia de arcillas alófanas, forman complejos órgano-minerales y presentan características físicas y químicas específicas y diferentes de los demás suelos minerales, que repercuten no solo en términos de contenidos de carbono sino también de sustancias contaminantes y de resistencia o sensibilidad a procesos de degradación ante cambios de coberturas o ante manejos inadecuados.
Espódicos	Suelos con arcillas de baja actividad, materiales Espódicos y pH ácido.
Suelos con arcillas de baja actividad (LAC)	Son suelos muy evolucionados, con predominios de sesquióxidos de hierro y aluminio y arcillas 1:1, que les confieren propiedades como baja fertilidad y después de los suelos arenales, baja capacidad de fijación de Carbono. Por tener muy pocas cargas de intercambio catiónico presentan bajas fijaciones de cationes y alta lixiviación; además alta acidez y aluminio, por lo cual las coberturas o plantas propias de estos suelos son necesariamente especies tolerantes a estas condiciones.
Suelos con arcillas de alta actividad (HAC)	Son suelos con predominancia de arcillas tipo 2:1, con características químicas y físicas favorables en términos de fertilidad, ya que permiten mayor posibilidad de intercambio iónico, confiriendo disponibilidad de nutrientes y fertilidad a los suelos. De pH cercano a la neutralidad, ricos en bases, con alta capacidad de intercambio catiónico, con moderados a altos contenidos de carbono orgánico. Están generalmente ubicados en valles aluviales recientes.

Propuesta de homologación de suelos para estimación de contenidos de carbono

El proceso de homologación de suelos consiste en validar las propiedades y características de los suelos en cada uno de los sistemas de clasificación, identificando las equivalencias correspondientes. Con este proceso, se busca unificar criterios y definir las categorías de suelos para el monitoreo de contenidos de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo del país. Debido a que el sistema de tipos de suelo IPCC es muy general para las

condiciones de países tropicales como Colombia, se plantea realizar la clasificación de suelos de acuerdo con la siguiente propuesta de homologación:

- Se inicia con la definición de los suelos de acuerdo con el material de origen, en este caso las equivalencias directas para los humedales del Magdalena medio y bajo son:

Tabla 29. Detalle para la definición del suelo según material de origen.

Material de origen (parental)	Orden de suelos (USDA)	Tipo de suelos (IPCC)
Orgánico	Histosoles	Suelos Orgánicos
Volcánico	Andisoles	Suelos Volcánicos

Fuente: elaboración propia (2024).

- Para los órdenes de suelo Entisoles e Inceptisoles (USDA), la homologación se realiza teniendo en cuenta los siguiente:

Tabla 30. Orden de los suelos para procesos de homologación.

Orden de suelos (USDA)	Propiedad específica	Tipo de suelos (IPCC)
Entisoles Inceptisoles	Textura gruesa (> 70% arena)	Suelos Arenales
	Textura finas, muy finas o moderadamente finas (< 70% arena)	Otros suelos Minerales
	Régimen de humedad ácuico	Suelos de Humedales

Fuente: elaboración propia (2024).

- Posteriormente, se establece el tipo de arcillas que presentan los suelos, en este caso se identifican dos tipos: a. Arcillas de alta actividad (2:1), que definen suelos con arcillas de alta actividad HAC (por sus siglas en inglés) que generan alta nutrición y fertilidad; b. Arcillas de baja actividad (1:1), para suelos con arcillas de baja actividad LAC (por sus siglas en inglés) que se encuentran en suelos muy evolucionados, de pHs ácidos y baja fertilidad.

Tabla 31. Tipos de arcillas para procesos de homologación de suelos.

Tipo de arcilla	Orden de suelos (USDA)	Tipo de suelos (IPCC)
Arcillas de alta actividad	Molisolos Vertisoles	HAC

	Alfisolos Aridisolos	
Arcillas de baja actividad	Ultisolos Oxisol	LAC

Fuente: elaboración propia (2024).

- ✦ Entre los suelos con arcillas de baja actividad, hay un tipo de suelo particular que además presenta sustancias amorfas iluviales (producto de lavado intenso) compuestas de materia orgánica y Al, con o sin Fe, denominado material espódico. En este caso, la equivalencia es Espodosoles (USDA) con suelos Espódicos (IPCC)
- ✦ De acuerdo con la taxonomía americana (USDA) el orden de suelos Gelisoles son aquellos que tienen materiales géllicos, es decir, están congelados hasta su máxima profundidad en algún momento del año; estos suelos solo se pueden desarrollar en zonas templadas donde la época de invierno permite la condición del material, en zonas tropicales no se llega a este tipo de suelo ya que, en alta montaña, por ejemplo, solo se da congelamiento en los primeros centímetros del suelo.

A continuación, se resume la homologación realizada partiendo de los requerimientos para definir los suelos según IPCC, que, por ser más generales, pueden agrupar varias de las clasificaciones de suelos definidas por USDA a nivel de orden que es la jerarquía más general de este sistema (Figura 37).

SUELOS USDA

SUELOS IPCC

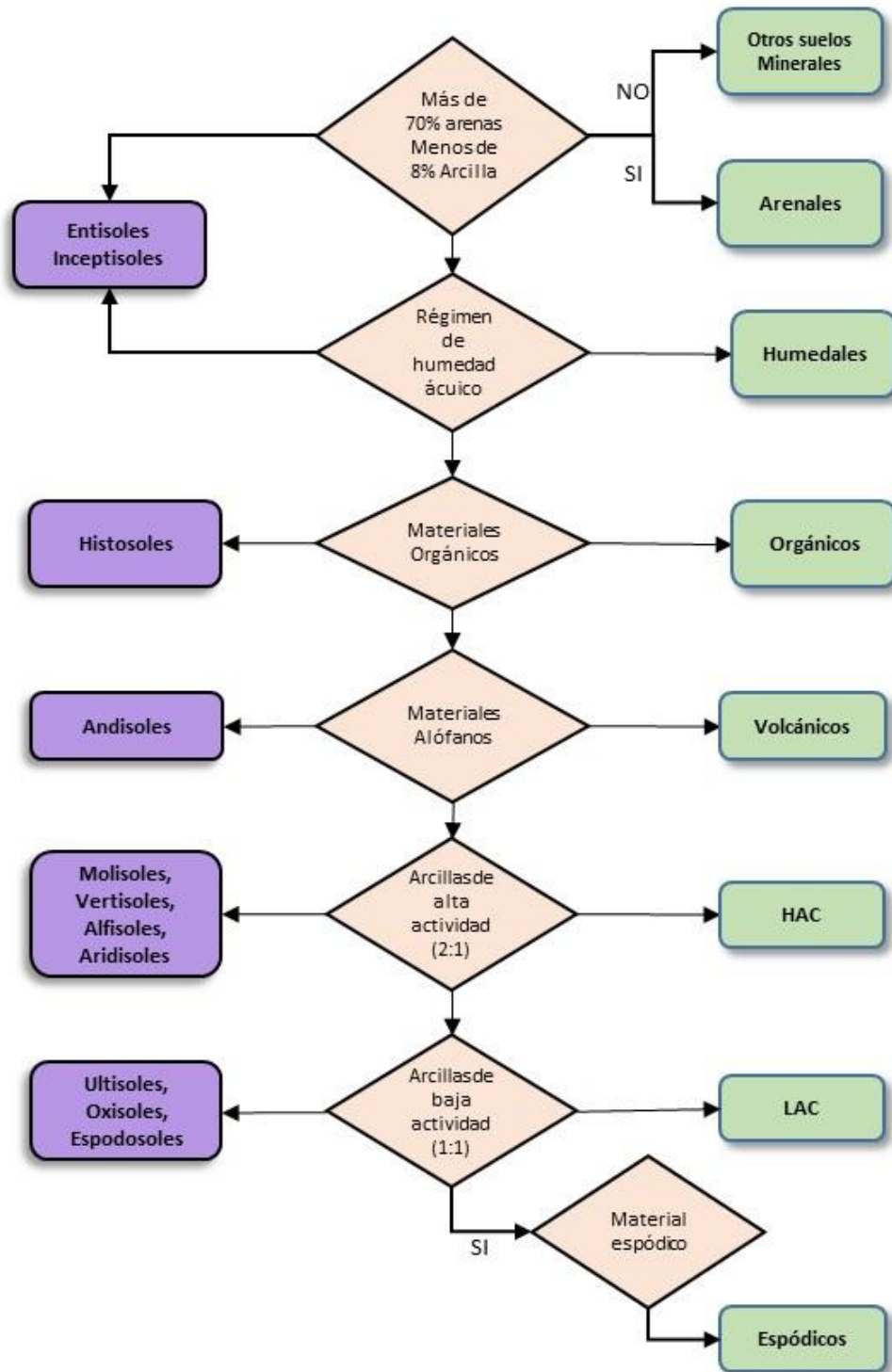


Figura 37. Propuesta de homologación de suelos USDA-IPCC. Fuente: elaboración propia (2024).

Tabla 32. Propuesta de homologación de suelos para el Protocolo de estimación de contenidos de Carbono (C)

Orden de suelos (USDA)	SIGLA USDA	Propiedad determinante	Tipo de suelos (IPCC)	SIGLA IPCC
Histosoles	IST	Orgánico	Suelos Orgánicos	O
Andisoles	AND	Volcánico	Suelos Volcánicos	VC
Entisoles Inceptisoles	ENT EPT	Textura gruesa (> 70% arena)	Suelos Arenales	AR
		Textura finas, muy finas o moderadamente finas (< 70% arena)	Otros suelos Minerales	OM
		Régimen de humedad ácuico	Suelos de Humedales	H
Molisoles	OLL	Arcillas de alta actividad	Arcillas de alta actividad	HAC
Vertisoles	ERT			
Alfisoles	ALF			
Aridisoles	ID			
Ultisoles	ULT	Arcillas de baja actividad	Arcillas de baja actividad	LAC
Oxisoles	OX			
Espodosoles	OD	Arcillas de baja actividad con material espódico	Espódicos	OD
Gelisoles	EL	Suelos congelados hasta su máxima profundidad en algún momento del año	En condiciones tropicales no es posible su desarrollo	

Fuente: elaboración propia (2024).

Variables de monitoreo de suelos y sedimentos para estimación de contenidos de carbono en humedales

Densidad Aparente DA Suelos

Se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo, razón por la cual, depende de la organización que presente la fracción sólida del mismo y está afectada por su textura, estructura, contenido de materia orgánica, humedad (en especial en suelos con materiales expansivos) y grado de compactación, principalmente.

Carbono orgánico del suelo COS

Se realiza en laboratorio especializado mediante métodos como combustión seca o en húmedo que determinan el porcentaje de carbono orgánico del suelo. El método de

combustión seca (Walkley – Black) es el más usado para esta determinación. Para el cálculo de COS en términos de toneladas por hectáreas se tiene en cuenta el espesor de los horizontes, la densidad aparente y un factor de corrección por fragmentos de roca (FAO, 2020). Debido a que este indicador es determinante para las estimaciones de GEI, y para estar en sinergia con la información con el Grupo AFOLU, se propone incluir los ajustes que este grupo viene considerando, como el factor de corrección por contenido de raíces y materia seca y la toma de muestras por horizonte.

Materia orgánica del suelo MOS

El contenido de la MOS se determina por métodos indirectos asociados con la conversión de COS. Soil Survey Laboratory (SSL, 1996) recomienda utilizar un factor de corrección igual a 1.724, asumiendo que la materia orgánica tiene 58% de carbono orgánico mediante la siguiente ecuación:

$$MOS (\%) = COS (\%) \times 1.724$$

Donde:

MOS: Materia orgánica del suelo expresada en porcentaje

COS: Contenido de Carbono orgánico del suelo expresado en porcentaje, determinado por el método de Walkley-Black

Textura

Es una propiedad fuertemente dependiente del material parental del suelo, que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas (sedimentos) de diámetro menor a 2 mm, llamados la tierra fina. Se agrupan en tres clases, según los tamaños: arena (A), limo (L) y arcilla (Ar). Si bien, la textura es una propiedad de los suelos, para el protocolo para la estimación de contenido de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo, se propone identificar la textura de los sedimentos ribereños y en aguas bajas para establecer si han desarrollado algún proceso de transformación de materia orgánica.

Tabla 33. Variables a monitorear para la estimación de contenidos de Carbono en suelos y sedimentos

Propiedad del suelo	Método	Compartimento	Profundidad (cm)
Densidad Aparente (DA)	Cilindro	Suelos	Suelos / 0-25 25-50

Carbono Orgánico del suelo (COS)	Walkley Black	Suelos	0-25 25-50
		Sedimentos	0-25
Materia Orgánica del suelo (MOS)	Ecuación de conversión	Suelos	0-25 20-50
		Sedimentos	0-25
Textura Arena (A) Limo (L) Arcilla (Ar)	Hidrómetro de Bouyoucos	Suelos	0-30
		Sedimentos	0-30

Fuente: elaboración propia (2024).

En cuanto a la profundidad definida para cada una de estas variables, y dado que se trata de estimar el contenido de carbono almacenado en suelos, se propone realizar dos mediciones de COS y densidad aparente, la primera a una profundidad de 0 a 25 cm y la segunda entre 25 y 50 cm. En el primer caso, ya que, tanto por la exposición a la superficie, como por el aporte de materiales orgánicos provenientes de la zona, en los primeros centímetros del suelo se presenta la mayor actividad orgánica del suelo; así, el contenido de Carbono orgánico a esta profundidad se asocia con materiales frescos, con bajo grado de descomposición, que no ha sido incorporado a la estructura evolutiva del suelo. La segunda medición para establecer el carbono almacenado en las partículas de suelo, con mayor grado de descomposición y formación de sustancias húmicas, que constituyen el sumidero de carbono de los suelos.

Para zonas de sedimentos se medirá el contenido de carbono (COS) y la textura, teniendo en cuenta que estos materiales no constituyen desarrollo de suelos. La medición de la densidad aparente no aplica, ya que se considera que no hay acumulación de Carbono orgánico. En el caso de sedimentos a borde de agua, si proceden de suelos inundados, la descomposición de la materia orgánica se activa por la presencia de agua, en tal caso, la medición de Carbono Orgánico constituye un parámetro de comparación e interpretación de la posible cantidad de emisiones bajo estas condiciones.

Determinación del CO₂ producido

El suelo emite CO₂ a través de la respiración de los microorganismos y la fauna del suelo, así como por la actividad de las raíces de las plantas. Esta emisión debe estimarse para identificar el aporte del suelo en la cuantificación total del ecosistema en cuanto a GEI. El proceso puede realizarse con los métodos convencionales, como bioensayos con cámara de incubación en laboratorio, o a través de la cámara de flujo de CO₂, de fácil manejo y que reporta la información directamente en campo. Este último sistema también reporta datos de humedad y temperatura, que son insumos asociados a la actividad biológica del ecosistema (Figura 38).



Figura 38. Cámara de medición de flujo de CO₂ en suelos. Fuente: elaboración propia (2024).

Mediciones y toma de muestras

Selección de los puntos de muestreo para validación en campo

Con la información básica de la zona de estudio se procede a la homologación de la clasificación de suelos, integrando la homologación de suelos USDA-IPCC con las unidades de vegetación y cobertura y uso del suelo.

A partir de la información generada por los componentes estadísticos, SIG, suelos y vegetación se deben identificar los polígonos seleccionados a partir de la aleatorización para hacer el muestreo. Con los polígonos definidos, se programa la salida de campo para verificar la viabilidad del muestreo, posibilidad de acceso a los sitios, tanto para la temporada seca (aguas bajas) como de lluvia (aguas altas), validar los usos del suelo y

establecer algunas consideraciones para tener en cuenta al momento de la toma de muestras (organización de grupos de trabajo para la fase de muestreo).

Muestreo de suelos y sedimentos



Los sitios de muestreo de suelos deben ser definidos dentro de las parcelas establecidas para el muestreo de biomasa aérea (Figura 27) mediante el sistema de cajuela. Para los sedimentos, se toma una muestra a borde de agua, también asociada con las parcelas de muestreo para vegetación acuática. En ambos casos se deben realizar al menos tres repeticiones en cada sitio (IGAC, 2017).

Cajuela: Excavación de forma cúbica que se realiza en el suelo para identificar las características morfológicas de los primeros horizontes en sus tres dimensiones largo, alto y ancho (50 x 50 x 50 cm) la cual se asemeja a una caja pequeña.

En cada sitio se deben extraer las muestras de suelos de acuerdo con las profundidades establecidas (0-25 y 20-50 cm). Para COS y Textura se requiere tomar al menos 1 Kg de muestra que se debe empacar en una bolsa hermética debidamente etiquetada con código de suelo (homologación), número de repetición y profundidad. Las muestras de sedimentos bajo cobertura de agua se toman usando una Draga Eckman.

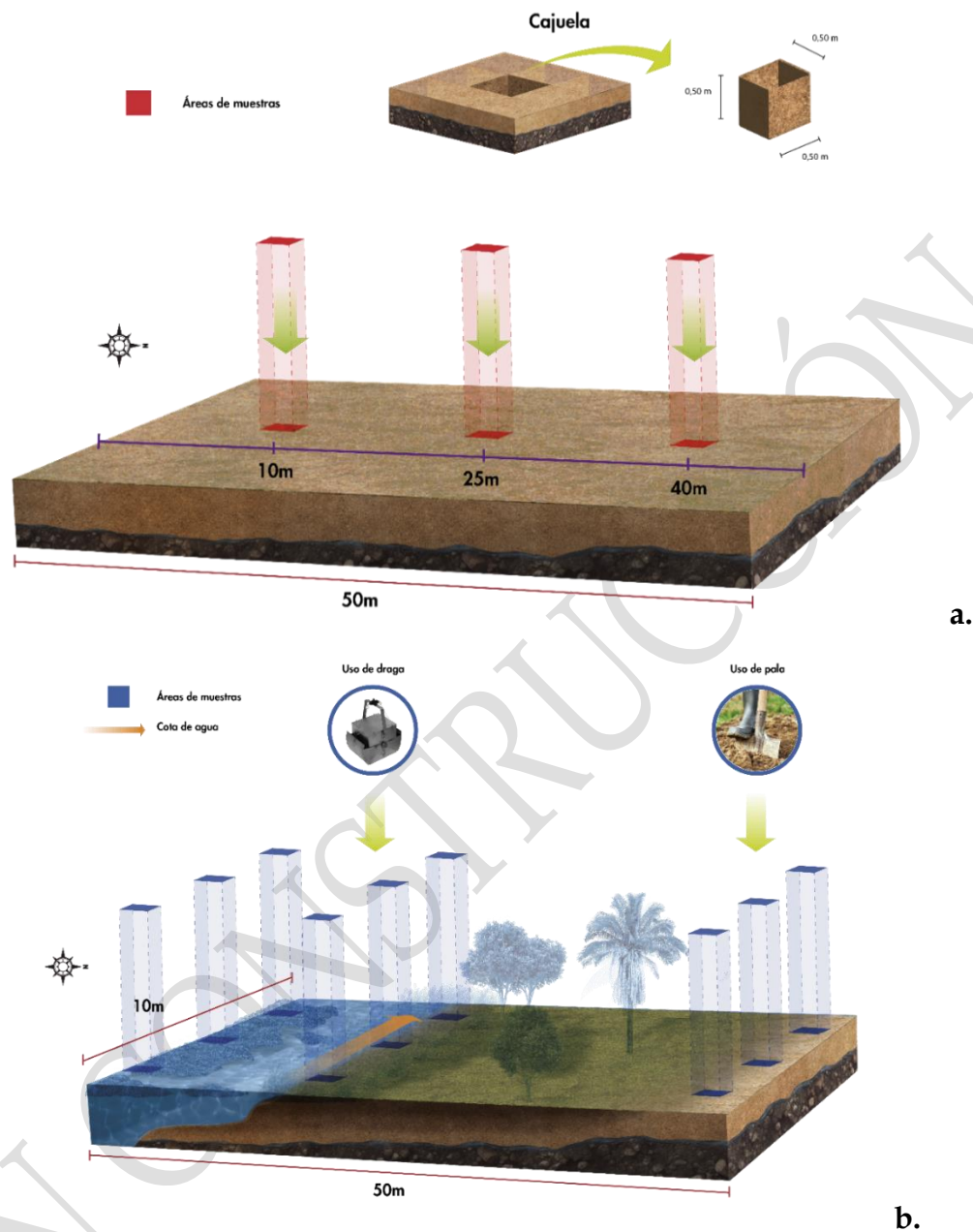


Figura 39. Detalle de la parcela y ubicación de los sitios de muestreo a: suelos y b: sedimentos. Fuente: elaboración propia (2024).

Densidad aparente del suelo

Para determinar la densidad aparente, las muestras de suelo se toman utilizando cilindros muestreadores de volumen conocido, específicos para este tipo de muestreo. Estas muestras deben ser tomadas para cada profundidad seleccionada, se depositan en bolsa independiente y etiquetada y se incluyen con la muestra de suelo para COS y textura (Figura 40).



Figura 40. Técnica para tomar muestras de densidad aparente del suelo. Fuente: elaboración propia (2024).

Una vez tomadas, las muestras deben ser enviadas al laboratorio para su respectivo análisis. Solo si se requiere alguna observación adicional se usará el sistema de barrenado para observación de suelos a mayor profundidad.

La densidad aparente indica la relación de la masa del suelo en relación con el volumen ocupado, incluyendo el espacio poroso del mismo.

$$DA = MS / VS$$

Donde:

DA: Densidad aparente (g/cc)

MS: Masa del suelo (g)

VS: Volumen total del suelo (cc)

En caso de suelos con alguna limitación en profundidad, que impida la toma de muestras para la determinación de la densidad aparente, se recomienda aplicar el modelo definido por IGAC - IAvH (2018), donde a partir de la caracterización de un total de 929 perfiles de suelos, se realiza la correlación de la textura analizada por el método de Bouyoucos y se establece la siguiente ecuación para obtener la densidad aparente de los suelos:

$$Den_Apa = 1.331 + 0.001 A - 0.070 COS$$

Donde:

Den_Apa es la densidad aparente del suelo en g/cc

A = Contenido de arena en el suelo en porcentaje (%)

COS= Contenido de Carbono Orgánico del suelo en porcentaje (%)



BIODIVERSIDAD

Los ambientes dulceacuícolas vinculan la vegetación, los suelos, la atmósfera y los océanos a través del ciclo biogeoquímico del carbono (C), por lo que, pese a que solo representan una pequeña parte de la superficie terrestre, estos sistemas juegan un importante papel en el flujo global de C. Las estimaciones indican que los sistemas de agua dulce transportan, transforman o almacenan aproximadamente 2,7 Pg de C al año (1 Pg = 1 petagramo o 10⁹ toneladas métricas), lo que representa un ~60% de la producción primaria neta de los ecosistemas terrestres (Cole et al., 2007, Lohse et al., 2009, García 2019). La producción primaria acuática (realizada principalmente por organismos autótrofos como las algas y la vegetación acuática) aporta otra buena parte de C que sostienen a las tramas tróficas acuáticas (fuentes autóctonas) (Wetzel 2003, García 2019).

En este contexto, es incuestionable que cualquier cambio en el equilibrio entre la absorción de CO₂ a través de la fotosíntesis (realizada por los organismos autótrofos) y su liberación a través de la respiración (principalmente de los organismos heterótrofos), afectará las concentraciones de CO₂ que se transforman, almacenan o emiten. Por tal razón, el reto de predecir las respuestas de los ecosistemas al cambio climático se encuentra en la comprensión de los múltiples procesos que se desarrollan a través de los niveles tróficos y de cómo estos interactúan con varios elementos ambientales, lo que, además, ayuda a comprender los mecanismos que subyacen la complejidad de los ecosistemas en diferentes escalas de tiempo (Anderson-Teixeira et al., 2012). Sin embargo, la gran mayoría de las investigaciones sobre cambio climático no emplea la escala metabólica, por lo que en este protocolo se pretenden incluir elementos de las redes tróficas acuáticas (a través de comunidades hidrobiológicas) como parte de los modelos para la estimación de contenidos de Carbono en ecosistemas acuáticos del país.

Variables biológicas propuestas para el monitoreo

Teniendo en cuenta la complejidad y dinamismo de los humedales, donde los procesos y patrones biológicos y ecológicos son condicionantes de su estructura, función y mantenimiento y, considerando que la diversidad de las funciones ecológicas de los conjuntos de especies que contienen, determinan la funcionalidad de estos sistemas ecológicos como un todo (Andrade, 2014), para la identificación, caracterización y establecimiento de los procesos biológicos, ecológicos y sociales asociados con los humedales, se debe contemplar tanto la biota acuática como semiacuática (o anfibia), cuya dinámica se integra con la de las variaciones ambientales, físicas y químicas de estos

ecosistemas. Por esta razón, para el análisis de la biodiversidad se proponen los siguientes grupos:

- ✦ Plancton. Se plantea considerar grupos como fitoplancton (incluye algas procarióticas y eucarióticas), zooplancton y bacterioplancton. Sin embargo, se anota que en los pilotos de validación de este protocolo no se consideró el bacterioplancton, por lo que no se desarrollará la propuesta metodológica de este grupo.
- ✦ Ficoperifiton (incluye algas procarióticas y eucarióticas).
- ✦ Macroinvertebrados acuáticos, tanto asociados a macrófitas, como bentónicos.
- ✦ Peces.
- ✦ Macrófitas (incluye plantas estrictamente acuáticas y semiacuáticas).
- ✦ Vegetación inundable asociada al humedal.
- ✦ Fauna terrestre cuya dinámica se asocie con los humedales (p.e. anfibios, reptiles, aves y mamíferos).

Además, en concordancia con las recomendaciones de Proclima (2021) y teniendo en cuenta que las directrices del IPCC para los inventarios de GEI consideran tres niveles metodológicos (siendo el Nivel 1 el más básico e indispensable y el Nivel 3 el de mayor detalle y exhaustividad), en esta propuesta las variables a analizar para el levantamiento de la línea base de la biodiversidad y las posteriores observaciones en los humedales en los que se realice el monitoreo de carbono y GEI y/o se efectúen acciones tendientes a la reducción de emisiones de GEI, se categorizan de la misma manera.

Variables Nivel 1

Se debe analizar la composición y estructura de los grupos biológicos considerados, excepto para el bacterioplancton. Este análisis incluye:

- ✦ Listados taxonómicos (en lo posible, a nivel de especie para las macrófitas, vegetación inundable y todos los grupos de vertebrados y a nivel de género para los macroinvertebrados, el zooplancton y las algas planctónicas y perifíticas).
- ✦ Abundancia relativa por taxón (densidad, abundancia o cobertura).
- ✦ Riqueza taxonómica e índices de riqueza, diversidad, dominancia y equitatividad para cada grupo biológico.
- ✦ Principales aspectos ecológicos de las especies o grupos.

- └ Estructura vertical y horizontal de la vegetación inundable (los datos para la generación de esta información provienen de las parcelas definidas para el monitoreo de biomasa).

Además, para la vegetación inundable, las macrófitas y los grupos de vertebrados (por ejemplo peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos) se propone analizar los aspectos biogeográficos (nativa, endémica, introducida, invasora, naturalizada, etc.) y la categoría de conservación de las especies (vulnerable, amenazada, en peligro, etc.) y, particularmente para los peces, la biomasa.

Variables Nivel 2

- └ Para las macrófitas y los grupos de vertebrados se propone establecer los aspectos comerciales y/o culturales de las especies en el área del humedal.
- └ Además, cuando aplique, describir los hábitos migratorios de las especies encontradas.
- └ Para el bacterioplancton, se plantea calcular la biomasa.
- └ También se propone incluir los análisis de producción o productividad primaria.

Variables Nivel 3

Se considera el cálculo de la biomasa algal (fitoplancton y ficoperifiton), del zooplancton y los macroinvertebrados (asociados a macrófitas y bentónicos). La Tabla 34 resume las variables generales y por grupo biológico propuestas para cada nivel planteado.

Tabla 34. Variables biológicas propuestas para el levantamiento de la línea base y el monitoreo.

Grupo biológico	Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Fitoplancton, Ficoperifiton, Zooplancton, Macroinvertebrados	Composición y Estructura	x		
	Principales aspectos de la ecología de las especies (taxones o grupos)	x		
	Biomasa			x
Peces, Macrófitas, Vegetación inundable, Fauna terrestre (p.e.)	Composición y Estructura	x		
	Principales aspectos de la ecología de las especies	x		
	Aspectos biogeográficos	x		
	Categoría de conservación	x		

Grupo biológico	Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Anfibios, Reptiles, Aves, Mamíferos)	Aspectos comerciales y/o culturales		x	
	Hábitos migratorios (cuando aplique)		x	
Peces	Biomasa	x		
Bacterioplancton	Biomasa		x	
	Producción primaria		x	

Fuente: elaboración propia (2024).

Variables complementarias propuestas para el monitoreo

Con el objeto de lograr una caracterización adecuada de los humedales y de las dinámicas ambientales que influyen la ecología de la biota acuática, también se propone el análisis complementario de algunas variables hidrológicas, físicas, químicas, geomorfológicas y de gestión (Tabla 35). Además, se plantean algunos de los métodos para el levantamiento de dichas variables, sin que ello constituya una forma restrictiva para su muestreo y/o análisis.

Tabla 35. Variables complementarias propuestas para el levantamiento de la línea base y el monitoreo.

Tipo de variable	Variable	Método	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
SIG	Área total	Sensores remotos o fotografía aérea	x		
	Cobertura de la tierra / Usos del suelo		x		
Hidrológica	Morfometría	Batimetría		x	
	Volumen total			x	
	Profundidad total	Medición <i>in situ</i>		x	
	Tasa del flujo del agua				x
Física	Radiación solar	Dato en línea / medición directa			x
	Temperatura ambiente / del suelo			x	
	Transparencia Secchi	En la columna de agua mediante disco Secchi	x		
	Temperatura del agua	Perfil hasta el fondo: cada 50 cm hasta el límite de la zona fótica y cada metro hasta 50 cm antes del fondo	x		
	Conductividad eléctrica		x		
	Turbiedad	3 zonas: fótica / intermedia / 50 cm antes del fondo	x		

Tipo de variable	Variable	Método	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Química	Fósforo total	Al menos subsuperficial. Se recomienda en 3 zonas: fótica / intermedia / 50 cm antes del fondo	x		
	Nitrógeno total		x		
	Oxígeno disuelto o porcentaje de saturación	Perfil hasta el fondo: cada 50 cm hasta el límite de la zona fótica y cada metro hasta 50 cm antes del fondo	x		
	pH		x		
De gestión	Actividades de mantenimiento y gestión	Reporte por corporaciones, empresas o instituciones encargadas			x

Fuente: elaboración propia (2024).

Propuesta metodológica para monitoreo de las variables

Tanto el diseño de muestreo, como las metodologías propuestas, se basan en prácticas estandarizadas (internacionalmente), soportadas científicamente y de amplio uso en el territorio nacional para estudios de biodiversidad. Para todos los grupos biológicos y/o las variables a analizar, se recomienda que las metodologías sean ejecutadas por profesionales competentes e idóneos en cada caso.

Diseño de muestreo

Para la estimación de la producción primaria, la medición de las siguientes variables hidrológicas, físicas y químicas (profundidad total, temperatura ambiente, temperatura del agua, transparencia Secchi, conductividad eléctrica, turbiedad, porcentaje de saturación de Oxígeno y pH) y la recolección de muestras para los análisis de fitoplancton, ficoperifiton, zooplancton y macroinvertebrados; así como el muestreo de las macrófitas, se plantea realizar muestreos diurnos en todas las zonas de monitoreo acuático.

Los muestreos de peces, anfibios, reptiles y mamíferos se proponen tanto en jornadas diurna como nocturnas. En tanto, las jornadas de campo para el muestreo de aves se distribuirán en horarios de alta y media actividad de las especies; esto es, en la mañana (aproximadamente entre las 5:30 y las 10 horas) y en la tarde (de las 15 a las 18 horas, aproximadamente). De cada procedimiento se debe realizar un registro fotográfico detallado.

Monitoreo de las variables biológicas planteadas

Los métodos que se proponen a continuación (Tabla 36 y Figura 41), corresponden a los contemplados en los pilotos de validación de este protocolo; sin embargo, no son restrictivos y, por tanto, constituyen alternativas ampliamente validadas y que se ajustan a los objetivos aquí propuestos, pero pueden ser modificados, según las características de los ecosistemas, el presupuesto de los proyectos, entre otros aspectos. Cabe anotar que, en función de los niveles presentados para el levantamiento de las variables, se especificarán los métodos.

Tabla 36. Métodos propuestos para el levantamiento en campo de las variables consideradas para cada grupo.

Síntesis de los métodos de campo propuestos para el compartimiento de Biodiversidad
Fitoplancton y Zooplancton
Muestreo integrado de tres submuestras obtenidas en diferentes profundidades, utilizando botella muestreadora. Se proponen muestras de la zona fótica (p.e. subsuperficie, parte media y límite inferior) para el fitoplancton y de esta misma zona o de toda la columna de agua para el zooplancton.
Ficoperifiton
Muestreo en, al menos, 10 sustratos sumergidos, o de la interfase agua-aire (preferiblemente fijos en el área de muestreo), mediante remoción con cepillo, utilizando cuadrantes de área establecida (p.e. 10 cm ²).
Macroinvertebrados asociados a macrófitas
En área litoral con presencia de macrófitas acuáticas, en un cuadrante de 1 m ² de dichas plantas (preferiblemente sobre las dominantes o de mayor cobertura). Recolección mediante remoción con red triangular y estrujamiento manual.
Macroinvertebrados bentónicos
En un transecto entre el área litoral y el área limnética, se realiza el muestreo en tres puntos. La recolección se efectúa mediante draga tipo Eckman. Debido a la necesidad de recolectar muestras para análisis de laboratorio de los grupos de hidrobiota hasta aquí considerados, se debe tener en cuenta durante el muestreo la debida rotulación de los recipientes o empaques necesarios para su embalaje y transporte, así como la fijación y/o preservación de las muestras, utilizando soluciones o reactivos apropiados para cada grupo (p.e. lugol o formalina para los grupos de algas, formalina o solución transeau para el zooplancton y alcohol al 70% y 90% para los macroinvertebrados asociados y bentónicos, respectivamente).
Macrófitas acuáticas
Identificación taxonómica y estimación del porcentaje de cobertura de las especies de macrófitas, mediante observación directa, en un transecto perpendicular a la orilla, conformado

Síntesis de los métodos de campo propuestos para el compartimiento de Biodiversidad por 10 cuadrantes de 1 m² (desde la zona limnética hasta la orilla). Modificado de Ramos et al., (2004).
Vegetación inundable Se utiliza la información de campo recolectada en las parcelas para la estimación de biomasa y contenidos de carbono. Para el análisis de la estructura vertical se sugiere seguir los planteamientos de (Rangel-Ch. & Lozano, Un perfil de vegetación entre La Plata (Huila) y el volcán de Puracé, 1986) que contempla las categorías: Arbóreo inferior (Ai) 25-12 m, Arbolito o subarbóreo (Ar) 12-5 m, Arbustivo (ar) 5-1,5 m y herbáceo (h) 1,5-0,25 m y estimar la cobertura relativa. Para el análisis de la estructura horizontal se puede determinar el área basal y clases diamétricas para cada sitio de muestreo.
Peces Se propone realizar las faenas de pesca mediante artes pasivas (trasmallos: 2 horas al amanecer y 2 en la tarde y nasas y anzuelos: 14 horas que comprendan momentos de luz y oscuridad) y activas (chiles y atarrayas: 30 lances cada uno en un radio aproximado de 300 m). Además, se debe realizar la medición de la longitud estándar (LE), del peso total y tomar el registro fotográfico de todos los individuos y luego liberarlos* (para lo cual, los peces deben mantenerse en recipientes dotados de sistemas de aireación). *En caso de no lograr la determinación taxonómica en campo, se aplicará un protocolo de sacrificio y fijación para su posterior revisión en laboratorio, siguiendo las recomendaciones de Maldonado-Ocampo et. al. (2005).
Aves Detección visual y auditiva mediante recorridos en transectos de longitud variable (dependiendo del tamaño de la cobertura y las condiciones de accesibilidad), utilizando binoculares y grabadora. Registro fotográfico de las especies. Los registros se realizan en las horas de mayor actividad de las aves.
Anfibios y reptiles Transectos de búsqueda libre intensiva por encuentro visual durante siete (7) horas al día (Lovich et al., 2012; McDiarmid et al., 2012 y Heyer et al., 2014): muestreos diurnos de 15:00 a 18:30 centrados principalmente en la exploración visual de los microhábitats disponibles y nocturnos de 18:30 a 22:00 consistentes en la exploración visual del suelo y sobre la vegetación y en registros auditivos. Los transectos se pueden complementar con trampas no letales para tortugas semiacuáticas.
Mamíferos Entre las metodologías planteadas se incluyen fototrampeo, trampeo en redes de niebla y recorridos libres de observación directa y de indicios (huellas, rastros, heces, pelos y rasguños). Además, de manera complementaria, grabadoras para paisaje sonoro. Se recomienda el uso de técnicas no invasivas; es decir, aquellas que reducen el contacto con los animales, las cuales permiten obtener información detallada sobre comportamientos, hábitos, periodos de actividad; entre otros.

Síntesis de los métodos de campo propuestos para el compartimiento de Biodiversidad

Producción primaria

Mediante el método del oxígeno (Gaarder y Gran, 1927), empleando botellas claras para simular la actividad fotosintética y oscuras para simular la respiración acuática. Preferiblemente en la zona fótica y, según su profundidad, en una o hasta tres profundidades para la incubación. Periodo de incubación de dos (2) horas.

Fuente: elaboración propia (2024).



Fitoplancton



Zooplankton



Ficoperifiton



Macroinvertebrados asociados



Macro. bentónicos



Macrófitas



Peces





Figura 41. Ejemplo de algunos de los métodos de campo propuestos para los grupos y variables biológicos. Fotografías: equipo biodiversidad. Fuente: elaboración propia (2024).

ETAPA DE ANÁLISIS

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO PARA LOS COMPARTIMIENTOS DE BIOMASA Y MOM

Estimación de biomasa por método directo (cosecha de material)

Entre las submuestras colectadas en campo de los depósitos de biomasa aérea, radicular y mantillo para cada componente o tipo de vegetación, una de ellas se seca en horno a 60°C, entre 24 y 72 horas, hasta obtener un peso constante. Para obtener la biomasa del componente, el valor constante de peso seco se multiplica por el factor de conversión de carbono que, para este protocolo, se recomienda en 0,29 (valor determinado para herbáceas y hojarasca en la ventana piloto efectuada para los humedales del Magdalena medio y bajo).

$$BS = (PSm/PHm) \times PH$$

Donde:

BS: biomasa seca (BNAA) del material cosechado en campo (kg)

PSm: peso seco de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg).

PHm: peso húmedo de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg).

PH: peso húmedo del material cosechado en campo.

Estimación de biomasa por método directo mediante ecuaciones alométricas

Se aconseja incluir en el monitoreo de la vegetación arbórea, además del DAP, la altura de cada individuo, adicionalmente, a partir del inventario de vegetación, determinar la densidad de la madera a nivel de especie o género; para este protocolo se recomienda utilizar la base de datos de densidad de madera de árboles del neotrópico de (Chave et al., 2006). Teniendo en cuenta estas premisas, de la Tabla 37, las ecuaciones alométricas propuestas por (Chave et al., 2014), Álvarez et al., 2012) (Chave, y otros, 2015), (Álvarez, y otros, 2012), cobran relevancia para el presente protocolo. Adicionalmente, estos modelos son particularmente importantes por dos razones: 1) la zona de proveniencia, ya que la primera ecuación se desarrolló para la zona de vida tropical y la segunda para la zona tropical húmeda de Colombia y 2) la zona para la cual se desarrolló el modelo, pues de acuerdo con (Brahma et al., 2021), la producción de la biomasa depende de factores como la ubicación y las características edáficas, entre otros.

Tabla 37. Modelos alométricos generales a considerar para la estimación de biomasa área de árboles y palmas de humedales del Magdalena medio y bajo.

Referencia	Hábito	Ecuación biomasa aérea	Procedencia	Variables que considera
Chave et al., (2015)	Árbol	$BA=0.0673 \times ((\rho D^2) \times H)^{0.976}$	Tropical	DAP (D), densidad de madera (ρ), altura total (H)
Álvarez et al., (2012)		$B=\exp(2.406-1.289 \times \ln(D)+1.169 \times (\ln(D))^2-0.122(\ln(D))^3+0.445\ln(\rho))$	Tropical húmedo. Colombia	DAP (D), densidad de madera (ρ)
Hughes et al., (1999)	Palmas	$B=(\exp(3.627+0.5768\ln(H \times D^2))) \times 1.02/10^6$	Palmas México	DAP (D), altura total (H)

Fuente: tomado de Chave et al., (2015), Álvarez et al., (2012) y Hughes et al., (1999).

Al igual que con la biomasa aérea, para la biomasa subterránea o radicular (Tabla 38) se emplea una estimación basada en la relación de variables de crecimiento como el DAP y la biomasa aérea. En este caso, cobra relevancia principalmente el modelo propuesto por Cairns et al., 1997, que es el recomendado por autores como (Kauffman, Donato, & Adame, 2013) y por el IPCC.

Tabla 38. Ecuaciones alométricas generales para estimación de biomasa subterránea.

Hábito	Ecuación biomasa subterránea	Variables	Localidad	Fuente
--------	------------------------------	-----------	-----------	--------

Árbol	$BS=0.489 BA^{0.890}$	BA	Bosque tropical. Pantropical	Cairns et al., 1997. Citado en Kauffman et al 2013
Árbol	$BS= 0.064 \times D^{2.252}$	DAP (D)	Bosques pantanosos. Sumatra (Indonesia)	Suwarna et al., 2012. Citado en Kauffman et al 2013
Árbol	$BS= 0,151 \times D1,899$	DAP (D)	Colombia San Nicolás (zonas altas, cordillera oriental)	Buitrago et al., 2003. Citado en Kauffman et al 2013

Fuente: elaboración propia (2024).

Sumado a lo anterior, vale la pena resaltar otros aspectos mencionados por (Brahma et al., 2021), quienes aseveran que también es importante considerar los tipos de vegetación y la composición de especies. En este sentido, cobra relevancia el empleo de ecuaciones alométricas especie (o género) específicas. Para esto, se debe recopilar información sobre ecuaciones alométricas, teniendo en cuenta el inventario de especies forestales registrado en el humedal objeto de estudio. Cuando no se encuentren modelos para la especie en particular, se pueden considerar modelos a nivel de género o familia, dependiendo de los recursos económicos y el tiempo disponibles para el proyecto.

Estimación de biomasa muerta (MOM)

Para estimar la biomasa muerta (MOM) se emplea la ecuación:

$$BM = (PSMOMm/PHMOMm) \times PHMOM$$

Donde:

BM: es la biomasa de la materia orgánica muerta cosechada en campo (kg)

PSMOMm: peso seco de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg).

PHMOMm: peso húmedo de la muestra llevada al laboratorio para determinar el contenido de humedad (kg).

PHMOM: peso húmedo del material cosechado en campo.

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO POR COMPONENTE PARA EL COMPARTIMIENTO DE BIOMASA Y MOM

Para determinar el carbono orgánico de la biomasa de cada uno de los depósitos definidos con anterioridad, en primer lugar, se multiplica la biomasa de cada componente por el factor de conversión de carbono correspondiente (Proclima, 2021). Si se tienen resultados de laboratorio por el método de Walkley-Black, se debe utilizar ese factor.

Según (Cisneros-De la Cruz et al., 2021), el factor representa la fracción de carbono orgánico contenido en la biomasa de cada componente. Para este protocolo se considera el factor **0,47** propuesto por (Proclima, 2021) para la cobertura tipo bosque (y estrato arbustivo). Adicionalmente, el factor **0,29** para la cobertura tipo no bosque (estrato herbáceo) y materia orgánica muerta (hojarasca); valor que fue obtenido por medio del método de Walkley-Black en la ventana de validación realizada en el Complejo Cenagoso Zapatosa.

El carbono por componente de la biomasa (kg C/m²) se estima empleando las siguientes ecuaciones:

Cobertura tipo bosque:

$$C_{bos} = [Biomasa\ total\ de\ la\ parcela \times (0.47)] / \text{Área de la parcela (m}^2\text{)}.$$

Cobertura tipo no bosque:

$$C_{no\ bos} = [Biomasa\ promedio\ del\ componente \times (0.29)] / \text{Área de la subparcela (m}^2\text{)}$$

Materia orgánica muerta:

$$C_{MOM} = [MOM\ promedio\ del\ componente \times (0.29)] / \text{Área de la subparcela (m}^2\text{)}$$

De acuerdo con (Cisneros-De la Cruz, y otros, 2021), el análisis por almacén o componente permite evaluar el aporte de carbono de cada uno y su relación con diferentes procesos ecológicos en el ecosistema (Figura 42).

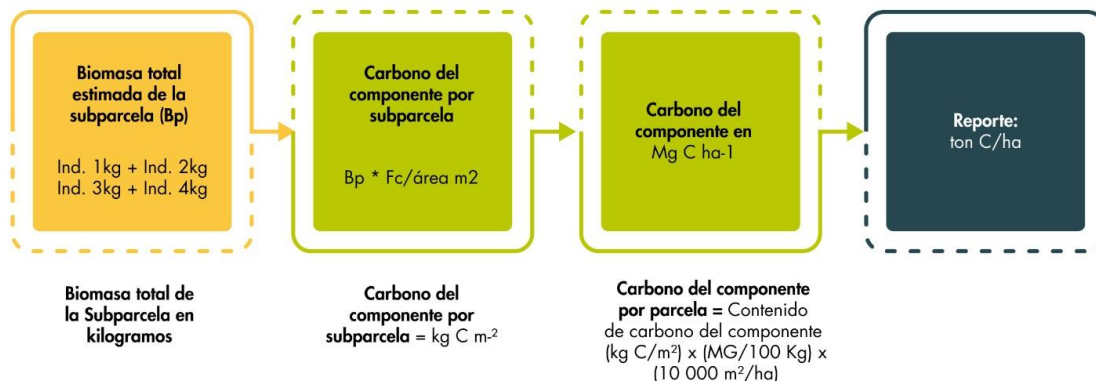


Figura 42. Proceso para la estimación de carbono orgánico para los compartimientos de biomasa y MOM. Fuente: elaboración propia (2024).

Estimación del contenido de carbono de los sitios de muestreo

El carbono total contenido en la biomasa viva y muerta del sitio de muestreo se estima sumando el contenido de carbono de cada componente (cobertura tipo bosque, tipo no bosque y materia orgánica muerta). En primer lugar, es necesario convertir el contenido de carbono de cada componente para el tamaño de la parcela a unidades empleadas para la evaluación de existencias de carbono (MgC/ha) y (ton/ha). El contenido de carbono total se estima empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Componente vegetal del sumidero de carbono (MgC/ha)} = \text{Contenido de carbono del componente (kg C/m}^2\text{)} \times (\text{Mg/1000 kg}) \times (10\,000 \text{ m}^2/\text{ha}).$$

Adicionalmente, es necesario calcular la desviación estándar para determinar que tanto se aproximan los datos promedio (Howard et al., 2019). Teniendo en cuenta las recomendaciones de (Yepes et al., 2011), el reporte se entrega en toneladas por ha (ton/ha), teniendo en cuenta la cobertura de cada estrato definido, en cuyo caso se reportan los valores promedio y el error estándar (Tabla 39).

Tabla 39. Ejemplo de reporte de contenidos de carbono de la cobertura por sitio de muestreo (estrato).

Cobertura	tonC/ha		
Cultivos	27,34	±	6,41
Forestal	66,33	±	16,59
Pastizal	5,00	±	4,66
OVL	31,08	±	16,88
Humedal	18,7	±	9,48

Fuente: elaboración propia (2024).

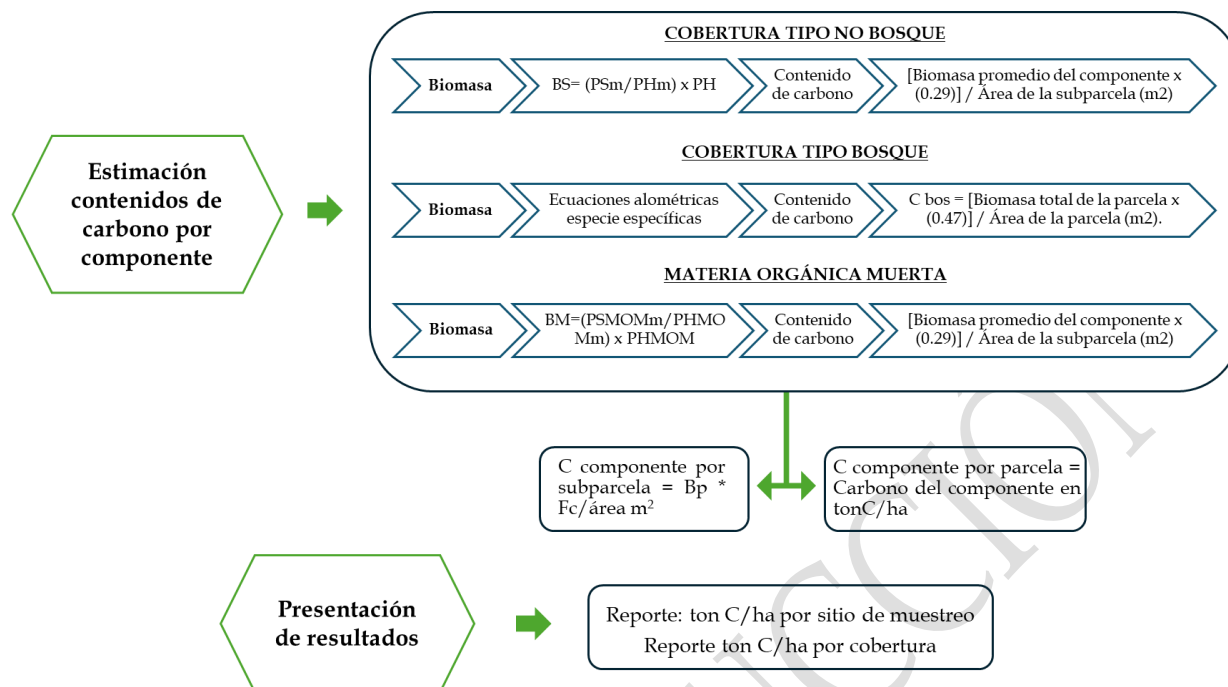


Figura 43. Procedimiento detallado para la estimación de biomasa y contenidos de carbono de cada compartimiento (biomasa y MOM). Fuente: elaboración propia (2024)

Carbono total del área de proyecto para el compartimiento de Biomasa y MOM

En primer lugar, se debe estimar el carbono de cada sitio de muestreo y multiplicarlo por el área del estrato:

$$\text{Carbono vegetal en una zona (tonC/ha)} \times \text{Área del estrato (ha)}.$$

El carbono total en el área de estudio se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Carbono total en el área del proyecto (tonC)} = \text{Estimación del carbono vegetal en sitio de muestreo 1 (tonC)} + \text{Estimación del carbono vegetal en sitio de muestreo 2 (tonC)} + \text{Estimación del carbono vegetal en sitio de muestreo (tonC)} + \dots$$

Finalmente, es necesario presentar la variabilidad o el error asociado a las mediciones, para lo cual se debe calcular la incertidumbre de los datos.

Conversión de contenidos de carbono a CO₂ equivalente

Los valores de contenido de carbono para los sitios de muestreo del área del proyecto (referidos al estado sólido), deben convertirse para poder utilizar el dato como factor de emisión (estado gaseoso). En este caso, el contenido de carbono obtenido en tC/ha se

transforma a tCO₂/ha, multiplicando el primer valor por (44/12) que corresponde a la relación de peso molar entre el CO₂ y el carbono (C).

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO PARA EL COMPARTIMIENTO DE SUELOS Y SEDIMENTOS

Luego de recopilar los resultados de análisis de laboratorio, junto con los datos recolectados en campo, se realiza el análisis de la información, debidamente organizada en bases de datos. A partir de los datos de densidad aparente y teniendo como referencia la profundidad de muestreo, se determina el contenido de Carbono orgánico del suelo a partir de la siguiente ecuación:

$$RCOS = Den_Apa * Prof * COS$$

Donde:

RCOS: Reserva de Carbono orgánico del suelo (t/ha)

Den_Apa: Densidad aparente (g/cc)

Prof: Profundidad de muestreo - horizonte (cm)

COS: Contenido de carbono orgánico del suelo (%)

De acuerdo con la interpretación del contenido de carbono en suelos (IGAC), se propone el resultado de los análisis en el siguiente rango de proporciones:

COS (%)	Interpretación
< 1,2	Bajo
1,2 - 2,2	Medio
> 2,2	Alto

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE BIODIVERSIDAD

Del mismo modo que el planteamiento realizado en la etapa de muestreo, los métodos y literatura propuestos para el análisis corresponden a los utilizados en los pilotos de validación de este protocolo y se deben considerar como opciones científicamente aprobadas y actualizadas, pero no condicionales para el desarrollo de proyectos con estos objetivos. Así mismo, se presentan en el orden de los niveles propuestos para las variables. En todos los casos, se sugiere principalmente el uso de claves, bases de datos y literatura especializada, actualizada y asociada con organismos tropicales o neotropicales.

Composición y estructura de los grupos biológicos

Para la identificación taxonómica de los organismos, tendiente al establecimiento de la composición:

- ✦ Fitoplancton y Ficoperifiton: Bicudo y Menezes (2006, 2017), Guiry y Guiry (2024), Taylor et al., (2010).
- ✦ Zooplancton: De Smet y Pourriot (1997), Elmoor-Loureiro et al., (2004), Koste y Shiel (1989a, 1989b, 1989c), Koste (1978), Kotov (2013), Nogrady et al., (1993 y 1995), Nogrady y Segers (2002), Paggi y Paggi (1995), Perbiche-Neves et al., (2015), Reid (1985), Ruttner-Kolisko (1974), Segers (1995a, 1995b, 2002, 2003, 2007), Sudzuki y Haberman (1998), Wallace et al., (2006).
- ✦ Macroinvertebrados acuáticos (asociados y bentónicos): Álvarez (2005), Aristizábal-García (2017), Domínguez y Fernández (2009), Hamada et al., (2014), Linares et al., (2018), McCafferty (1981), Posada-García y Roldán-Pérez (2003), Springer et al., (2010).
- ✦ Macrófitas acuáticas: APG (2016), Bernal et al., (2019), ColPlantA (2022), Cook (1990), Crow (2002), Madriñán et al., (2017), Posada-García y López-Muñoz (2011), Rodulio (1999), Tropicos.org (2022), Velásquez (1994).
- ✦ Peces: DoNascimento et al., (2017), García-Alzate et al., (2020), Herrera-Collazos et al., (2020), Terán et al., (2020), García-Alzate y Morales (2022), Fricke et al., (2023).
- ✦ Aves: Remsen et al., (2023).
- ✦ Herpetofauna (anfibios y reptiles): Frost (2023), Uetz (2023), principalmente. Otras: Acevedo-Rincón et al., (2016), Arroyo et al., (2019), Carvajal-Cogollo (2019), Carvajal-Cogollo et al., (2012), Dubois (2017), Escalona-Sulbarán et al., (2021), Medina-Rangel (2007, 2009), Rangel-Ch. (2008), Rangel-Ch. et al. (2012).
- ✦ Mamíferos: Chame (2003), Defler (2003), Morales et al., (2004), Solari et al., (2013), Tirira (2008).

En cuanto a la estructura, para todos los grupos se propone utilizar, al menos, las siguientes métricas:

- ✦ Densidad, abundancia o porcentaje de cobertura (según el grupo).
- ✦ Descriptores ecológicos: riqueza específica, índice de diversidad de Shannon, índice de dominancia de Simpson, índice de equidad o equitatividad de Pielou; entre otros.

Principales aspectos de la ecología, aspectos biogeográficos, categorías de conservación y hábitos migratorios de las especies

Además de la literatura anterior, que en su mayoría contiene aspectos de la ecología de las especies (incluyendo los hábitos migratorios, cuando aplican), se recomiendan para las demás variables:

- ✦ Aspectos biogeográficos: para todos los grupos GBIF (2023) y Resolución 1912 (2017). Específicamente, para las macrófitas, se sugieren también Cortés-Castillo et al. (2022) y Madriñán et al., (2017); para los peces, Zapata y Usma (2013), para las aves Chaparro-Herrera et al., (2012) y para los anfibios y/o reptiles AmphibiaWeb (2023), Morales-Betancourt et al., (2015) y Rueda-Almonacid et al., (2004).
- ✦ Categorías de conservación: para todos los grupos CITES (2023), Resolución 1912 (2017) y UICN (2023). Adicionalmente, para las macrófitas, Bernal et al., (2019) y CABI (2023), para los peces Mojica et al., (2012), para las aves Renjifo et al., (2016) y para la herpetofauna, las mencionadas en el párrafo anterior.

Aspectos comerciales y/o culturales de las especies

Sobre esta variable, además de indagar en el área del proyecto principalmente, se recomienda consultar CITES (2023) para los grupos de fauna, Bernal et al., (2019) y CABI (2023) para las **macrófitas** y López-Casas et al., (2020), Resolución 1924 (2015), Rojas-Ceballes et al. (2013) y SEPEC (2023) para los **peces**.

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA Y/O EL CONTENIDO DE CARBONO PARA EL COMPARTIMIENTO DE BIODIVERSIDAD

Para este compartimiento, las estimaciones de biomasa y/o contenidos de carbono se proponen específicamente para los grupos de hidrobiota, excepto para las macrófitas acuáticas, consideradas en el compartimiento de Biomasa y MOM.

Vale la pena mencionar que, dado que el cálculo de la biomasa de los organismos microscópicos (fitoplancton, ficoperifiton y zooplancton), así como de los macroinvertebrados, conlleva un extenso y detallado trabajo de laboratorio (Figura 44), esta metodología se plantea principalmente para una muestra representativa (por ejemplo, 30 individuos de cada taxón) de los organismos dominantes, los más abundantes (por sitio de monitoreo) y los de mayor tamaño dentro de cada uno de dichos ensambles.

Cabe anotar que la selección de los organismos dominantes puede efectuarse por diferentes métodos; sin embargo, en este protocolo, se propone la prueba de Olmstead-Tukey (Sokal y Rohlf, 1981), que considera tanto la abundancia, como la frecuencia de los organismos.

También es importante señalar que, en los pilotos de validación de esta propuesta metodológica, la estimación de la biomasa considerando los organismos indicados (dominantes, de mayor tamaño y más abundantes) correspondió, en todos los casos, a más del 50% de la densidad calculada y, en la mayoría de ellos, a más del 80%; por lo que se considera una valoración muy aproximada a la biomasa total de los ensambles. Asimismo, se debe indicar que, para los organismos microscópicos, las estimaciones se realizaron mediante fotografías.

A continuación, se especifica el procedimiento para la estimación de la biomasa de cada grupo de hidrobiota. Además, se indican algunas de las referencias bibliográficas en las que se encuentran métodos detallados para los cálculos de los grupos que así lo requieren y se plantea el uso de un programa de morfometría geométrica de uso libre. Sin embargo, es necesario aclarar que existen diversas metodologías y programas ampliamente usados y validados, que ofrecen resultados similares, por lo que los aquí propuestos no constituyen condicionamientos para las estimaciones.

Fitoplancton y Ficoperifiton

- + Biovolumen celular medio para cada organismo (BvCm). Para efectuar las mediciones necesarias se recomienda el programa de morfometría geométrica TPSdig2 y para la estimación del biovolumen, se propone el uso de las fórmulas contenidas en Edler (1979), Hillebrand et al., (1999) y Mullin et al., (1966); según la semejanza de las algas o partes de ellas con formas geométricas.
- + Biovolumen medio por individuo (BvmI). Para los organismos coloniales y cenobiales, se obtiene multiplicando el BvCm por el número medio de células de las colonias o cenobios (Strathmann, 1967).
- + Biomasa media por individuo (BmI): $BvmI \times \text{Densidad de cada individuo}$.
- + Biomasa por sector o zona de muestreo: ΣBmI sumatoria de la biomasa media de los organismos registrados en el área especificada para el monitoreo.
- + Los valores de biomasa de estos ensambles, si se siguen los métodos propuestos para su muestreo y cuantificación de la densidad, se reportan en $\mu m^3/ml$ para el

fitoplancton y en $\mu\text{m}^3/\text{cm}^2$ para el ficoperifiton o sus equivalentes, si se requieren unidades mayores.

Zooplankton

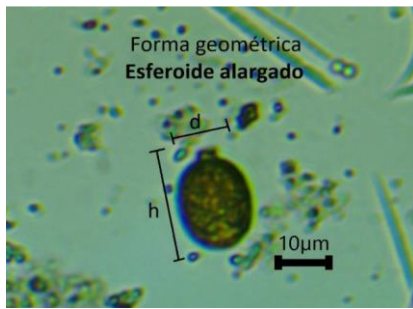
- └ Biovolumen por especie. Según Ruttner-Kolisko (1977), se calcula mediante fórmulas específicas para las formas geométricas más cercanas a la forma de cada especie y siguiendo las especificaciones de Bottrell et al., (1976) y McCauley (1984).
- └ Biomasa en peso húmedo. Se calcula según Bottrell et al., (1976).
- └ Biomasa en peso seco. Se estima según Dumont et al., (1975) y Pace y Orcutt (1981).
- └ Biomasa por sitio o zona de monitoreo. Corresponde a la sumatoria de la biomasa de las especies registradas en el área especificada para el monitoreo.
- └ Los valores de biomasa del zooplankton, siguiendo los métodos de muestreo y cuantificación propuestos anteriormente, se reportan en g/L o sus equivalentes, si se requieren unidades mayores.

Macroinvertebrados acuáticos (asociados a vegetación y bentónicos)

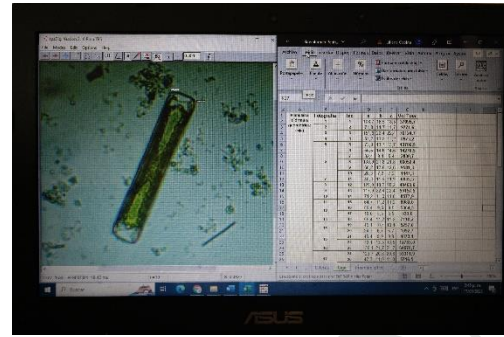
- └ Según Wetzel y Likens (2000), este procedimiento se puede efectuar mediante dos métodos. Se aclara que ambos métodos pueden combinarse, según los organismos que conformen los ensambles:
 - Directo por peso seco: secado y pesaje de los organismos (separados por taxón).
 - Indirecto por relaciones de longitud peso, siguiendo las ecuaciones de Smock (1980).
- └ Los valores de biomasa de los macroinvertebrados se reportan en g/m² o sus equivalentes, si se requieren unidades mayores.

Peces

- └ La biomasa por especie corresponde al peso total de los ejemplares capturados y por sitio o zona de monitoreo, a la sumatoria de las biomásas de los peces que conforman los ensambles.
- └ Estos valores se reportan en gramos (g) o sus unidades equivalentes.



Cálculo de dimensiones para estimar el volumen de los organismos según las formas geométricas



Estimación del biovolumen de los organismos usando TPSdig2



Separación de organismos por taxón



Secado al aire, previo al secado en horno



Pesaje

Figura 44. Ejemplo de algunos de los procedimientos necesarios para la estimación de la biomasa de algas (fitoplancton y ficoperifiton) y macroinvertebrados. Fotografía: Liliana Marcela Ospina-Calle y José Andrés Posada-García. Fuente: elaboración propia (2024).

Para el caso específico de las algas (fitoplancton y ficoperifiton) y del zooplancton, también se propone realizar la estimación del contenido de carbono, según los siguientes cálculos:

Fitoplancton y Ficoperifiton

- Según Menden-Deuer y Lessard (2000), el contenido de carbono celular (pgC/cel) corresponde a $0,288 \times V^{0,811}$ para las **diatomeas** y a $0,216 \times V^{0,939}$ para las algas **no diatomeas**; donde V es el volumen celular.

Zooplancton

Según Rossa et al., (2007), para los **rotíferos**, el contenido de carbono (µgC) corresponde al 48% del peso seco de los organismos y, de acuerdo con King & Greenwood (1992), para los **grupos de artrópodos**, dicho contenido corresponde al 44% de su peso seco.

INDICADORES AMBIENTALES

Los humedales por tratarse de ecosistemas transicionales en los que su dinámica respecto a la recepción de aguas de ecosistemas lóticos es constante, presentan procesos continuos de regeneración de la vegetación, cambios en las condiciones de humedad del suelo, así como muerte y descomposición de organismos de gran importancia para regular el ciclo del carbono. Adicionalmente, son ecosistemas sujetos a dinámicas constantes de transformación para el desarrollo de diversas actividades económicas; por esta razón, resulta indispensable adelantar actividades que permitan evaluar su estado y generar propuestas de manejo y uso sostenible. Una forma de hacerlo es la definición de indicadores ambientales que constituyen un “sistema de señales claras y oportunas sobre una dinámica o proceso ambiental” y facilita la priorización de procesos relevantes a tener en cuenta para la toma de decisiones (evaluación e intervención) (CEPAL, 2009). De acuerdo a lo anterior, en este protocolo se propone la definición de altos valores de conservación (AVC), como indicadores ambientales para la toma de decisiones en humedales del Magdalena medio y bajo.

Un Alto Valor de Conservación (AVC) es un valor biológico, ecológico, social o cultural excepcionalmente significativo o de importancia crítica. La identificación de zonas de AVC en los humedales del Magdalena medio y bajo mediante el establecimiento de indicadores que se representen geográficamente es una importante estrategia para identificar escenarios de adaptación y mitigación frente al cambio climático. Los AVC se dividen en:

- ✚ AVC 1. Diversidad de especies. Concentraciones de diversidad biológica que contengan especies endémicas o especies raras, amenazadas o en peligro de extinción, y que son de importancia significativa a escala global, regional o nacional.
- ✚ AVC 2. Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje. Ecosistemas y mosaicos de ecosistemas de gran tamaño a escala de paisaje e importantes a escala global, regional o nacional, y que contienen poblaciones viables de la gran mayoría de las especies presentes de manera natural bajo patrones naturales de distribución y abundancia.
- ✚ AVC 3. Ecosistemas y hábitats. Ecosistemas, hábitats o refugios raros, amenazados o en peligro.

- ✦ AVC 4 Servicios ecosistémicos. Servicios básicos del ecosistema en situaciones críticas, como la protección de áreas de captación de agua y el control de la erosión de suelos y laderas vulnerables.
- ✦ AVC 5 Necesidades de las comunidades. Sitios y recursos fundamentales para satisfacer las necesidades básicas de las comunidades locales o grupos indígenas (para sus medios de vida, la salud, la nutrición, el agua, etc.), identificados mediante el diálogo con dichas comunidades o pueblos indígenas.
- ✦ AVC 6 Valores culturales. Sitios, recursos, hábitats y paisajes significativos por razones culturales, históricas o arqueológicas a escala global o nacional, o de importancia cultural, ecológica, económica, o religiosa o sagrada crítica para la cultura tradicional de las comunidades locales o pueblos indígenas.

Específicamente, para sistemas de agua dulce o humedales continentales como los que conforman los presentes para el Magdalena medio y bajo, la HCVRN (2013) proporciona algunos detalles (términos clave, ejemplos, fuentes de datos y enfoque) para la identificación y aplicación de los AVC:

AVC 1. DIVERSIDAD DE ESPECIES

Para este caso se sugiere revisar, entre otros, las listas rojas globales y nacionales en las categorías “vulnerable” o superiores, las listas de especies endémicas a escala de país, bases de datos a nivel de país o locales (p.e. FishBase, Ecorregiones de Agua Dulce del Mundo – FEOW, WildFinder, BioFresh, WDPA, entre otras); los datos regionales de Birdlife International sobre rutas de vuelo y migración y la Convención sobre la Conservación de Especies Migratorias de Animales Silvestres. Además, la Base de Datos Mundial de Áreas Protegidas (WDPA en inglés) para la verificación de Sitios Ramsar, las listas de Áreas Clave para la Biodiversidad (ACB), los mapas locales y nacionales de planices de inundación, humedales estacionales, manantiales, etc. Asimismo, se recomienda el uso de fuentes de información locales, imágenes de satélite y la realización de estudios de campo, incluyendo entrevistas o encuestas a las comunidades.

Especies raras, amenazadas o en peligro (RAP).

- ✦ Presencia de áreas protegidas reconocidas designadas en su totalidad o en parte para la conservación de especies RAP o hábitats de agua dulce.

- ✚ Presencia de especies RAP que dependen de sistemas dulciacuícolas para la totalidad o una parte de su ciclo biológico (varias especies RAP, una población considerable de una especie RAP, refugios).
- ✚ Sistemas de agua dulce sin protección identificados como ACB, IBA (Áreas Importantes para Aves) o equivalentes.

Especies endémicas de agua dulce.

- ✚ Presencia de especies endémicas (a escala nacional o de ecorregión) o especies de distribución restringida altamente dependientes de sistemas de agua dulce.
- ✚ Presencia de áreas protegidas reconocidas designadas en su totalidad o en parte para la conservación de especies endémicas o de agua dulce de distribución restringida.

Áreas de uso temporal crítico, incluyendo refugios de corriente o térmicos, o áreas de desove o reproducción, cría, migración, alimentación o hibernación.

- ✚ Rutas de migración o dispersión críticas para peces, aves acuáticas, especies de mamíferos, anfibios o reptiles dependientes de sistemas de agua dulce, o invertebrados acuáticos (p.e. llanuras de inundación, estanques profundos, corredores del cauce de ríos).
- ✚ Presencia de áreas protegidas reconocidas designadas en su totalidad o en parte para la conservación de sistemas de agua dulce de uso crítico en ciertos periodos.

AVC 2. ECOSISTEMAS Y MOSAICOS A ESCALA DE PAISAJE

Sistemas de agua dulce con patrones hídricos intactos.

- ✚ Lagos y humedales con periodos hídricos naturales.

AVC 3. ECOSISTEMAS Y HÁBITATS

- ✚ Ecosistemas, hábitats o refugios raros, amenazados o en peligro.

AVC 4. SERVICIOS DEL ECOSISTEMA BÁSICOS EN SITUACIONES CRÍTICAS

Cuencas hidrográficas o de captación críticas para la gestión o el mantenimiento de eventos extremos relacionados con el caudal (p.e. inundaciones o sequías).

- └ Llanuras de inundación y otros humedales.

Franjas de amortiguamiento con vegetación de ribera o llanuras de inundación intactas.

- └ Llanuras de inundación sin diques.

AVC 5. NECESIDADES BÁSICAS DE COMUNIDADES LOCALES

Sitios y recursos fundamentales para satisfacer las necesidades básicas de las comunidades locales.

- └ Poblaciones de animales o plantas de agua dulce de las que dependen las comunidades locales.

METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR ZONAS CON AVC EN HUMEDALES DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO

La metodología presenta los lineamientos para la identificación de los criterios, de acuerdo con cinco AVC, a partir de las condiciones analizadas para el área de interés que corresponda a un humedal, de manera que a futuro pueda ser incorporada en la planificación, implementación y evaluación del estado de los humedales del país, teniendo en cuenta la alta diversidad cultural, social, biológica y ecológica.

Para la zonificación se propone como método la evaluación multicriterio (EMC), mediante un Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), que permita realizar la valoración de los indicadores planteados, de manera que se obtenga un resultado mediante procesos estadísticos adecuados para ser aplicados con las herramientas SIG. Esto incluye el alistamiento de los insumos geográficos, la reclasificación de valores y la superposición ponderada de los insumos cartográficos primarios y secundarios para la delimitación de las zonas con AVC propuestos desde los compartimientos de biodiversidad, biomasa y suelos, asignando ponderaciones calculadas con el método de Saaty (1980) del PAJ.

Fase 1. Identificación de los AVC del área de interés

Se identifican las categorías que aplican de acuerdo con High Conservation Value Resource Network (Brown & Senior, 2014). Esta red de expertos ayuda a los usuarios a identificar, gestionar y monitorear diferentes AVC en sitios de desarrollo actuales o

potenciales, presentando herramientas aplicables globalmente que funcionan a diferentes escalas (paisajes o jurisdicciones, granjas, plantaciones, unidades de gestión, pequeñas propiedades), ecosistemas (desde bosques hasta pastizales y sistemas acuáticos) y sistemas productivos (agricultura, silvicultura, acuicultura; entre otros).

Al identificar los criterios se procede con el planteamiento de indicadores por cada uno, teniendo en cuenta que se obtenga una respuesta según su definición. Con el listado de indicadores propuestos por los profesionales, se procede con la revisión de información y generación de insumos geográficos para la zonificación, como se describe en la fase 2.

Fase 2 – Revisión y generación de insumos geográficos y cartográficos del área de interés

La segunda fase incluye la revisión de información espacial existente para el área de estudio, la cual puede variar acorde con la escala de trabajo definida según el detalle del resultado esperado. Se selecciona la información de tipo primaria y secundaria, se realiza una priorización de las variables y el respectivo acondicionamiento cartográfico de la información disponible, teniendo en cuenta que los datos geográficos pueden ser de tipo vectorial y ráster. Para aquellos casos en que la información geográfica no está disponible, se plantea su generación dentro de los alcances del protocolo en formato vectorial o ráster para su representación espacial de acuerdo con los recursos y el tiempo necesarios.

La revisión de la información geográfica de las variables espaciales establecidas para cada criterio de AVC, se realiza verificando los siguientes aspectos:

- + Tipo de formato: vectorial o ráster.
- + Calidad de la información geográfica en lo referente a escala, resolución y demás factores que permitan obtener resultados precisos para la zonificación.
- + Metodologías para la generación de insumos disponibles.
- + Tipo de información geográfica temática, necesaria para la definición de criterios e indicadores.

En esta fase es importante tener en cuenta que los insumos se encuentran a diferentes escalas cartográficas y se han generado para diferentes temporalidades, según los tiempos de generación cartográfica de las entidades productoras; sin embargo, debido a que en algunos casos es la única información con que se cuenta, se debe dejar explícita la descripción de cada insumo usado o generado para el proceso.

A pesar de esto, se recomienda contar con información espacial a una escala mayor (1:25.000 o menos) para que con la zonificación los resultados cuenten con más detalle. Uno de los procesos que se puede realizar para esto es, teniendo todas las capas geográficas de entrada, hacer un re-muestreo (resample) a un tamaño de píxel igual para todas las capas geográficas. Al contar con todas las capas geográficas de los indicadores, se procede a reclasificar los valores en una escala común de evaluación que abarque aspectos de adecuación, preferencia y riesgo para la zonificación. De esta manera, se busca uniformizar la clasificación.

Fase 3 – Evaluación multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ)

En la tercera fase se emplea la evaluación multicriterio (EMC) y se crea la matriz de comparación entre criterios. Para esto, se propone adoptar la metodología basada en el PAJ, donde se aplican procesos de decisiones multicriterio, cuyo uso permite solucionar problemas complejos que involucran diferentes variables o indicadores (Saaty, 2008), en este caso variables espaciales para la zonificación de AVC. Los criterios son seleccionados teniendo en cuenta los niveles jerárquicos del PAJ, recomendando que se involucre la escala de valoración de expertos (Fuenzalida Díaz et al., 2013).

El PAJ se basa en una jerarquía definida por niveles de importancia, donde se manejan relaciones de forma tal que nivel a nivel se planteen nodos para alcanzar el objetivo de la investigación. Los cinco niveles (Figura 45) se categorizan por jerarquía: el nivel (0) contiene la meta u objetivo de la investigación, el nivel (1) posee los criterios considerados para la zonificación de AVC, en el nivel (2) se encuentran los factores representados por los indicadores, en el nivel (3) se generan las alternativas y en el último nivel (4) se encuentran las decisiones.

Para cada uno de los niveles se realiza una revisión, verificación y validación, a través de una calificación, de acuerdo a la importancia propia de la zonificación de AVC en el área de trabajo definida, aplicando la matriz de comparación de juicio de decisión (Saaty, 2008). Para iniciar con la EMC, se debe crear el modelo jerárquico (Figura 45), compuesto por diferentes niveles (0-4), descritos a continuación, donde se plantean como factores las variables espaciales.

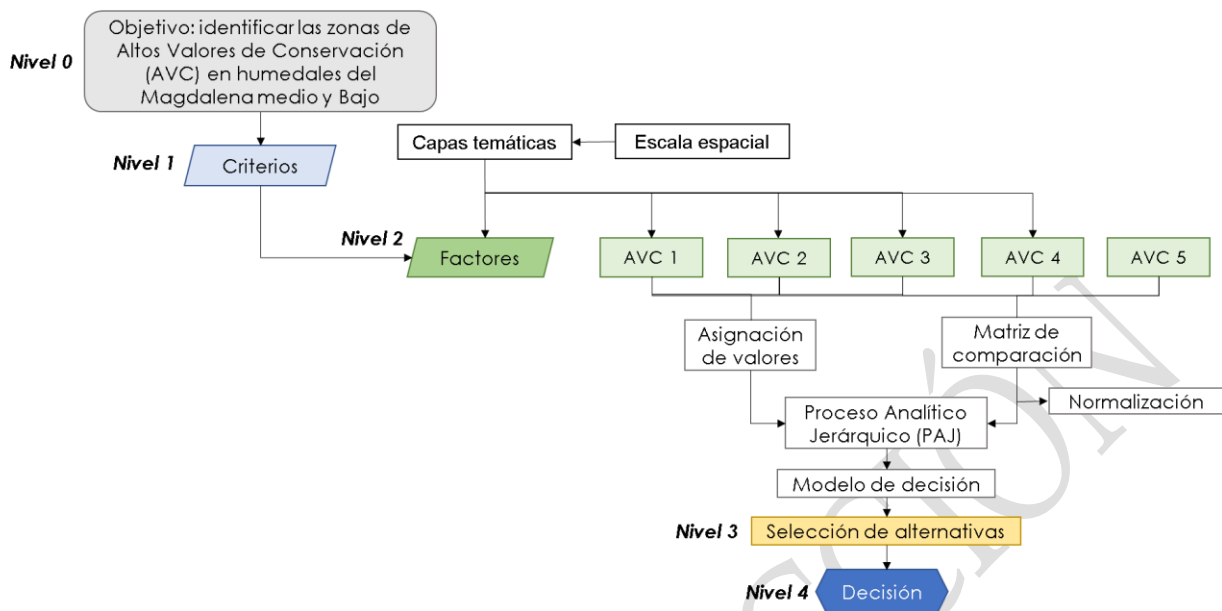


Figura 45. Modelo jerárquico diseñado para identificar zonas con Altos Valores de Conservación. Fuente: elaboración propia (2024).

Nivel 0 - objetivo de la Investigación

Generar los mapas de las zonas con Altos Valores de Conservación (AVC) mediante un proceso de evaluación multicriterio en el entorno de un Sistema de Información Geográfica.

Nivel 1 - criterios

En este caso son cinco criterios definidos para los AVC, considerados como puntos de referencia para la toma de decisiones, que son medidos o caracterizados de acuerdo con la importancia, y hacen parte del resultado final del proceso de EMC y de la puntuación otorgada a estos (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2006).

Nivel 2 - factores

Los factores están representados por los indicadores comprendidos dentro de cada AVC identificado. Dentro de este nivel se incluyen características que resaltan las capacidades de la biodiversidad, los ecosistemas, hábitats, coberturas terrestres y procesos ecológicos del Complejo Cenagoso de Zapatosa, y que son valorados en una escala jerárquica (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2006). En este nivel se realizan tres actividades principales:

- ✦ Asignación de valores: se hace la evaluación del modelo PAJ representado por juicios de valor obtenidos a partir de una escala de medida de números, haciendo comparaciones entre los criterios. En la Tabla 40 se presentan los valores principales del PAJ planteados por (Saaty, 2008) como escala fundamental de preferencia, de manera que la evaluación se haga por un grupo de expertos en la temática.

Tabla 40. Valores por intensidad de la escala del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) (Saaty, 2008).

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta e incuestionable
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	$a(ij)=1/a(ji)$	Cuando i tiene un valor respecto a j igual a un entero de los indicados arriba, entonces el valor de j respecto a i es igual a $1/a$.

- ✦ Generación de la matriz de comparación de criterios: se construye una matriz con filas y columnas en las que se diligencian los criterios, en este caso cinco criterios. Al tener la matriz se asignan los valores de acuerdo con la escala del 1 al 9 que indica la importancia de un criterio frente a otro; en la valoración participan los expertos, quienes asignan calificaciones de manera individual para luego llegar a un consenso final.

La valoración de un criterio frente a él mismo siempre será igual a 1. Respecto a la valoración inversa, se calcula dividiendo 1 entre el valor asignado en la primera evaluación; por ejemplo, si al criterio 'diversidad de especies' se le asigna una valoración de 7 frente al criterio 'ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje', al valor este último frente al primero, se le asigna un valor de $1/7$. Un ejemplo de la plantilla que se construye para la valoración se presenta en la Tabla 41.

Tabla 41. Ejemplo de matriz de comparación de criterios con la escala de valores del PAJ.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3	5	7	9
C2	1/3	1	5	3	3
C3	1/5	1/5	1	9	7
C4	1/7	1/3	1/9	1	5
C5	1/9	1/3	1/7	1/5	1

- Normalización de los valores: se estandarizan los valores para integrar todos los criterios o factores en un mismo método de evaluación, en donde se ejecute mediante una misma escala de comparación y elimine dispersión de la información identificada (Berumen S & Redondo F, 2007). De acuerdo con lo anterior, se aplica este proceso a la matriz de comparaciones. Para ello, el PAJ asigna el peso de cada uno de los criterios (W_i) y el índice de consistencia (C_i) de los juicios de valor entre pares de criterios (Saaty, 2008).

Peso (w_i): $W1 = (1 \cdot I1 / I2 \cdot I1 / I3 \cdot \dots I1 / In) 1/n$
 $W2 = (I2 / I1 \cdot 1 \cdot I2 / I3 \cdot \dots I2 / In) 1/n$
 $Wn = (In / I1 \cdot In / I2 \cdot \dots 1) 1/n$

Índice de consistencia: $C1 = W1/W$
 $C2 = W2/W$
 $Cn = Wn/W$

Es importante tener en cuenta que el PAJ puede tener debilidades al momento de analizar decisiones de tipo ambiental, como es el caso de la identificación de zonas de AVC, mediante el uso de paneles de expertos, por generar falta de consistencia (Benítez et al., 2011), lo cual puede ser resultado de falta de información o conocimiento al dar una valoración a cada criterio (Stein & Mizzi, 2007), falta de experiencia en la metodología de evaluación o mal interpretación de las instrucciones sobre el proceso (Noble, 2004).

Nivel 3 - alternativas

Hacen referencia a los resultados obtenidos luego de la valoración de criterios. Se identifican las alternativas que cumplan como propuestas factibles, que son la base primordial para alcanzar el objetivo general que es realizar la zonificación de los AVC, considerando características de cada indicador que se convierten en pros y contras para este proceso.

Nivel 4 - decisión

En este nivel se analiza el modelo, la emisión de juicios y evaluaciones que se generaron de la matriz de comparaciones. La emisión de juicios se basa en investigaciones científicas consultadas y, de acuerdo con las características propias del área de estudio, dicha evaluación se realiza usando combinaciones binarias entre pares frente a un tercer elemento, entre criterios, factores y alternativas.

Fase 4 - Superposición ponderada de capas geográficas para obtener el resultado de la zonificación.

Dado que en la presente metodología se establecen cinco criterios con diferente número de indicadores según los AVC identificados, primero se debe obtener un único archivo geográfico (vectorial o ráster) por cada criterio, de manera que la superposición final se haga a partir de cinco capas geográficas en formato ráster. Cabe mencionar que los valores de las capas de datos de entrada deben corresponder a un rango entre adecuado y no adecuado (por ejemplo, de 1 a 5), donde en la capa de idoneidad resultante, las áreas con valores altos son las más adecuadas para que se dé la actividad evaluada, que en este caso serían los AVC.

Después de clasificar las capas geográficas, se procede con el cruce de las capas geográficas de los criterios, mediante la herramienta de 'Unión'. Al tener la capa final con los atributos de los AVC se crea un nuevo campo en la tabla de atributos para luego, con la calculadora de campos, multiplicar los valores de celda de cada ráster de entrada por el peso de importancia (matriz de comparación de criterios); los pesos se representan en decimales dividiendo el valor del porcentaje por 100:

$$Suma\ ponderada = (C1 * P1) + (C2 * P2) + (C3 * P3) + (C4 * P4) + (C5 * P5)$$

Donde C_i es el valor de cada criterio,

P_i es la ponderación o peso de cada criterio.

Esta metodología es muy usada en las evaluaciones multicriterio, debido a que algunos criterios de elegibilidad son más importantes que otros, por lo cual es necesario comparar varios candidatos adecuados si cumplen con un conjunto de criterios de diferente importancia y con qué grado (Jabbar et al., 2019).



Herpetos del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fotografía: Alejandro Peña García

ESTRATÉGIA PARA LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

ESTRUCTURA DE BASE DE DATOS CARBONO EN HUMEDALES

Desde el inicio de la implementación de un proceso de levantamiento de información, es muy importante identificar y establecer la ruta para gestionar los datos que se van generando en cada proceso (premuestreo, muestreo y fase de análisis). Se sugiere estructurar una base de datos que permita acceder de forma ordenada a la información y que se pueda ir actualizando constantemente. Por ejemplo, para la validación de este protocolo la base de datos fue denominada **ProtoCarbonoCCZ** en PostgreSQL y se conforma de una estructura que permite el correcto flujo de la información, para garantizar la rapidez en el procesamiento, así como mantener los estándares de seguridad de la información.

La base de datos Carbono en humedales se alimenta de tres fuentes:

- ✦ Información secundaria que corresponde a los datos extraídos de la búsqueda de publicaciones (artículos científicos, libros, reportes de proyectos, etc.) que aportan información de estimaciones de carbono en humedales a nivel nacional e internacional para los compartimientos de carbono identificados en el proyecto.
- ✦ La información generada en los pilotos de validación del Protocolo de estimación de Carbono en humedales del Magdalena medio y bajo en la ventana de aproximación seleccionada.
- ✦ La información oficializada del país administrada en sistemas de información geográfica (SIG) que integra diversos tipos de datos, como la ubicación espacial organizada en capas de información que permite la visualización de los datos utilizando mapas y escenas 3D.

La base de datos está organizada en cuatro grandes componentes (Compartimiento Biomasa, Compartimiento Suelos y sedimentos, Compartimiento Biodiversidad y, por último, información de las Zonas de muestreo). Cada uno de estos componentes están conformados por una estructura de tablas relacionadas entre sí (Figura 46).

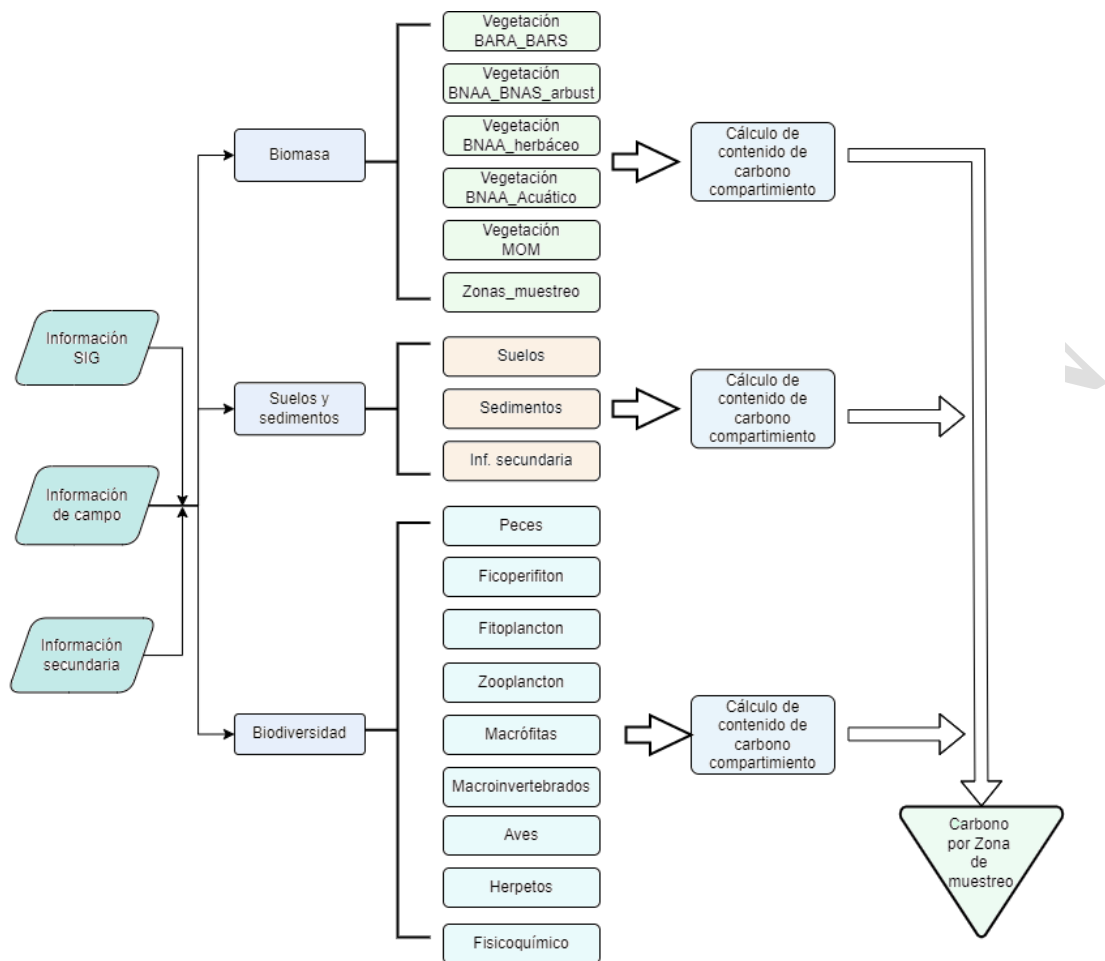


Figura 46. Propuesta de estructura de Base de Datos de Carbono en Humedales. Fuente: elaboración propia (2024).

PASOS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Partiendo de la colecta de información en campo, se siguen los siguientes pasos para la validación del dato:

- ✦ Inspección de datos: identificación de datos inconsistentes. Esto implica verificar valores faltantes, duplicados, valores atípicos, tipos de datos incorrectos y otros errores.
- ✦ Plan de limpieza de datos: después de identificar los problemas con los datos, se crea un plan sobre cómo abordarlos. Esto implica determinar cómo completar los valores faltantes, eliminar duplicados y manejar valores atípicos.
- ✦ Ejecución de limpieza de datos: ejecución del plan y limpiar los datos. En algunos casos se usan métodos estadísticos para imputar valores faltantes, eliminar duplicados y transformar los datos al formato correcto.

- ✦ Verificación de datos: con datos limpios, se verifica que los datos sean precisos y consistentes. Esto implica verificar errores y valores atípicos.



Figura 47. Pasos para el análisis estadístico de datos. Fuente: elaboración propia (2024).

Con esta revisión, se logra identificar inconsistencias en los datos en a) variables numéricas: inconsistencias con respecto a la escala de medición en la que fueron tomadas las variables y b) en variables categóricas, dado por la naturaleza de la variable, errores en la digitación de la información.

Luego de tener las matrices con los datos limpios se procede con el Análisis Exploratorio (EDA), para lo cual existen varias técnicas estadísticas y de visualización para explorar los datos y obtener información sobre características, tendencias y patrones de las variables incluidas en cada compartimiento. De esta forma, se busca detectar anomalías o valores atípicos e identificar cualquier relación o asociación entre variables.

Para realizar el proceso de limpieza de los datos colectados, se propone el uso del software R por medio de su interfaz RStudio. Las variables que presentan valores de NA representan a las variables categóricas, que por su naturaleza no pueden ser incluidas en los cálculos de valores mínimos (Min), media (Mean) y máximos (Max).

Con el uso del paquete “dplyr” en R, una herramienta ampliamente utilizada para la manipulación y transformación de los datos, se pueden realizar tareas como filtrar, resumir, organizar y agrupar marcos de datos típicas de la fase de limpieza de datos. El paquete “dplyr” sigue una gramática consistente y fácil de entender para la manipulación de datos, lo que le permite realizar operaciones complejas con código conciso y legible. Las funciones clave en “dplyr” incluyen “filter()” para filtrar datos, “mutate()” para crear nuevas variables, “summarize()” para agregar datos y “arrange()” para ordenar. Además, utiliza los comandos “group_by()” que facilita el agrupamiento de datos por una o más variables.

Para la visualización de los resultados, se sugiere el uso del paquete “ggplot2”, que forma parte de “tidyverse” y fue desarrollado por Hadley Wickham. “ggplot2” sigue la

gramática de los gráficos y permite a los usuarios crear gráficos agregando capas a una gráfica inicial usando el operador `+`, con componentes como `ggplot()` para la inicialización de la gráfica, `aes()` para asignaciones estéticas y `geom_*()` para objetos geométricos. El paquete funciona perfectamente con marcos de datos, lo que permite asignar variables a propiedades visuales y admite una variedad de gráficos, desde simples diagramas de dispersión hasta complejos diagramas facetados. Con opciones de personalización a través de funciones como `labs()` y `theme()`, los usuarios pueden personalizar la apariencia de sus gráficos. Es una poderosa herramienta para la visualización de datos, que proporciona un enfoque flexible e intuitivo para crear gráficos informativos en R.

PROPUESTA DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Para establecer el análisis de la información es importante revisar con cada líder temático los posibles análisis estadísticos a realizar con los datos colectados en campo. En general y debido a la naturaleza de los datos que se propone coleccionar en los compartimientos de carbono identificados, se analizarán los datos por medio de estadística descriptiva univariada y multivariada. Dentro de los métodos de estadística multivariada, se proponen usar:

Análisis de componentes principales (PCA)

Es una técnica estadística multivariada que se utiliza para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos mediante la transformación de las variables originales en un nuevo conjunto de variables ortogonales llamadas componentes principales. Los componentes principales están ordenados en términos de la cantidad de varianza que explican en los datos. El primer componente principal explica la mayor parte de la varianza, el segundo explica la mayor parte del segundo, y así sucesivamente. Al seleccionar un subconjunto de los componentes principales, se puede reducir efectivamente la dimensionalidad de los datos mientras se retiene la mayor parte de la información.

Análisis de conglomerados

Por medio de este análisis se busca agrupar observaciones similares en conglomerados o en subgrupos en función de sus características o atributos. A su vez, identifica agrupaciones naturales dentro del conjunto de datos que pueden no ser evidentes de inmediato al observar los datos sin procesar. En el análisis de conglomerados se utiliza una métrica de distancia para calcular la similitud entre objetos u observaciones. Las métricas de distancia más utilizadas incluyen la distancia euclidiana y la distancia de

Manhattan. Una vez que se construye la matriz de similitud, se utiliza un algoritmo de agrupación para agrupar los objetos en función de sus similitudes.

Análisis factorial

Es una técnica estadística multivariada utilizada para identificar factores o dimensiones subyacentes en un conjunto de datos. El objetivo del análisis factorial es identificar un conjunto más pequeño de variables latentes, conocidas como factores, que pueden explicar las correlaciones entre las variables observadas. Se supone que las variables observadas están relacionadas con los factores a través de una relación lineal, donde la carga factorial representa la fuerza de la relación entre el factor y la variable.



Muestreo en el Complejo Cenagoso Zapatosa. Fotografía: José Manuel Pantoja

PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN

PROPUESTA INICIAL PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES Y REMOCIONES DE GEI A PARTIR DE LAS INICIATIVAS DE CONSERVACIÓN DE BIODIVERSIDAD

Pese a que a nivel nacional (ni internacionalmente, al menos bajo las directrices del Grupo Intergubernamental del Cambio Climático - IPCC), existen directrices para la cuantificación de la reducción de emisiones y remociones de GEI en sistemas naturales, las propuestas que se presentan en este documento se basan, en gran parte, en el concepto de “**adicionalidad**” que deben cumplir todas las iniciativas de mitigación sectoriales y de proyectos REDD+ y que consiste, básicamente, en que los resultados de las iniciativas deben ser adicionales a los que se habrían producido si el proyecto no se hubiera llevado a cabo.

De esta forma, se pretende garantizar que los resultados de las iniciativas planteadas son “adicionales” al escenario de referencia y que representan un beneficio neto para la atmósfera (en cuanto a la reducción de emisiones de GEI), tal como lo plantean las directrices colombianas para las cuantificaciones (Minambiente, 2023) y, en este caso particular, también para la biodiversidad, principalmente en términos de la conservación del ecosistema, la protección de Altos Valores de Conservación (en las seis categorías planteadas por la Red de Recursos de AVC - HCVRN, 2013) y la restauración/rehabilitación de los hábitats y ecosistemas.

Es importante destacar que las iniciativas planteadas pretenden constituir estrategias de mitigación (encaminadas a combatir la causa y minimizar los posibles impactos del cambio climático) y/o adaptación (buscan reducir las consecuencias negativas y aprovechar las oportunidades que se puedan originar) al cambio climático y, para ello, también se enmarcan en algunas de las principales medidas, acciones e instrumentos propuestos o implementados en países de América Latina y el Caribe (CEPAL, 2015).

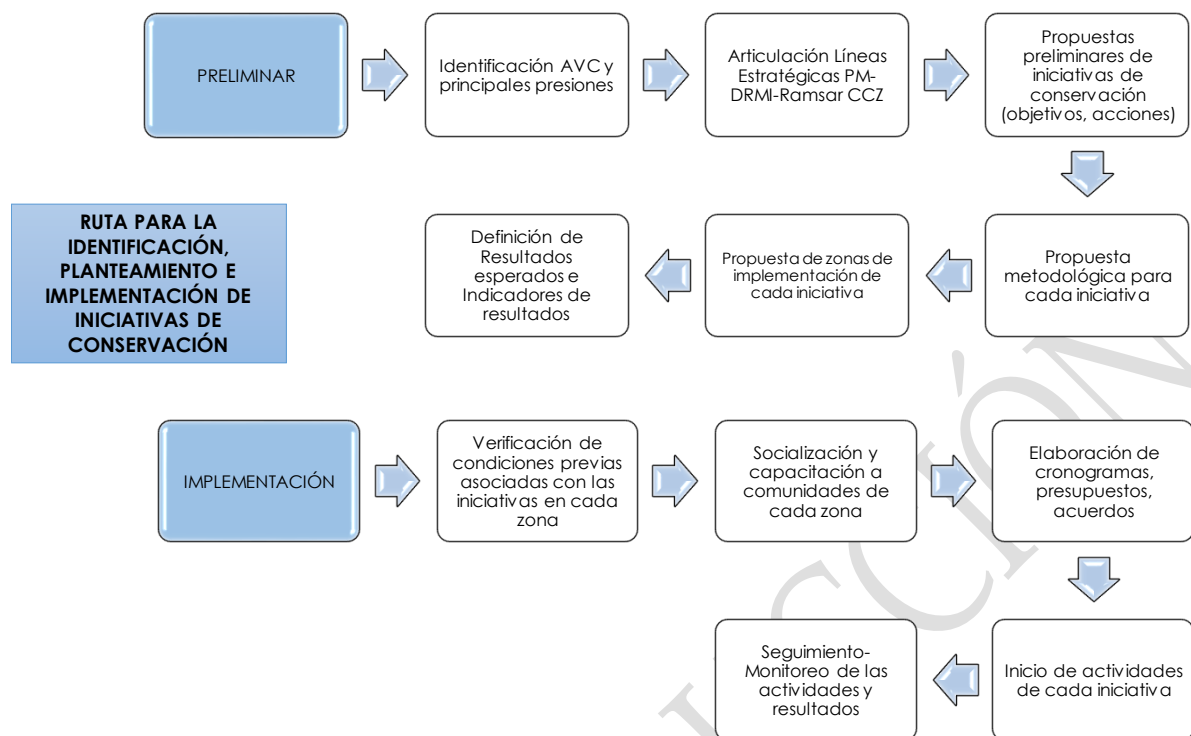


Figura 48. Ruta propuesta para la identificación, planteamiento e implementación de iniciativas de conservación. Fuente: elaboración propia (2024).

Como ejemplo, partiendo del reconocimiento de las actividades y acciones que se desarrollan en los humedales del Magdalena medio y bajo, en la Tabla 42 se proponen algunas iniciativas.

Tabla 42. Ejemplo de iniciativas para medidas de mitigación/adaptación en humedales.

Ejemplos de iniciativas	Algunas medidas de mitigación y/o adaptaciones asociadas
Contribuir con la restauración del flujo natural de agua y de la hidrobiota entre los sistemas lóticos de menor magnitud y los sistemas lénticos que conforman el sistema de humedales a monitorear.	Adaptación: ➤ Monitoreo de especies, hábitats y ecosistemas. ➤ Protección, conservación y restauración de los ecosistemas y el recurso hídrico. ➤ Gestión de riesgo y seguridad alimentaria. ➤ Acciones contra inundaciones.
Aprovechamiento económico de especies que puedan estar ocasionando algún efecto en la dinámica del humedal (por ejemplo, especies con potencial de invasión).	Mitigación: ➤ Programas para promover el uso de biocombustibles.

Ejemplos de iniciativas	Algunas medidas de mitigación y/o adaptaciones asociadas
	↓ Acciones para el uso de energías renovables y alternas. ↓ Reducción de emisiones debidas a deforestación y degradación de bosques. Adaptación: ↓ Seguridad alimentaria. ↓ Acciones para la conservación y aprovechamiento de los ecosistemas.
Programa de sensibilización y conservación de las especies endémicas, raras o en peligro y de los hábitats en peligro del humedal.	Mitigación: ↓ Reducción de emisiones debidas a deforestación y degradación de bosques. Adaptación: ↓ Capacitación e investigación en sectores vulnerables. ↓ Planes contra incendios forestales. ↓ Educación ambiental.
Manejo eficiente de residuos sólidos con mala disposición en los humedales y sus alrededores.	Mitigación: ↓ Manejo de residuos sólidos y rellenos sanitarios Adaptación: ↓ Programas de protección de ecosistemas y acciones para adaptación de comunidades ante el cambio climático y para reducir la vulnerabilidad ante la disposición de agua potable

Fuente: elaboración propia (2024).

PROPUESTA INICIAL DE MONITOREO COMUNITARIO PARTICIPATIVO COMO ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

La participación comunitaria en la generación de ciencia es estratégica, debido a que permite la integración de los conocimientos técnicos y empíricos en función de la conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Esta colaboración promueve la participación activa de los usuarios del recurso, despierta el interés por el conocimiento de causas y consecuencias de las acciones individuales y colectivas en las que inciden en

su entorno y ayuda a la interpretación de los contextos reales de los territorios por parte de los cooperantes.

El objetivo de estos lineamientos se centra en integrar estrategias de participación comunitaria en la generación de información y propuestas de manejo, para la toma de decisiones, que contribuyan a la construcción de herramientas metodológicas para el monitoreo y estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo.

Definición del Monitoreo Comunitario Participativo (MCP)

Entiéndase como monitoreo a un ejercicio basado en la observación, medición, registro y análisis de información, que busca hallar patrones de cambios, para implementar acciones correctivas o prevenir eventos no deseados (Chediack, 2009). En ese orden de ideas, se define el Monitoreo Comunitario Participativo, partiendo de la definición desarrollada por IDEAM, Fundación Natura y Condesan en 2021, como una estrategia de participación comunitaria, donde los locales son claves en la generación de información que permita entender los territorios para la toma de decisiones. Esta estrategia incluye el trabajo participativo de todos los actores a partir de diálogos de saberes y del intercambio de conocimientos científicos y tradicionales.

Se definen tres tipos de MCP, dependiendo del nivel de participación de los actores (Shirk et al., 2012):

- ✦ Contributivo: es diseñado por externos (técnicos) y la comunidad colabora solo con el levantamiento de la información, ideal cuando en la investigación priman los aspectos técnicos.
- ✦ Colaborativo: es diseñado por externos y la comunidad no solo aporta información, sino que también incide en ajustes estructurales del proceso, analiza la información y ayuda en la divulgación de los resultados.
- ✦ Cocreado: es diseñado en todos los aspectos de manera conjunta, técnicos-comunidad.

Para el desarrollo de procesos de MCP, se encuentran grupos estratégicos, considerados así por las actividades que desarrollan dentro de su comunidad, tales como organizaciones sociales, ambientales, colectivos étnicos, consejos comunitarios, gobiernos indígenas, estructuras organizativas campesinas, asociaciones de pescadores, artesanos, entre otros (IDEAM, Fundación Natura, & Condesan, 2021).

Lineamientos para el Monitoreo Comunitario Participativo (MCP)

- ✦ Preparación: es una fase fundamental, ya que permite definir los objetivos con base al contexto territorial, sus participantes (actores del territorio) y la estrategia de trabajo.
- ✦ Implementación: pone en práctica lo construido en la fase anterior, evalúa, prueba y ajusta las estrategias metodológicas, dando paso a la toma, registro de información y análisis de los resultados.
- ✦ Divulgación: discute y socializa los resultados con los actores involucrados, con la finalidad de generar estrategias de manejo, en relación con las necesidades de las comunidades.



Figura 49. Lineamientos metodológicos para el MCP. Fuente: elaboración propia (2024).

Fase 1. Preparación

Paso 1. Definir línea base

Se construye a partir de la identificación de elementos socioambientales del territorio, a través de fuentes secundarias o proporcionadas por las entidades territoriales y se complementa con información primaria mediante visitas de campo, entrevistas, talleres, reuniones que propicien los diálogos de saberes con las comunidades involucradas, analizando así las condiciones territoriales para implementar procesos de MCP.

Paso 2. Acercamiento con la comunidad.

Luego de conocer y analizar el contexto del territorio, a partir de información disponible para el área de implementación, es necesario identificar a los líderes comunitarios como presidentes de asociaciones comunitarias, Juntas de Acción Comunal (JAC), entre otros, con la finalidad de socializar las intenciones de monitoreo, conocer sus perspectivas y aportes al proceso. Lo anterior, dependerá de los intereses de las partes y del nivel de participación que se pretenda aplicar.

A partir de los acercamientos con los líderes comunitarios, se genera la posibilidad de relacionamiento con el resto de la comunidad. Esta acción es vital, ya que permite conocer los intereses y disposición de trabajo del colectivo, y los niveles organizativos para iniciar una ruta de trabajo que implique la construcción conjunta de las actividades del monitoreo. Para estos espacios, deben definirse las metodologías, teniendo en cuenta la inclusión de todos los miembros de la comunidad. En cada espacio de trabajo se deben generar productos que evidencien los avances, acuerdos y compromisos adquiridos. Estos espacios de trabajo presencial, a partir de los diálogos de saberes, permiten generar insumos tales como, complementar la línea base, realizar mapeo de actores, definir los objetivos (dependiendo del nivel de participación), la metodología, indicadores e instrumentos de recolección de información entre otros. La cantidad de espacios generados y la celeridad de este momento dependerá del tipo de monitoreo que se pretenda implementar (co-creado, contributivo o colaborativo).

Paso 3. Definición del objetivo.

Conociendo el contexto y las problemáticas del territorio donde se pretende desarrollar la acción de MCP, se debe responder a cuáles son los objetivos del monitoreo. Su formulación y participación dependerá de los intereses de las partes involucradas, del

conocimiento de estas, de las prioridades y necesidades de información requeridas. La definición de los objetivos dependerá del tipo de monitoreo que se desee implementar.

Paso 4. Identificación de actores y nivel de participación.

Para la identificación de actores se incluyen a todos los involucrados que inciden con la temática a abordar dentro del ejercicio de MCP, estos van desde gremios comunitarios y comerciales, entidades gubernamentales y no gubernamentales y academia. A partir de la elaboración de un mapa de actores se identifica el equipo de trabajo, los alcances, compromisos, responsabilidades e inversión de recursos de cada uno de los actores. La selección del nivel de participación (co-creado, contributivo o colaborativo), dependerá de los intereses de las partes vinculadas. Este paso permitirá identificar el nivel de relación de los actores claves y definir el rol de gobernanza de cada uno de ellos en el proceso.

Paso 5. Definición de la metodología e instrumentos de medición y registro.

La definición de la metodología dependerá de las variables a medir, de los objetivos planteados y las oportunidades de captura de información identificada dentro del contexto cotidiano de los participantes. Definidas las variables, se deben seleccionar las herramientas de levantamiento de información para la toma y registro de los datos. La identificación y selección de herramientas y metodologías es estratégica, ya que se requiere que sean sencillas, replicables y de fácil aplicación por parte del equipo. De igual manera, se debe trazar un plan de capacitaciones para el uso de los instrumentos seleccionados con los miembros del monitoreo. Por otro lado, se recomienda generar instrumentos pedagógicos, tipo instructivos, cartillas, videos, entre otros, con la finalidad de fortalecer las habilidades para la colecta de información en el ejercicio de campo.

Paso 6. Selección del equipo de trabajo.

Partiendo de la definición del MCP de IDEAM, Fundación Natura, & Condesan, 2021, se hace necesaria la selección del equipo de trabajo de la comunidad, también llamados coinvestigadores locales, que participarán de manera activa en la toma y registro de la información y del resto de actividades programadas en el proceso. Este equipo de coinvestigadores debe contar con las habilidades para realizar las observaciones, toma y registro de los datos, por lo que se debe tener en cuenta la vocación y el perfil de los participantes. Se resalta contar con una instancia responsable en el proceso y que esté conformada de manera equitativa por hombres, mujeres, jóvenes, niños y adultos mayores (dependiendo de las actividades a implementar). Lo anterior, busca garantizar la equidad de género y el relevo generacional.

Definidas las metodologías y el equipo de trabajo, se deben llevar a cabo jornadas de trabajo conjunto, con el objetivo de afianzar los conocimientos en el uso de las herramientas de medición e instrumentos de colecta de información, conceptos técnicos, y los procedimientos propuestos. Estos espacios, previos a la fase de implementación, son necesarios, ya que permiten la retroalimentación por parte del equipo local para así enriquecer el proceso y afinar la toma y registro de la información.

Paso 7. Diseño de estrategias de seguimiento y acompañamiento durante el proceso.

Es necesario diseñar una estrategia para el seguimiento, acompañamiento y evaluación del proceso por parte del equipo técnico, que permita identificar de manera eficaz las oportunidades de mejora, para medir la efectividad del proceso. Además, se hace necesaria la implementación de incentivos para los coinvestigadores que realizan el ejercicio de MCP.

Fase 2. Implementación

Paso 8. Prueba de implementación.

Después de pocas semanas de implementación urge evaluar el desarrollo del proceso, la calidad, relevancia y utilidad de los datos, que consistirá en identificar oportunidades de mejora para ejecutar acciones correctivas de ser necesario. Este paso es de suma importancia porque permitirá validar, adaptar, mejorar y perfeccionar la toma y registro de la información. Además, servirá para que los coinvestigadores afiancen las capacidades de ejecución de la metodología.

A partir de la revisión y el análisis de la información colectada, en este paso es importante replantear, si es necesario, la metodología, la introducción de algunas variables, la modificación o la incorporación de nuevos equipos e instrumentos de medición, modificación de formatos; entre otros, que aporten a la consecución de los objetivos planteados. Lo anterior debe ir acompañado de espacios presenciales donde, junto con la comunidad, se identifiquen esas oportunidades de mejora, solucionar oportunamente dudas y reforzar los conocimientos técnicos claves en el proceso. Con este ejercicio se generan una serie de resultados y lecciones aprendidas que permiten realizar los ajustes necesarios a la propuesta de MCP.

Paso 9. Seguimiento y acompañamiento.

Es indispensable de manera periódica el acompañamiento y seguimiento en campo al equipo de monitoreo, para evaluar los ejercicios de medición y colecta de información e

incluir la retroalimentación y socialización de los avances generados. Se recomienda realizar esta actividad con periodicidad mensual.

Paso 10. Sistematización de la información y análisis de resultados.

Dependiendo de los instrumentos de medición utilizados se compila y se sistematiza la información disponible, en software de bases de datos. Es importante mantener los soportes originales de la información (formatos escaneados). Con la información depurada, se generan los análisis de los resultados de acuerdo con los objetivos planteados inicialmente.

Fase 3. Divulgación

Paso 11. Socialización de los resultados.

A partir de los resultados deben generarse espacios de trabajo con los actores vinculados, para la realización del análisis de la información, a través de espacios de diálogos de saberes que permitan evaluar el ejercicio de manera operativa, pero también con base a los objetivos planteados. Para ello, se deben crear estrategias pedagógicas que faciliten el entendimiento de la información. Además, se deben generar espacios de intercambio de experiencias exitosas y lecciones aprendidas de la implementación de procesos de MCP.



Pescadores del MCP del CCZ. Fotografía: Luis Alfredo Moreno



RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN

RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE CARBONO EN HUMEDALES

VENTANAS DE IMPLEMENTACIÓN

- ✦ Se deben considerar las guías y/o protocolos que desde las autoridades ambientales de orden nacional (como IDEAM, Minambiente, INVEMAR; entre otros, según sea el caso) y regional (Corporaciones Autónomas Regionales), se han formulado para guiar o delimitar áreas específicas o prioritarias o ecosistemas específicos en el país. Estos documentos brindan los criterios que han sido aprobados a nivel nacional y regional, bajo los cuales se deben seleccionar las áreas de acuerdo con su extensión, función, aspectos físicos, ecológicos y sociales que deben ser considerados al momento de priorizar las áreas.
- ✦ Dependiendo de la naturaleza del proyecto, es importante tener en cuenta la normatividad vigente expedida por el Gobierno Nacional que aplique a su implementación. Tener claridad de la normatividad que aplica a las actividades que se realizan en las áreas priorizadas, permite delimitar el tipo de actividades que pueden o no ser realizadas en un área específica, las restricciones de uso y aprovechamiento de recursos, la propiedad de la tierra, entre otros aspectos que son clave al momento de seleccionar el área de un proyecto.
- ✦ Para proyectos de mitigación, y con la finalidad de generar beneficios sobre la captura de carbono, es importante revisar que en el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de GEI (RENARE), no existan proyectos con la misma finalidad en las áreas seleccionadas, para evitar que haya un sobrelape o duplicación de esfuerzos, así como doble contabilidad de las emisiones que se evitan gracias a la implementación de estos proyectos.
- ✦ Para la formulación de protocolos de monitoreo de las dinámicas de carbono y GEI en ecosistemas estratégicos, es necesario seleccionar áreas piloto que sean homogéneas en términos de composición de especies, propiedades de los suelos, características climáticas, dinámicas hidrológicas (para ecosistemas acuáticos), de biodiversidad; entre otras, para que puedan ser comparables al momento de determinar datos de actividad y factores de emisión, y que puedan tener alcance de aplicación a nivel nacional.

- ✦ Es igualmente importante considerar los estudios e investigaciones que han desarrollado diferentes institutos de investigación de alcance nacional en ecosistemas estratégicos, en relación con las características de los suelos, la caracterización de la vegetación, estudios hidrológicos, climáticos, geológicos; entre otros, que proporcionan información secundaria sobre áreas determinadas y que son la base para el diseño de proyectos específicos y selección de ventanas piloto.

METODOLOGÍA DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SENSORES REMOTOS

Como se mencionó en la metodología, se propone el uso de Google Earth Engine (GEE) por lo cual algunas recomendaciones y consideraciones al respecto son:

- ✦ Dado que los códigos se construyen según los objetivos del proyecto, que en este caso es el análisis de cambios de extensión del humedal y el cálculo de índices espectrales, se deben realizar diferentes pruebas para establecer cuál de los conjuntos de datos y qué tipo de algoritmos son los óptimos para la obtención de resultados en cuanto a la separabilidad de la vegetación y otras coberturas de las superficies de agua.
- ✦ GEE permite ejecutar diferentes procesos en tiempos relativamente cortos, siempre y cuando se creen códigos teniendo la precisión necesaria para no incurrir en errores al momento de digitar las variables y criterios de ejecución.
- ✦ El acceso libre a la plataforma se destaca como una de las principales ventajas, ya que el usuario no depende de permisos para hacer uso de sus funcionalidades.
- ✦ A pesar de ser una plataforma con una interfaz intuitiva y de fácil manejo, existen algunas desventajas tales como la resolución espacial de las imágenes, pues al ser gratuitas, para el caso de estudios detallados, no es muy útil contar con imágenes Landsat, MODIS o Sentinel. Sin embargo, un aspecto a resaltar es que permite cargar otros insumos que sean adquiridos previamente por el usuario.

METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO

Compartimiento de biomasa y MOM

- ✦ Por lo general, para la estimación de la biomasa para vegetación de tipo no bosque (herbáceas y vegetación acuática), se cosecha todo el material contenido en la

subparcela y se estima peso fresco y seco, sin realizar una diferenciación entre las especies que se registran en cada subparcela; es decir, se toma una muestra combinada. Sin embargo, en el proceso de validación de este protocolo se consideró importante tener en cuenta esta diferenciación, o sea, se tomaron en cuenta valores asociados con las especies más abundantes o representativas en cada subparcela (se trabajó con las especies con coberturas mayores al 50%); esto permite asegurar la obtención de datos más detallados y que permitirán a mediano y largo plazo, realizar comparaciones entre los contenidos de carbono de las especies más representativas de estos componentes, en otras palabras, estimaciones especie específicas.

- ✦ El IPCC ha proporcionado valores de fracción de carbono para bosques tropicales y subtropicales, por su parte, la metodología para la cuantificación de emisiones y remociones de GEI en humedales continentales de Proclima define una fracción de la materia seca de 0,47. Estos valores se obtienen a partir del análisis del componente arbóreo; sin embargo, no se tienen datos de esta fracción para elementos como herbáceas terrestres y acuáticas, significantes en este tipo de ecosistemas. Para la materia orgánica muerta tampoco se tienen valores de referencia para estimar esta fracción, aunque varios estudios mencionan contenidos de carbono que oscilan entre 20% y 40%. Durante el proceso de validación de este protocolo, fue posible obtener valores de contenidos de carbono y, por tanto, fracciones de carbono propios para estos elementos, de esta forma se define una fracción de carbono de 0,29 para los componentes herbáceo, vegetación acuática y materia orgánica, valor que se debe tener en cuenta para generar las estimaciones de biomasa y carbono correspondientes.
- ✦ Con relación a la estimación de la biomasa a partir de métodos indirectos; es decir, a través del empleo de ecuaciones alométricas, durante el ejercicio de validación esta estimación se realizó mediante ecuaciones alométricas de aplicación general como (Chave, y otros, 2015) para elementos arbóreos y (Hughes, Kauffman, & Jaramillo, 1999) para palmas. Adicionalmente, se realizó el ejercicio por medio de la aplicación de ecuaciones especie o género específicas. Se obtuvieron rangos de valores similares, con algunas excepciones (especies como *Guazuma ulmifolia*, *Inga acuminata*, *Inga nobilis* y *Xylopia aromatica*) y las palmas, en donde el modelo general parece subestimar los valores de biomasa. En este sentido se recomienda, siempre que sea posible, utilizar ecuaciones especie o género específicas que consideren las variaciones en los factores de expansión asociados con rasgos taxonómicos.

- ✦ Asociado con el ítem anterior, una actividad que se torna relevante para la implementación de este protocolo es la correcta identificación del material botánico, con el fin de estimar los contenidos de biomasa de forma adecuada.

Compartimiento de biodiversidad

- ✦ Debido a las dinámicas hidroclimáticas, y principalmente a sus importantes efectos en las planicies de inundación, es muy factible que, al menos para los grupos de hidrobiota, las características estructurales y ecológicas sean variables entre periodos de muestreo, por lo que es importante garantizar su monitoreo en los humedales seleccionados como ventanas de implementación.
- ✦ El análisis de redes tróficas acuáticas podría constituir un excelente indicador de los flujos de carbono, tanto al interior del cuerpo de agua, como de su contribución al ciclo terrestre y a las posibles emisiones o retenciones que cumpla el ecosistema de humedal en su totalidad.
- ✦ En cuanto a las principales presiones que se puedan identificar en los humedales y que afectan al ecosistema, los hábitats y/o las especies, es necesario tener presente que la mayoría, sino todas ellas, requieren estrategias de educación y concienciación urgentes entre las poblaciones que habiten estos ecosistemas y el planteamiento de iniciativas que beneficien económicamente a las comunidades; pues sin ellas, las demás acciones de conservación que se planteen resultarían inútiles o muy poco efectivas.
- ✦ La zonificación basada en los AVC es una herramienta importante para la gestión sostenible de recursos naturales y la protección del medio ambiente. Las autoridades ambientales, según su jurisdicción, deben definir sus propios criterios para identificar y delimitar los polígonos de alto valor de conservación en su zona.
- ✦ Es así como, a partir de la zonificación para la conservación, se busca proteger y preservar estas áreas de alto valor, y es posible que se restrinjan o prohíban ciertas actividades o desarrollos en estas zonas según la legislación ambiental de Colombia. Por el contrario, las áreas que no se consideran de alto valor de conservación pueden estar sujetas a regulaciones menos estrictas en términos de conservación. Para esto, se recomienda iniciar con la revisión y evaluación exhaustiva del humedal de interés, de manera que se identifiquen primero los AVC que pueden ser representados a nivel espacial para preparar los insumos geográficos necesarios para realizar el proceso.
- ✦ Se garantiza que los AVC identificados sean los indicados, trabajando de la mano con un grupo de expertos que incluya profesionales biólogos, ecólogos,

conservacionistas; entre otras disciplinas, para que la identificación sea precisa y para determinar las mejores prácticas de conservación.

- ✦ Respecto a la preparación de los insumos geográficos de los AVC, se deben usar herramientas de geoprocесamiento para capas vectoriales y ráster ya que los insumos primarios y secundarios proceden de diferentes fuentes. Así mismo, se debe tener en cuenta que los valores de cada capa geográfica se revisan previamente de forma tal que se reclasifiquen cumpliendo con las necesidades para identificar los AVC de cada categoría. Por esto, los profesionales SIG que se encarguen de implementar la metodología propuesta en este documento deben contar con la experiencia suficiente desde las ciencias biológicas, así como desde el análisis espacial.
- ✦ A partir de los resultados obtenidos con el proceso de zonificación de los AVC en humedales, se plantean regulaciones claras por cada ventana de implementación del protocolo, especificando las actividades permitidas, involucrando a la comunidad local, a las partes interesadas y a la sociedad civil para garantizar que se tengan en cuenta diferentes perspectivas y problemáticas. Para esto, se recomienda contar con la participación comunitaria, de manera que se incluyan los conocimientos tradicionales y considerar las necesidades y preocupaciones locales.
- ✦ Así mismo, se plantea la posibilidad de construir un sistema de monitoreo para asegurar que las regulaciones se cumplan y que los AVC se conserven de manera efectiva. Lo anterior, considerando también la planificación a largo plazo de estrategias de adaptación al cambio climático al diseñar la zonificación de AVC, ya que las condiciones ambientales pueden cambiar con el tiempo.
- ✦ En conclusión, la zonificación de áreas con AVC es una herramienta crucial para la protección de la biodiversidad y los recursos naturales, y debe realizarse de manera cuidadosa y estratégica.



Monitoreo de suelos Complejo Cenagoso de Zapatos. Fotografía: José Manuel Pantoja

ANEXOS TÉCNICOS

Se entregan ocho anexos técnicos que responden al proceso completo de validación de esta propuesta metodológica, puesta a prueba durante los meses de marzo y septiembre-octubre de 2023, correspondiente a la temporada seca (aguas bajas) y temporada de lluvia (aguas altas) del Complejo Cenagoso de Zapatosa, primera ventana de implementación del presente protocolo.

Estos anexos contienen los resultados más relevantes de los dos pilotos, sus análisis comparativos y ajustes identificados al proceso de implementación, como resultado esta actividad. Además, los resultados, desde marzo de 2023 hasta febrero de 2024, del levantamiento de información para identificar áreas y momentos de reproducción de la comunidad íctica, producto del trabajo del Monitoreo Comunitario Participativo Pesquero (MCPPe) llevado a cabo con los coinvestigadores (pescadores y pescadoras) del Complejo Cenagoso Zapatosa.

- ✦ **ANEXO 1.** Resultados de la implementación de los compartimientos de Biomasa y MOM para la estimación de contenidos de carbono en el CCZ.
- ✦ **ANEXO 2.** Resultados de la implementación del compartimiento de suelos y sedimentos para la estimación de contenidos de carbono en el CCZ.
- ✦ **ANEXO 3.** Resultados de la implementación del compartimiento de Biodiversidad para la estimación de contenidos de carbono en el CCZ.
- ✦ **ANEXO 4.** Resultados de la implementación del uso de herramientas cartográficas para la estimación de contenidos de carbono en el CCZ.
- ✦ **ANEXO 5.** Resultados de la implementación del Monitoreo Comunitario Participativo como estrategia local para la estimación de contenidos de carbono en el CCZ.
- ✦ **ANEXO 6.** Propuestas y lineamientos para proyectos de mitigación y/o adaptación frente al cambio climático en humedales del Magdalena medio y bajo.
- ✦ **ANEXO 7.** Propuestas y lineamientos estadísticos y de gestión de la información para creación e inclusión de indicadores para la estimación de contenidos de carbono en humedales del Magdalena medio y bajo.
- ✦ **ANEXO 8.** Lineamientos desde el área HSEQ para la implementación de protocolos para la estimación de contenidos de carbono en el CCZ.

Protocolo

para la estimación de contenidos
de carbono en humedales del
Magdalena medio y bajo

