

**Propuesta de  
Protocolo para la estimación integral de contenidos  
de carbono y biodiversidad en humedales del  
Magdalena Medio y Bajo**

**Anexo 7. Resultados bianuales (desde 2016 a 2022 y 2023) de los  
datos de actividad del Complejo Cenagoso de Zapatosa**

**Sidney Adriano Pérez Villegas  
Profesional SIG para Datos de Actividad**

**Yesid Fernando Rondón Martínez  
Profesional transversal - Motores de transformación**



# Propuesta de Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo

## Ecopetrol S.A

Santiago Martínez Ochoa  
Xiomara Sanclemente Manrique  
Lorena Ortiz Melo  
Maria Juliana Salcedo Hernández  
Adriana Velandia Valero  
Jorge Gaviria Chicuasique  
Apoyo técnico y Administrativo del  
Convenio Específico No. 3044288

## Fundación Natura Colombia

Clara Ligia Solano Gutiérrez  
Directora ejecutiva

Nancy Vargas Tovar  
Subdirectora técnica

Lorena Franco Vidal  
Subdirectora técnica

Sandra Galán  
Subdirectora técnica

Mauricio Rosas Hurtado  
Jefe financiero y contable

Andrea Gutiérrez de Piñeres  
Jefe administrativa y de gestión  
humana

Eliana Marcela Garzón Fierro  
Jefe de comunicaciones

Gustavo Andrés Segura Clavijo  
Jefe de proyecto CO2 Humedales

### Autores

#### Equipo técnico CO<sub>2</sub> Humedales

Claudia Patricia Andramunio-Acero  
Profesional monitoreo de carbono  
Líder 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

Lina María Parada Alzate  
Profesional SIG agua y biodiversidad

Jhenny Liliana Salgado Vásquez  
Profesional estadístico y gestión de la  
información

Luis Alfredo Moreno-Pérez  
Profesional de apoyo local

Patricia Téllez Guio  
Sidney Adriano Pérez Villegas  
Profesionales SIG Datos de Actividad

### Colaboradores técnicos

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

Michelle Hernández Fernández  
Cristhian Alfonso Pimiento Ordóñez  
Luz Patricia Hernández Arango  
Sandra Milena Palacio Taborda  
Nicolas Romero-Peña  
Profesionales Fundación Natura de  
apoyo en el proceso de formulación e  
implementación

### Colaboradores locales

Francisco Villalobos Ríos  
Danilson Segovia Zambrano  
Rodolfo Segovia Daza  
Vicente Buitrago Segovia  
Deibis Armando Martínez Martínez  
Omaida Rangel Rangel  
Genaro Madrid Álvarez  
Alvenis Carpio Castro  
Elvin Dewin Cabarcas Monterrosa  
Jorge Adolfo Rangel Piñeres  
Jaider Guerra Guillen  
Celso Moreno Mejía  
Fabio Moreno Mejía  
Omar Antonio Morales Hurtado  
Teobaldo Cervantes Cadena  
Edilso Iglesia Machado

## Edición

Danyth Janneth Fandiño Lerma  
Líder de comunicaciones CO2  
Humedales

Diego Alejandro Quintero Candela  
Lina Daniela Mutis Prado  
Diseño gráfico

Andrea Julieth Castellanos Leal  
Diagramación

Claudia Campos Rozo  
Corrección de estilo

Alejandro Peña García  
José Manuel Pantoja Surmay  
Fotografías

### Cítese como:

Andramunio-Acero, C., Rondón-Martínez, Y., García-Murcia, Y., Mendoza, Y., López-Muñoz, M., Parada, L., Salgado, J., Moreno-Pérez, L., Téllez, P. y Pérez, S. (2024). Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Fundación Natura Colombia, Ecopetrol S. A.

ISBN digital: en trámite

### Aviso legal

© Fundación Natura Colombia  
Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de este documento 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.

Esta publicación se realizó en el marco del Proyecto CO<sub>2</sub> Humedales, Convenio Específico No. 3044288 entre Fundación Natura Colombia y Ecopetrol S.A.

# INTRODUCCIÓN

Pese a ser ecosistemas estratégicos, los humedales presentan una alta vulnerabilidad a los cambios que puedan presentarse tanto de manera natural como antrópica (Junk, 2013). Esto genera procesos de transformación con efectos para el ecosistema y sus habitantes a las escalas de cuenca (Angarita et al., 2020), regional (Senhadji-Navarro et al., 2017) y local (Agudelo et al., 2015), y que alteran su naturaleza y oferta de servicios ecosistémicos. Dicha transformación se evaluó en los humedales de la macrocuenca Magdalena-Cauca, con base en el concepto operativo de humedal presentado en la sección “Contexto general” de la propuesta del *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*<sup>1</sup> (Andramunio-Acero et al., 2024), donde, además, se identificaron acciones de transformación presentes en el Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ), y que son reconocidas por las comunidades locales.

La validación en el CCZ partió del concepto de Datos de Actividad (DA) y de la metodología propuesta en la sección “Criterios técnicos para la estimación de contenidos de carbono desde datos de actividad (DA) y factores de emisión (FE)” de la misma propuesta de Protocolo (Andramunio-Acero et al., 2024). En consecuencia, en una extensión de 233 027,99 ha se obtuvieron los datos de coberturas de la tierra homologadas, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), para los periodos 2016, 2018, 2020, 2022 y 2023, los cuales se consideraron como insumos para el cálculo de los cambios de coberturas de la tierra bianualmente.

En este contexto, con los resultados inicialmente se identificó el área de estudio del CCZ en donde se calcularon los DA, se procesaron las imágenes de satélite, y se definieron los puntos de entrenamiento y las herramientas de apoyo utilizadas. Posteriormente, se asociaron las coberturas de la tierra del humedal y con estas se determinó la pérdida, ganancia o permanencia de las coberturas, para finalmente identificar los cambios de la superficie terrestre, incluyendo los cuerpos de agua, y asociarlos con una tasa promedio anual de cambios de la superficie. A partir de estos resultados se infieren conclusiones y recomendaciones para otras implementaciones en humedales del Magdalena Medio y Bajo.

---

<sup>1</sup> De aquí en adelante denominado como propuesta de Protocolo.

## RESULTADOS

El punto de partida para analizar los resultados de los DA fue identificar los procesos que han generado transformaciones en los ecosistemas de estudio. Se partió de un análisis general de los motores de transformación que actúan sobre los humedales del Magdalena Medio y Bajo, a partir de la metodología propuesta en la sección de muestreo de la propuesta de Protocolo, que identificó los mayores agentes de cambio (positivos o negativos) que podrían relacionarse con las tasas de transformación a las que están sujetas actualmente estos ecosistemas estratégicos del país.

### MOTORES DE TRANSFORMACIÓN DEL MAGDALENA MEDIO Y BAJO

Con base en lo anterior, se identificaron 30 variables de las cuales dos (2) son de origen biológico, 12 de origen físico y 16 de origen socioeconómico (Tabla 1).

**Tabla 1.** Motores de transformación identificados para humedales de tierras medias y bajas de la macrocuenca Magdalena-Cauca.

Motor	Sigla	Categoría	Definición
Materia orgánica en descomposición	MaOrDe	Biológica	Material biológico sujeto a descomposición por la microbiota que almacena altos contenidos de carbono
Especies introducidas	EsInt	Biológica	Organismos de la diversidad biológica que no se distribuyen naturalmente en el ecosistema en el que se encuentran
Descargas de aguas residuales	DeAgRes	Física	Actividad relacionada con el vertimiento de aguas residuales (domésticas e industriales) a los cuerpos de agua sin previo tratamiento
Deforestación	Def	Física	Actividad relacionada con la eliminación de la capa o cobertura vegetal natural, sin tener en cuenta la finalidad
Obras civiles	ObCi	Física	Actividad relacionada con la construcción de vías, canales, diques, box culverts, trampas de grasas, entre otras, que modifiquen la condición natural de los cuerpos de agua
Obras hidráulicas	ObHri	Física	Actividad relacionada con la modificación (taponamiento, desvío, desecamiento) de cuerpos de agua naturales
Degradación del hábitat	DeHab	Física	Actividad relacionada con la transformación del ecosistema y que hace que este no pueda recuperarse por sí solo
Sedimentación	Sed	Física	Depósito o precipitación de material particulado en el fondo de los cuerpos de agua
Cambio climático	CamCli	Física	Fenómeno natural que modifica la condición habitual del clima en una región, que se ha visto acelerado por acciones antrópicas
Alteración de la escorrentía superficial	AlEsSu	Física	Fenómeno natural relacionado con la erosión, que modifica la topografía del suelo y altera el flujo de agua
Cambios en la oferta de agua	CamOfAg	Física	Fenómeno natural relacionado con la variabilidad en la disponibilidad de agua, asociado con el régimen hidroclimatológico
Taponamiento por inundaciones	TaPoln	Física	Fenómeno natural ocasionado por desbordes y crecientes que aumentan el nivel de los cuerpos de agua y que arrastran

Motor	Sigla	Categoría	Definición
			material de gran tamaño
Erosión	Eros	Física	Proceso relacionado con el desgaste de la superficie terrestre, influenciado por el viento, el agua y el ser humano
Incremento de la salinidad	InSal	Física	Proceso relacionado con el incremento en la concentración de sales en el agua, que altera la dinámica de las comunidades hidrobiológicas. Está ligado a las aguas residuales
Represamiento	Repre	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la construcción de represas, embalses y pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) que regulan el cauce natural de un cuerpo de agua
Orden público	OrPu	Socioeconómica	Actividad relacionada con eventos que alteran el orden y la tranquilidad de un territorio, y que pueden incluir hechos violentos
Decisiones sectoriales	DeSe	Socioeconómica	Actividad relacionada con la gobernanza ejercida por organizaciones pertenecientes al sector privado
Decisiones institucionales	DeIn	Socioeconómica	Actividad relacionada con la gobernanza ejercida por organizaciones pertenecientes al sector público
Cultivos ilícitos	CuILL	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con el cultivo de plantas consideradas ilícitas o no reguladas por la ley
Agricultura	Agri	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con el cultivo legal de diferentes especies vegetales a pequeña escala
Ganadería	Gan	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con el levante, cría y engorde de ganado para consumo y venta (incluye búfalos)
Tránsito fluvial	TraFlu	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con el tránsito de embarcaciones de pequeño, mediano y alto porte sobre cuerpos de agua
Tenencia de tierra	TenTie	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la apropiación de la tierra para diferentes usos
Urbanización	Urba	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la expansión de centros poblados y la construcción de vivienda para uso humano
Hidrocarburos	HiCar	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la exploración y explotación de yacimientos de petróleo y sus derivados, además de gas natural
Minería	Min	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la exploración y explotación mineral del suelo, además de los recursos disponibles en los cuerpos de agua
Presión sobre el recurso pesquero	PrePes	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la extracción excesiva de recursos pesqueros
Turismo	Tu	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con la visita a lugares diferentes al del sitio de residencia o del entorno habitual por parte del ser humano
Monocultivos de gran extensión	MoGraEx	Socioeconómica	Actividad socioeconómica relacionada con plantaciones de una especie que ocupan una gran extensión de área
Residuos sólidos	ReSo	Socioeconómica	Aporte de material alóctono que no es degradado fácilmente por el ecosistema

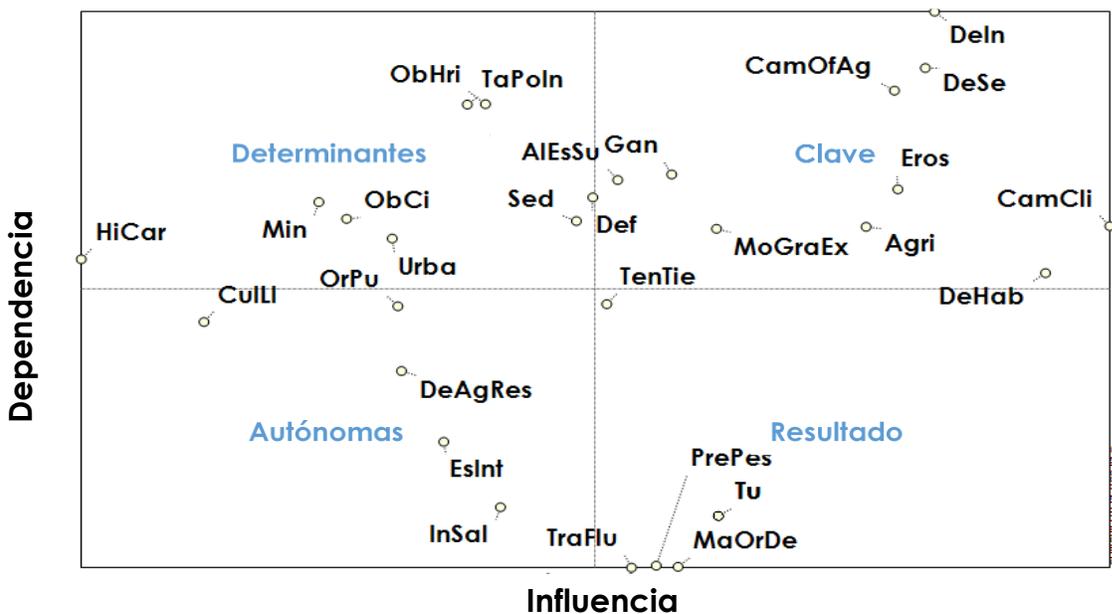
Fuente: elaboración propia (20024).

El resultado indicó que el 30 % de los motores de transformación identificados presentan características determinantes (Figura 1, parte superior izquierda), relacionadas con actividades físicas, como la alteración de la escorrentía superficial (AlEsSu) y la sedimentación (Sed), que se pueden ser afectadas por acciones asociadas con la construcción de obras civiles (ObCi) e hidráulicas (ObHri), que a su vez pueden incidir en procesos de taponamiento por inundaciones (TaPoIn) (Figura 1).

A estas acciones se suman actividades socioeconómicas estrechamente

relacionadas con las variables físicas mencionadas. El represamiento (Repre) de los cuerpos de agua lóticos, cuyo objetivo es la generación de hidroenergía, regula la oferta disponible del caudal y retiene material particulado. Esto modifica los pulsos de inundación que nutren los planos inundables de la macrocuenca y altera los procesos de sedimentación, al retener el material aguas arriba de la presa y reducir sus aportes aguas abajo, así como la capacidad del suelo de transportar agua. Esta última situación también puede verse comprometida por la captación de aguas por exploración y explotación de hidrocarburos (HiCar), la extracción de minerales del suelo y subsuelo dentro de la actividad minera (Min) y las demandas de agua por parte de centros poblados o zonas donde existe algún tipo de urbanización (Urba) (Figura 1).

El 20 % de los motores presentaron una condición autónoma (Figura 1, parte inferior izquierda); resalta que las especies introducidas (EsInt) presentan baja influencia, puesto que son uno de los mayores motores por pérdida de biodiversidad (Forero et al., 2021). Así, se recomienda prestar mayor atención a este motor.



**Figura 1.** Mapa de influencias indirectas (MII) para 30 motores de transformación identificados para humedales de tierras medias y bajas de la macrocuenca Magdalena-Cauca. Elaborado en la Versión 6.1.2 2003/2004 de MICMAC de Lipsor-Epita-Micmac. Fuente: elaboración propia (2024).

El incremento de la salinidad (InSa) puede traer consigo afectaciones a la biodiversidad acuática (Chung, 2001) y esta puede estar asociada a los aportes

de material que ingresa por descargas de aguas residuales (DeAgRes) procedentes de procesos domésticos o industriales. Se sabe que estas alteraciones a la calidad del agua pueden tener efectos sobre la salud pública por ingesta directa o indirecta y traer consigo enfermedades (Gutiérrez-Moreno y De la Parra-Guerra, 2020) y, a su vez, detrimento de la calidad de los ecosistemas. El orden público (OrPu) y los cultivos ilícitos (CuLI) parecen ser situaciones que afectan la calidad de los ecosistemas de humedal y que están relacionadas entre sí. Esto se debe a que los grupos al margen de la ley se abastecen económicamente de actividades en las que se incluyen los cultivos ilícitos, respecto a lo cual Colombia es el mayor productor de hoja de coca (Díaz Escobar y Sánchez Torres, 2004), y a que estas organizaciones ocupan áreas de las tierras medias y bajas de la macrocuenca Magdalena-Cauca (Figura 1).

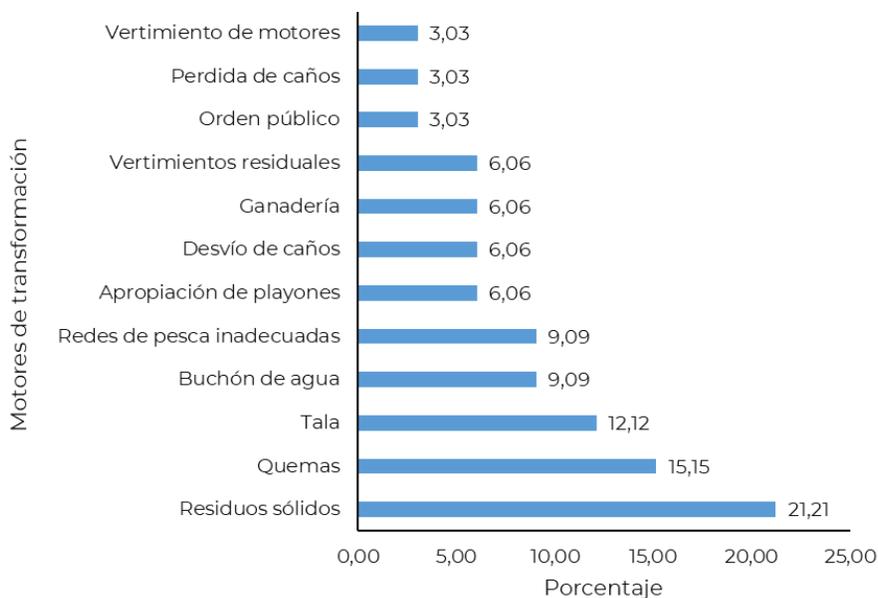
Cerca del 33 % de los motores identificados se consideran clave (Figura 1, parte superior derecha) y, en principio, los esfuerzos de priorización apuntan a su revisión y tratamiento. Sin lugar a dudas, el uso del suelo es uno de los factores que más modifica la vocación natural de los humedales; en este sentido, la ganadería (Gan) y la agricultura (Agri), que a mayor escala se consideran monocultivos de gran extensión (MoGraEx), inciden directamente sobre los ecosistemas. Como resultado, se genera degradación del hábitat (DeHab), erosión del suelo (Eros) y, con esto, aceleración de los procesos de cambio climático (CamCli) y alteración del ciclo del agua y del régimen hidrológico de la región. En consecuencia, hay cambios en la oferta de agua (CamOfAg), elemento fundamental para el desarrollo de todos los procesos biológicos en ambientes de humedal y que contribuye directamente a todas las actividades de uso y aprovechamiento del ser humano (Figura 1).

En este proceso, los acuerdos que se tomen desde la institucionalidad (DeIn) a diferentes escalas y la vinculación activa de los sectores privados (DeSe) son fundamentales para establecer políticas que apunten a generar un esquema de gobernanza en torno al agua, pues este es el recurso que moldea y modela las condiciones de estos territorios (Figura 1). Es importante resaltar que aunque la tenencia de tierra (TenTie) se ubica espacialmente en el cuadrante inferior derecho, relacionado con los motores de resultado (Figura 1), se consideró un motor neutro debido a su ubicación cercana al eje central del gráfico. La tenencia de la tierra es un factor fundamental para desarrollar cualquier uso o aprovechamiento del suelo; por eso, también se propone como uno de los motores a priorizar.

Finalmente, cerca del 17 % de los motores fueron considerados de resultado. La materia orgánica en descomposición (MaOrDe) es el producto de la biomasa que ingresa a las rutas metabólicas de los ecosistemas que, a su vez, puede aumentar por diversos factores, como la cantidad de ganado de pastoreo en los humedales (Figura 1). El turismo (Tu) puede ser una alternativa, entre otras, para mitigar los impactos extractivos sobre los ecosistemas; no obstante, para que sea efectiva debe hacerse en torno a ellos, sin generar más afectaciones de las ya existentes. Entre estas está el transporte fluvial (TraFlu), actividad que está en proceso de revisión por parte de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Cormagdalena), que pretende reactivar la navegabilidad en la macrocuenca del río Magdalena desde Barrancabermeja, en el Magdalena Medio, hasta su desembocadura en el Caribe colombiano, con el fin de habilitarlo como una vía de entrada y salida de mercancías e insumos provenientes del centro del país.

## EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA (CCZ), UN ANÁLISIS REGIONAL-LOCAL

Se realizó un ejercicio de cartografía social con las comunidades locales presentes en el CCZ, en el que se identificaron 12 afectaciones presentes en el territorio. Entre ellas, el mal manejo de los residuos sólidos (21,21 %) y su quema (15,15 %) son las de mayor representatividad y frecuencia (Figura 2).



**Figura 2.** Afectaciones y motores de transformación identificados por las

comunidades del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fuente: elaboración propia (2024). A esto se suman acciones que modifican el uso del suelo, como la tala de árboles (12,12 %) para su comercialización, el aumento del tapón que se genera por el incremento de las coberturas del buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) y el uso de redes de pesca inadecuadas (9,09 % para cada caso). Estas acciones afectan las dinámicas de conectividad entre los caños y el complejo cenagoso, y también su biodiversidad. En menor proporción se mencionó el efecto de la apropiación de playones, el desvío de caños para diferentes actividades, la ganadería y el vertimiento de aguas residuales desde todos los centros poblados al complejo cenagoso (6,06 % para cada caso). Finalmente están las acciones de orden público, la pérdida de caños y el vertimiento al agua de la mezcla de gasolina y aceite que se usa para purgar los motores durante el desplazamiento fluvial (3,03 % para cada caso).

La mayor parte de estas actividades son acciones de transformación del suelo y, por tanto, representan una potencial pérdida, ganancia o permanencia de la cobertura presente. Adicionalmente, pueden generar cambios ecológicos en los ecosistemas, lo que incide en la biodiversidad, la calidad del agua, la vegetación y la integridad del CCZ. Su gestión requiere acciones conjuntas y compromiso por parte de todos los actores; si esto no sucede, la estructura ecológica del humedal se perdería y, con ello, la viabilidad del complejo de ciénagas más grande del país.

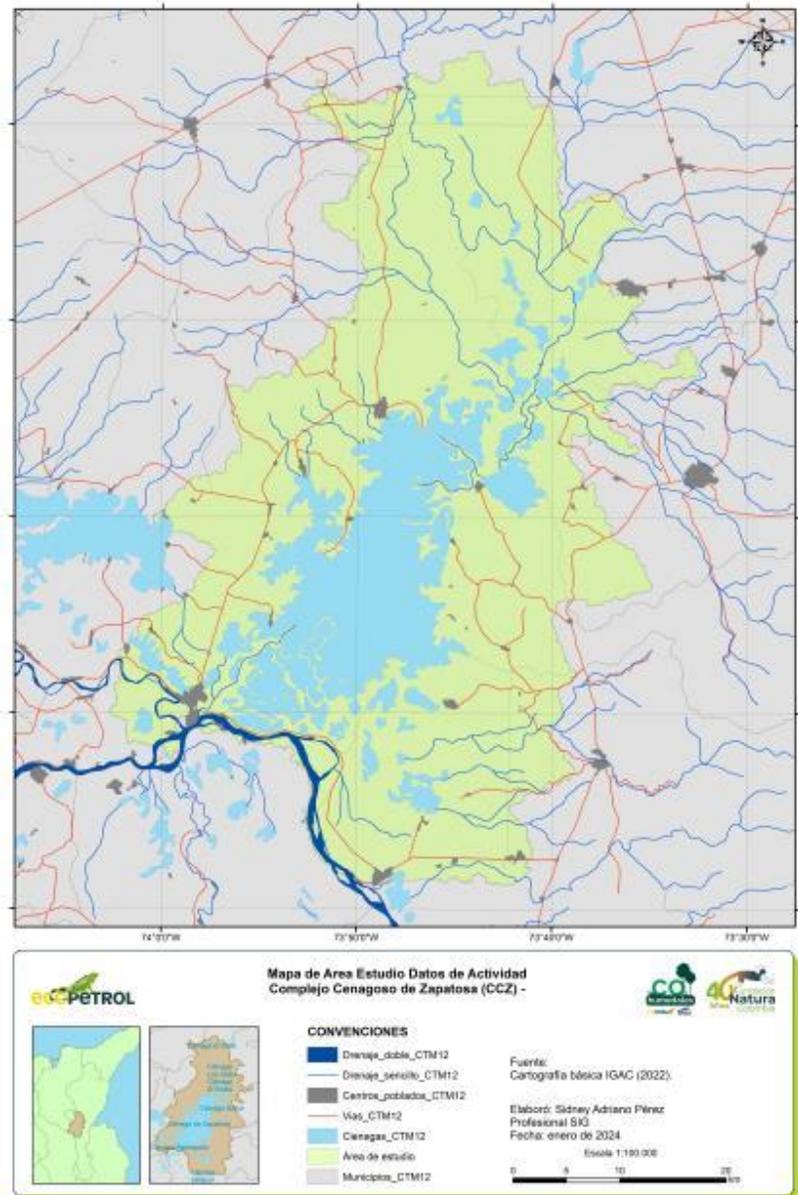
A partir de la identificación y categorización de estos motores de transformación y con el cálculo de los Factores de Emisión (FE-contenidos de carbono de los compartimientos de muestreo), se empezó el proceso de análisis de los DA, en este caso multitemporales, que permiten identificar los cambios en el suelo y uso del suelo (análisis a nivel de coberturas) que han sufrido los humedales del Magdalena Medio y Bajo. A continuación, se presentan los resultados de este proceso validado para la primera ventana piloto de la propuesta de Protocolo, el CCZ.

## **DATOS DE ACTIVIDAD (DA)**

Los resultados acá presentados se basaron en la propuesta metodológica para el monitoreo, reporte y análisis de los DA, los cuales incluyeron espejos de agua en humedales del Magdalena Medio y Bajo, específicamente en el CCZ.

## FASE DE CARACTERIZACIÓN

El área de estudio utilizada para el cálculo de los DA se basó en la caracterización previamente realizada de los humedales del Magdalena Medio y Bajo.



**Figura 3.** Ubicación geográfica del área de estudio del Complejo Cenagoso de Zapatoza. Fuente: elaboración propia (2024).

Además, se llevó a cabo un piloto de validación para el CCZ, de acuerdo con el área de interés definida para el proyecto, en el que se tuvieron en cuenta los

límites del DRMI<sup>2</sup> RAMSAR Complejo Cenagoso de Zapatosa y se complementó con la distribución espacial de las subzonas hidrográficas. El área final se cobijó bajo el concepto operativo de humedales del Magdalena Medio y Bajo planteado en la propuesta de Protocolo (Andramunio-Acero et al., 2024). (Figura 3), y su límite se ubicó entre las coordenadas geográficas CTM 12:

- ┆ Oeste: 4885283,279600 m
- ┆ Este: 4940658,538800 m
- ┆ Norte: 2614805,493100 m
- ┆ Sur: 2536468,427830 m

Teniendo en cuenta esta delimitación, se hizo una revisión bibliográfica documental y cartográfica como insumo preliminar para los cálculos de los DA (Tabla 2, Tabla 3).

**Tabla 2.** Insumos cartográficos para el análisis de información secundaria utilizados para el cálculo de los datos de actividad.

No.	Tipo	Nombre	Fuente	Escala
1	Vector	Coberturas de la tierra período 2000-2002	IDEAM (2012)	1:100 000
2	Vector	Coberturas de la tierra período 2005-2009	IDEAM (2012)	1:100 000
3	Vector	Coberturas de la tierra período 2010-2012	IDEAM (2015)	1:100 000
4	Vector	Coberturas de la tierra periodo 2018	IDEAM(2021)	1:100 000
6	Vector	Humedales de Colombia	MADS (2021)	1:25 000
7	Vector	Humedales Ramsar de Colombia	MADS (2018)	1:25 000
8	Vector	Ecosistemas continentales, marinos y costeros de Colombia	IDEAM (2017)	1:100 000
9	Ráster	Cobertura de Bosque y No Bosque	IDEAM (2019)	1:100 000

Fuente: elaboración propia (2024)

**Tabla 3.** Insumos documentales para el análisis de información secundaria utilizados para el cálculo de los datos de actividad.

No.	Nombre	Fuente
1	Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).	IDEAM et al. (2021)

<sup>2</sup> Distrito Regional de Manejo Integrado.

No.	Nombre	Fuente
2	Protocolo para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero del sector AFOLU en ecosistemas de alta montaña.	IDEAM (2022)
3	Methodological choice and identification of key categories - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 1: General Guidance and Reporting (IPCC).	Eggleston et al. (2006)
4	Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data.	Zhu y Woodcock (2014)
6	Scenario modelling of land use/land cover changes in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands.	Kindu et al. (2017)
7	Land Use/Land Cover Change Analysis Using Object-Based Classification Approach in Munessa-Shashemene Landscape of the Ethiopian Highlands.	Kindu et al. (2013)
8	Trabajo de monitoreo de campo para la estimación de contenidos de carbono por parte del equipo de la Fundación Natura.	Fundación Natura (2023)
9	Predicting Growing Stock Volume of Scots Pine Stands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Airborne Image-Derived Point Clouds.	Hawryło y Wezyk (2018)
10	Sampling techniques.	Cochran (1977)

Fuente: elaboración propia (2024).

Además, se inició con la homologación de coberturas descrita en el Anexo 1<sup>3</sup>; finalmente, se incluyeron los ríos, las lagunas, los lagos y las ciénagas naturales dentro de la categoría de cuerpos de agua del IPCC, por ser esta la cobertura con mayor área y de gran importancia (Tabla 4).

**Tabla 4.** Homologación de coberturas para el cálculo de datos de actividad.

ID	nivel_3_CLC	Código	Usos IPCC	Clase IPCC
1	1.1.1. Tejido urbano continuo	S	Asentamientos	1
2	1.1.2. Tejido urbano discontinuo			
3	1.2.1. Zonas industriales o comerciales			
4	1.2.4. Aeropuertos			
5	1.3.1. Zonas de extracción minera	C	Tierras de cultivos	2
6	2.1.1. Otros cultivos transitorios			
7	2.1.2. Cereales			
8	2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos			
12	2.4.1. Mosaico de cultivos			
14	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales			

<sup>3</sup> Lineamientos estadísticos y de gestión de información para la creación e inclusión de indicadores en el proceso de estimación de contenidos de carbono en el Complejo Cenagoso de Zapotosa.

ID	nivel_3_CLC	Código	Usos IPCC	Clase IPCC
16	2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales			
9	2.3.1. Pastos limpios	G	Pastizales	3
10	2.3.2. Pastos arbolados			
11	2.3.3. Pastos enmalezados			
13	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos			
15	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales			
17	3.1.1. Bosque denso	B	Forestales	4
18	3.1.2. Bosque abierto			
19	3.1.3. Bosque fragmentado			
20	3.1.4. Bosque de galería y ripario			
21	3.1.5. Plantación forestal			
22	3.2.1. Herbazal	HZ	Herbazales	5
23	3.2.2. Arbustal	OVL	Otra vegetación leñosa	6
24	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición			
25	3.3.1. Zonas arenosas naturales	O	Otras tierras	7
26	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas			
27	3.3.4. Zonas quemadas			
28	4.1.1. Zonas pantanosas	W	Humedales	8
29	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua			
30	5.1.1. Ríos	R	Cuerpos de agua	9
31	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales			

Fuente: elaboración propia (2024).

Además de lo anterior, se decidió realizar los análisis entre 2016 y 2022 en periodos bianuales, incluyendo el año 2023, de acuerdo con los momentos de validación de la propuesta de Protocolo y con el régimen hidroclimatológico (temporada de lluvias y temporada seca) (Tabla 5).

**Tabla 5.** Periodos y temporadas propuestas para el análisis de los DA para el Complejo Cenagoso de Zapatosá (CCZ).

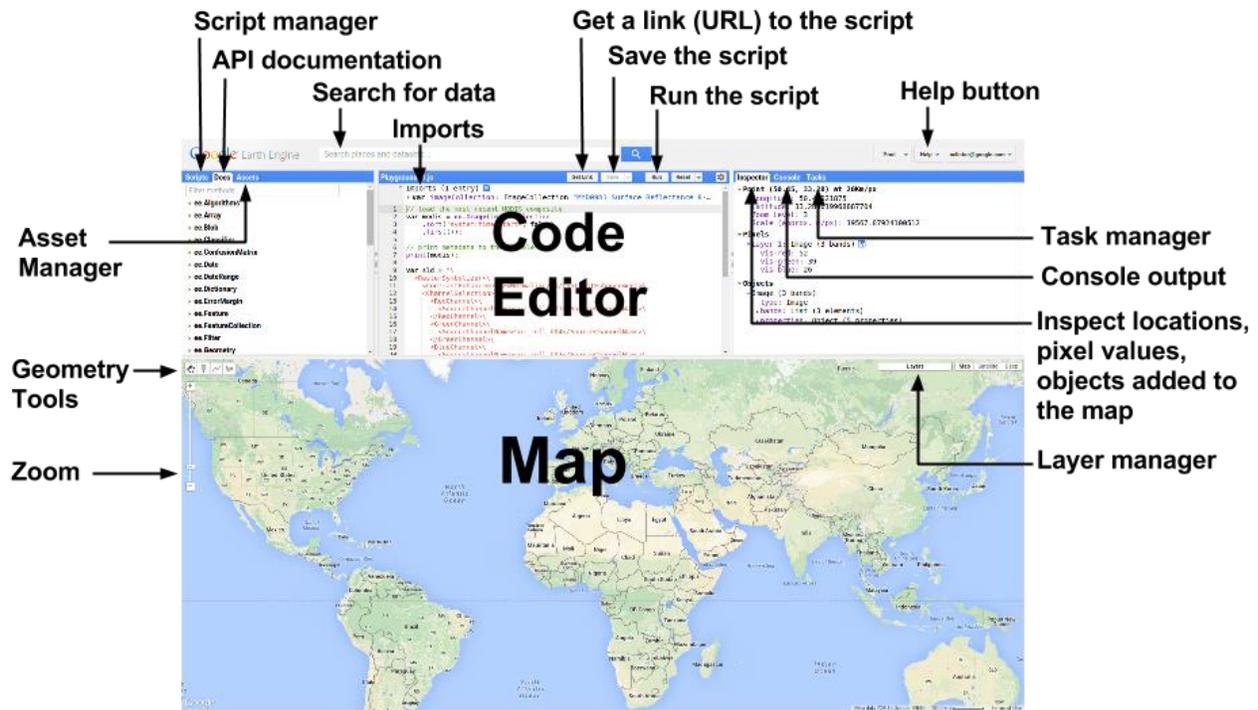
Periodo	Rango de fecha	Temporada
2016	01-12-2015 – 28-02-2016	Seca
	01-06-2016 – 30-11-2016	Lluvias
2018	01-12-2017 – 28-02-2018	Seca
	01-06-2018 – 30-11-2018	Lluvias
2020	01-12-2019 – 28-02-2020	Seca

	01-06-2020 – 30-11-2020	Lluvias
2022	01-12-2021 – 28-02-2022	Seca
	01-06-2022 – 30-11-2022	Lluvias
2023	01-12-2022 – 28-02-2023	Seca
	01-06-2023 – 30-11-2023	Lluvias

Fuente: elaboración propia (2024).

## FASE DE PROCESAMIENTO Y CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

Se seleccionaron imágenes Sentinel 2 para procesar e identificar las coberturas, debido a que poseen ciertos niveles de procesamiento: 12 bandas espectrales con resolución espacial de 10 m, metadatos con información sobre la adquisición de la imagen, la calibración y la geometría, y la corrección atmosférica. De esta manera, se realizó el procesamiento y la clasificación de las imágenes para cada periodo y temporada en el programa Google Earth Engine (GEE) (Figura 4).



**Figura 4.** Visor y editor de código de la plataforma Google Earth Engine; <https://code.earthengine.google.com>. Fuente:

[https://hasencios.github.io/GEE\\_BASIC0\\_SENAMHI/02-code-editor/](https://hasencios.github.io/GEE_BASIC0_SENAMHI/02-code-editor/)

Después, se utilizó un algoritmo<sup>4</sup> para la realización de los primeros filtros: enmascaramiento de nubes, cargue de imágenes definidas en un lapso, recorte de imágenes del área de estudio y generación de mosaicos. El filtro utilizado para la selección de las imágenes por periodo se corrió entre septiembre 01 y noviembre 30 para la temporada de lluvias y entre el 01 de diciembre hasta el 28 de febrero para el tiempo seco; sin embargo, esta premisa no se cumplió en la temporada de lluvias, especialmente por la cantidad de nubes en la imagen. Entonces, para dar solución a esta situación, se utilizó un rango que puede abarcar desde junio 01 hasta noviembre 30, mientras que para el periodo seco sí se conservó el rango temporal definido.

Agregado a lo anterior, el filtro de enmascaramiento tuvo en cuenta el porcentaje de nubes y este se propuso inicialmente del 20 %. No obstante, por la cantidad de nubes de las imágenes, se aceptaron rangos de coberturas de nubes que oscilaron entre el 40 % y el 80 %, a fin de obtener imágenes apropiadas para el trabajo multitemporal.

Para cada período y nivel de cobertura se fijaron entre 200 y 500 puntos de entrenamiento. En ciertos casos se identificaron hasta un máximo de 12 000 puntos por imagen, con base en la distribución de las clases, la experiencia cualitativa del intérprete y la adaptación de la fórmula multinomial (Ecuación 1), lo que ayudó a determinar el número mínimo de puntos de entrenamiento:

**Ecuación 1.** Fórmula de distribución multinomial para el cálculo mínimo de datos por clase, adaptada de Cochran (1977).

$$n = (Z^2 * p * (1 - p)) / (d^2 * e^2)$$

Donde:

*n*: número mínimo de datos por clase

*Z*: valor crítico de la distribución normal para el nivel de confianza deseado (1,96 para un nivel de confianza del 95 %)

*p*: proporción esperada de la clase más pequeña

*d*: precisión deseada (0,05)

*e*: error máximo tolerable (0,05)

---

<sup>4</sup> La información completa se encuentra en las bases de datos del proyecto, que está estructurada en un repositorio virtual. Para una consulta más detallada se recomienda realizar la solicitud oficial directamente a la Fundación Natura.

De esta manera, para 8 clases se estableció un nivel de confianza del 95 %, una precisión deseada del 0,05 y un error máximo tolerable del 0,05; se calculó el número mínimo de datos por clase de la siguiente manera:

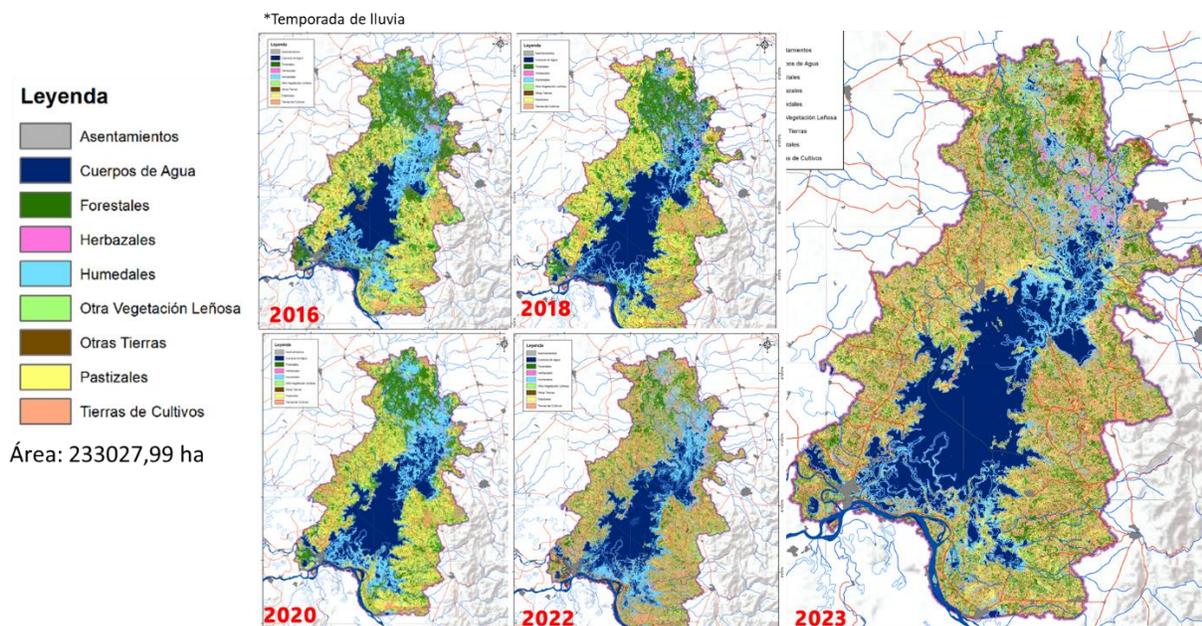
$$n = (1,96^2 * 0,125 * (1-0,125)) / (0,05^2 * 0,05^2)$$
$$n = 240$$

## FASE DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

Una vez realizada la clasificación de coberturas para cada período y escala temporal, se generaron los mapas de coberturas en el programa ArcGIS. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso algebraico con estos mapas, para identificar las variaciones y los cambios en las coberturas.

## COBERTURAS DE LA TIERRA

Se generaron los mosaicos de las coberturas para todos los periodos y las temporadas; es así como en los resultados de las coberturas de la temporada de lluvias se observó que la menor cobertura en los cinco (5) periodos fueron los asentamientos, lo cual es coherente al referirlo a capas relacionadas con centros poblados y a las coberturas de la tierra oficiales. Sin embargo, estas coberturas tuvieron leves cambios en los diferentes periodos, sin que fuera evidente un aumento o una disminución, debido posiblemente a que el algoritmo, al realizar la operación por píxeles, marca al interior de una zona urbana o centro poblado. Por otro lado, la vegetación natural y los cuerpos de agua, entre otros, pudieron confundirse con las características espectrales de algunas coberturas relacionadas con zonas abiertas o posiblemente con la existencia de vacíos o nubes en las imágenes (Figura 5, Tabla 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



**Figura 5.** Mosaico de las coberturas de la tierra en temporada de lluvias para los periodos 2016-2023 para el Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fuente: elaboración propia (2024).

También se observó que en los periodos evaluados la mayor cobertura son los pastizales, mientras que las coberturas de humedales, herbazales y cuerpos de agua son menores (Tabla 6). Esta tendencia puede darse por los siguientes motivos: (i) el área de interés es mayor que el área de cuerpos de agua, (ii) las actividades económicas predominantes son los cultivos y pastos, y (iii) la presencia de nubes que cubren las superficies de los cuerpos de agua y sus alrededores (humedales). Sin embargo, se pudo observar que en el año comprendido entre 2022 y 2023 las coberturas de pastos disminuyeron; esto tiene dos posibles explicaciones: que los cuerpos de agua y los humedales hayan abarcado zonas donde anteriormente existían los pastizales o que el algoritmo de clasificación haya confundido pastizales con tierras de cultivos y herbazales.

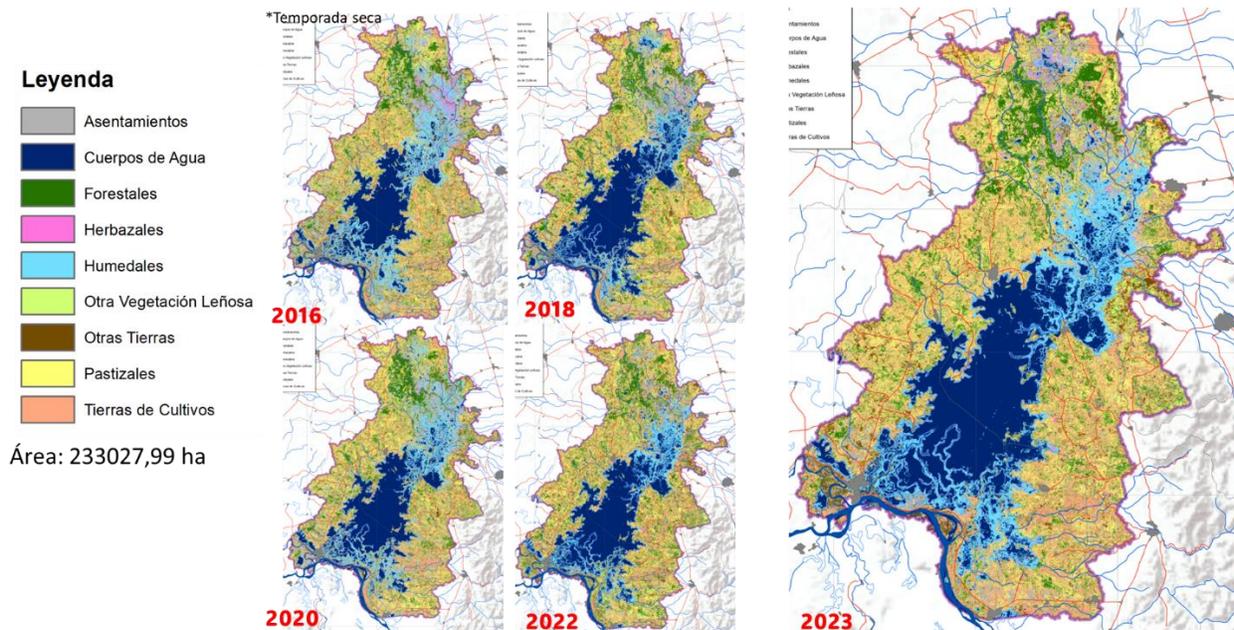
**Tabla 6.** Área de las coberturas de la tierra en temporada de lluvias para los periodos 2016-2023 en el Complejo Cenagoso de Zapatosa.

Uso IPCC	Área (ha) 2016	Área (ha) 2018	Área (ha) 2020	Área (ha) 2022	Área (ha) 2023
Asentamientos	788,42	729,07	1002,01	1397,93	1184,69
Herbazales	5171,66	5385,70	3267,09	6780,21	5252,16
Tierras de cultivos	8055,39	13 568,23	10 539,02	38 432,01	43 459,42

Uso IPCC	Área (ha) 2016	Área (ha) 2018	Área (ha) 2020	Área (ha) 2022	Área (ha) 2023
Otras tierras	15 709,23	14 229,40	11 461,38	13 531,21	12 170,48
Otra vegetación leñosa	16 242,34	13 432,75	14 640,26	13 841,04	13 354,78
Cuerpos de agua	36 777,98	57 117,54	51 646,31	49 895,86	51 591,19
Humedales	42 703,62	28 238,36	39 549,74	32 545,26	21 539,13
Forestales	45 587,08	39 523,09	40 138,39	29 051,00	31 961,35
Pastizales	61 992,23	60 803,85	60 783,76	47 553,49	52 514,77
Total	233 027,99	233 027,99	233 027,99	233 027,99	233 027,99

Fuente: elaboración propia (2024).

Adicionalmente, los asentamientos tienen un área mayor en la temporada seca que en la de lluvias; se considera que la mayor visibilidad que hay en la temporada seca pudo permitirle al algoritmo identificar mejor las características espectrales de los asentamientos. En cuanto a las coberturas naturales, los herbazales ocupan la menor proporción, probablemente porque el espacio en épocas secas es ocupado por los pastizales y cultivos. Por otro lado, también en esta temporada los pastizales son la mayor cobertura presente y, por debajo de ellos, se encuentran los cuerpos de agua y los humedales. Esto, posiblemente se debe a que en esta época el régimen climático disminuye su área y aumentan otras coberturas como pastos, cultivos, herbazales, etc. (Figura 6, Tabla 7).



**Figura 6.** Mosaico de las coberturas de la tierra en temporada seca para los periodos 2016-2023 en el Complejo Cenagoso de Zapatosá. Fuente: elaboración propia (2024).

**Tabla 7.** Área de las coberturas de la tierra en temporada seca para los periodos 2016-2023 en el Complejo Cenagoso de Zapatosa.

Uso IPCC	Área (ha) 2016	Área (ha) 2018	Área (ha) 2020	Área (ha) 2022	Área (ha) 2023
Asentamientos	1518,09	1493,68	1373,93	1398,62	1501,02
Herbazales	7761,96	6681,72	4464,38	3574,03	5494,49
Otra vegetación leñosa	14 844,60	12 644,12	14 303,92	14 825,68	15 303,61
Otras tierras	15 414,04	13 700,85	11 654,56	14 578,18	14 393,89
Forestales	26 068,93	29 304,22	28 108,76	29 721,41	24 796,64
Humedales	34 324,12	26 666,15	31 680,81	24 138,31	28 620,85
Cuerpos de agua	36 180,19	52 985,18	44 348,75	48 590,81	48 522,3
Tierras de cultivos	38 689,24	35 770,51	43 001,71	43 260,84	42 848,59
Pastizales	58 226,86	53 781,56	54 091,16	52 940,11	51 546,6
Total	233 027,99	233 027,99	233 027,99	233 027,99	233027,99

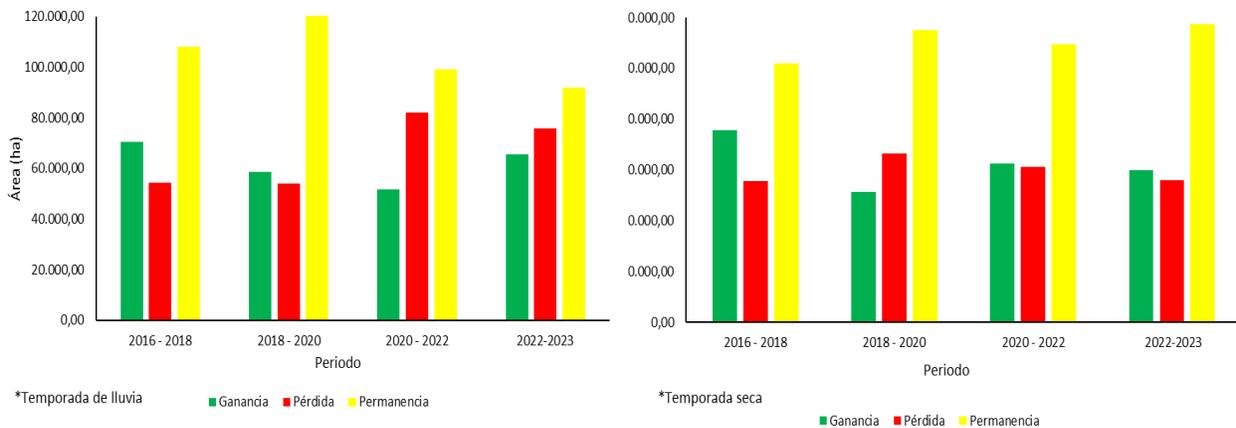
Fuente: elaboración propia (2024).

### Cambios: pérdida, ganancia o permanencia

El CCZ experimentó cambios en las temporadas de lluvia y sequía durante los periodos 2016-2018, 2018-2020, 2020-2022 y 2022-2023, los cuales se analizaron para evaluar las variaciones en las coberturas del suelo, diferenciando las pérdidas, ganancias o permanencias de estas. Así, se logró una mejor comprensión de la variabilidad de la superficie terrestre en momentos climáticos análogos (Figura 7, Tabla 8). La permanencia o estabilidad emerge como el cambio más significativo en los análisis de DA y se atribuye, en gran parte, a la inclusión de los cuerpos de agua que poseen una gran extensión y conservan una porción considerable de su área de forma permanente. Es así como esta característica contribuyó a minimizar los cambios por pérdida o ganancia de cobertura, lo que explica la prevalencia de la estabilidad como el cambio dominante.

Por otro lado, el análisis reveló una dinámica: en la temporada de lluvias hay una tendencia creciente de pérdidas de coberturas en general, mientras que la ganancia presenta una leve disminución en tres periodos. Esto puede atribuirse a la dinámica de las coberturas de pastos, herbazales y humedales en relación con los cuerpos de agua. Es posible que durante la época de precipitaciones abundantes, el agua se expanda a expensas de estas coberturas, lo que genera un aumento en las pérdidas y una disminución en la ganancia.

En contraste, en la temporada seca hay una menor tasa de pérdidas y una tendencia a la disminución en la ganancia, lo que podría indicar una menor alteración de las coberturas y un predominio de la estabilidad. Sin embargo, cabe destacar que la interpretación de los resultados podría verse afectada por la presencia de nubosidad, especialmente durante la temporada de lluvias, lo que incide en la estimación de las pérdidas y ganancias de las coberturas.



**Figura 7.** Ganancia, pérdida o permanencia de coberturas de la tierra en la temporada de lluvias y la temporada seca en el Complejo Cenagoso de Zapatos. Fuente: elaboración propia (2024).

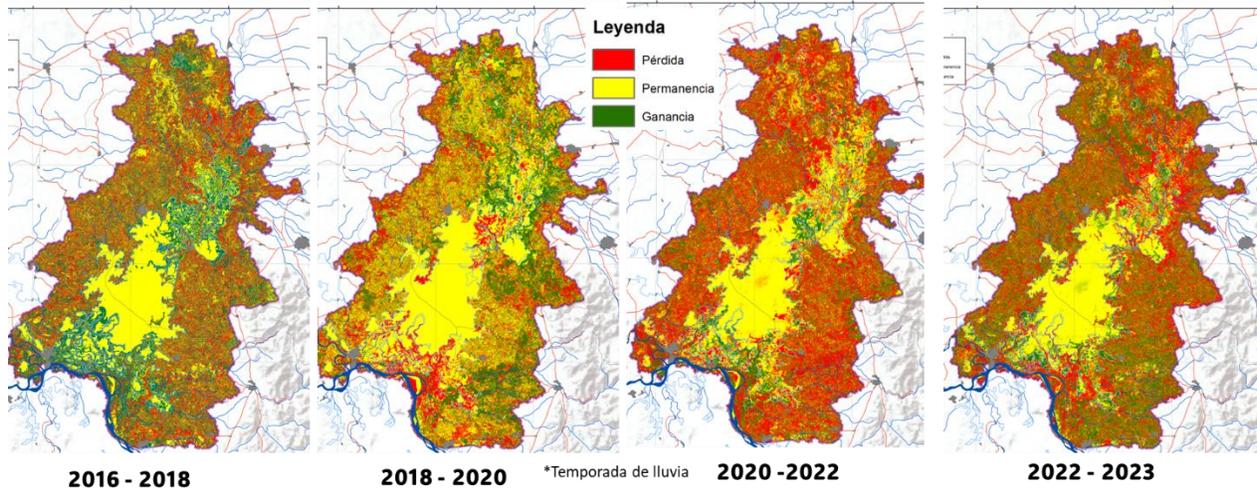
**Tabla 8.** Datos de ganancia, pérdida o permanencia de coberturas de la tierra en la temporada de lluvias y la temporada seca en el Complejo Cenagoso de Zapatos.

Temporada	Periodo	Ganancia (ha)	Pérdida (ha)	Permanencia (ha)
Lluvia	2016-2018	70 455,65	54 357,15	108 215,19
	2018-2020	58 809,05	53 970,29	120 248,65
	2020-2022	51 867,87	82 096,61	99 063,50
	2022-2023	65 423,47	75 639,55	91 964,97
Seca	2016-2018	75 569,11	55 632,79	101 826,09
	2018-2020	51 424,78	66 393,11	115 210,11
	2020-2022	62 406,20	61 250,04	109 371,75
	2022-2023	59 881,13	55 794,86	117 352,01

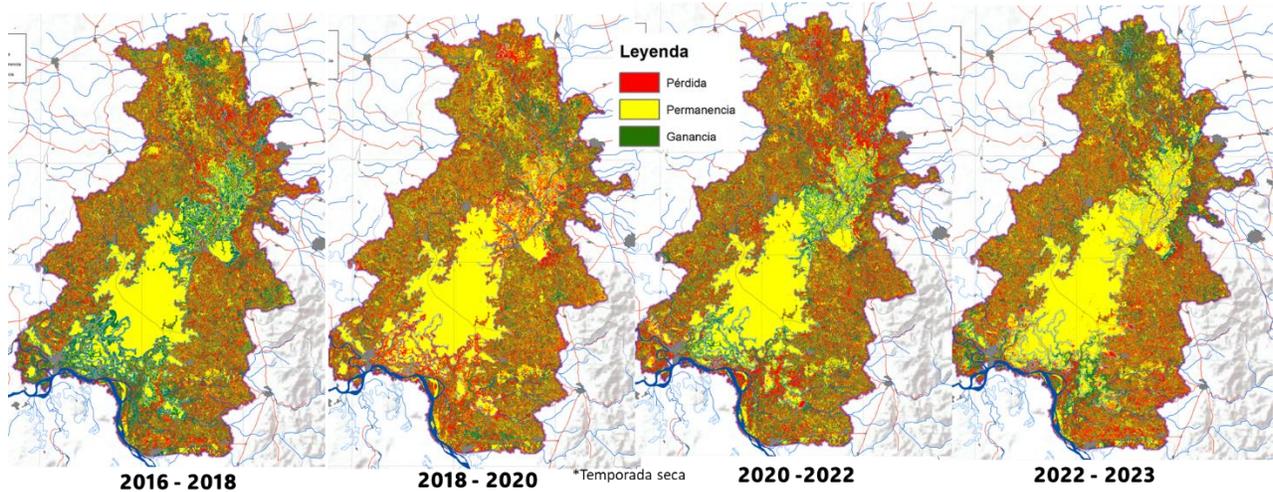
Fuente: elaboración propia (2024).

Relacionado con lo anterior, el análisis de cambios y permanencias reveló patrones específicos en las áreas circundantes a las ciénagas del CCZ. Es así como se identificaron zonas donde las coberturas de cuerpos de agua experimentaron una reducción, lo que coincidió con un aumento en las coberturas asociadas a humedales, pastizales y herbazales. Esa dinámica reflejó

una relación inversa entre estas coberturas, en la que la disminución de una implica el aumento de la otra, sin que necesariamente las nuevas coberturas superen la extensión de las originales o entre sí (Figura 8, Figura 9).



**Figura 8.** Mapa de pérdida, ganancia o permanencia de coberturas de la tierra en la temporada de lluvias en el Cenagos de Zapatos. Fuente: elaboración propia (2024).



**Figura 9.** Mapa de pérdida, ganancia o permanencia de coberturas de la tierra en la temporada seca en el Complejo Cenagos de Zapatos. Fuente: elaboración propia (2024).

### Cambios entre las diferentes coberturas

Una vez identificadas las áreas de pérdida, ganancia y permanencia, se analizaron los cambios en las diversas coberturas. Este análisis se llevó a cabo utilizando la fórmula desarrollada por Kindu et al.(2013), referenciada por Kindu

et al. (2020). Esta fórmula se adaptó para relacionar los cambios de cobertura a través de un proceso algebraico de capas ráster en el *software* ArcGIS en los distintos periodos y en cada temporalidad específica (Ecuación 2).

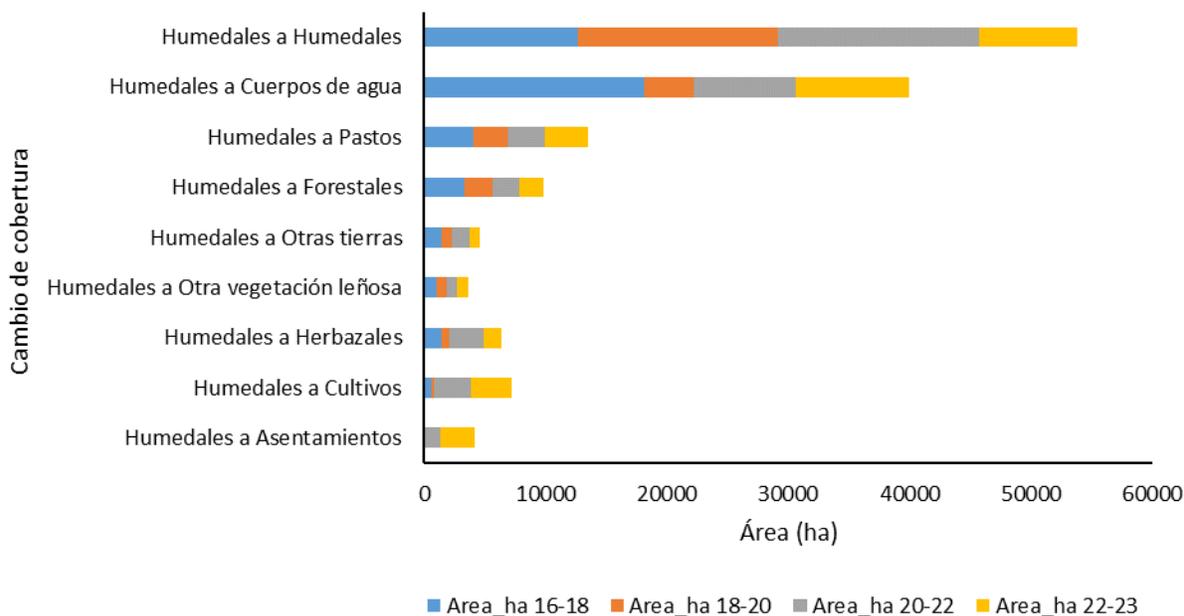
**Ecuación 2** Fórmula de identificación de cambios de cobertura adaptada de Kindú et al. (2013).

$$\Delta Coberturas = Area t2 * 10 + Area t1$$

De esta manera, se realizaron los cálculos para identificar los cambios de las coberturas de acuerdo con la propuesta del IPCC (Eggleston, et al. 2006).

- ┆ Subcategoría 3B1biii: humedales convertidos en tierras forestales
- ┆ Subcategoría 3B2biii: humedales convertidos en tierras de cultivos
- ┆ Subcategoría 3B3biii: humedales convertidos en pastizales
- ┆ Subcategoría 3B4a: humedales que permanecen como tales
- ┆ Subcategoría 3B4bi: tierras forestales convertidas en humedales
- ┆ Subcategoría 3B4bii: tierras de cultivos convertidas en humedales
- ┆ Subcategoría 3B4biii: pastizales convertidos en humedales

De acuerdo con lo anterior, se agruparon las categorías de conversión de humedales a cualquier cobertura o de cualquier cobertura a humedales, para presentar de manera general la información relacionada con la conversión o permanencia de humedales. Es así como en la temporada de lluvias, la cobertura de humedal permanece como tal en los periodos analizados, y se dio una asociación directa entre las coberturas de humedal y su transformación a cuerpos de agua, hecho que ratifica que hay una relación de pérdida y ganancia de estos usos, ya que se observa una menor conversión a las otras categorías (Figura 10, Tabla 9).



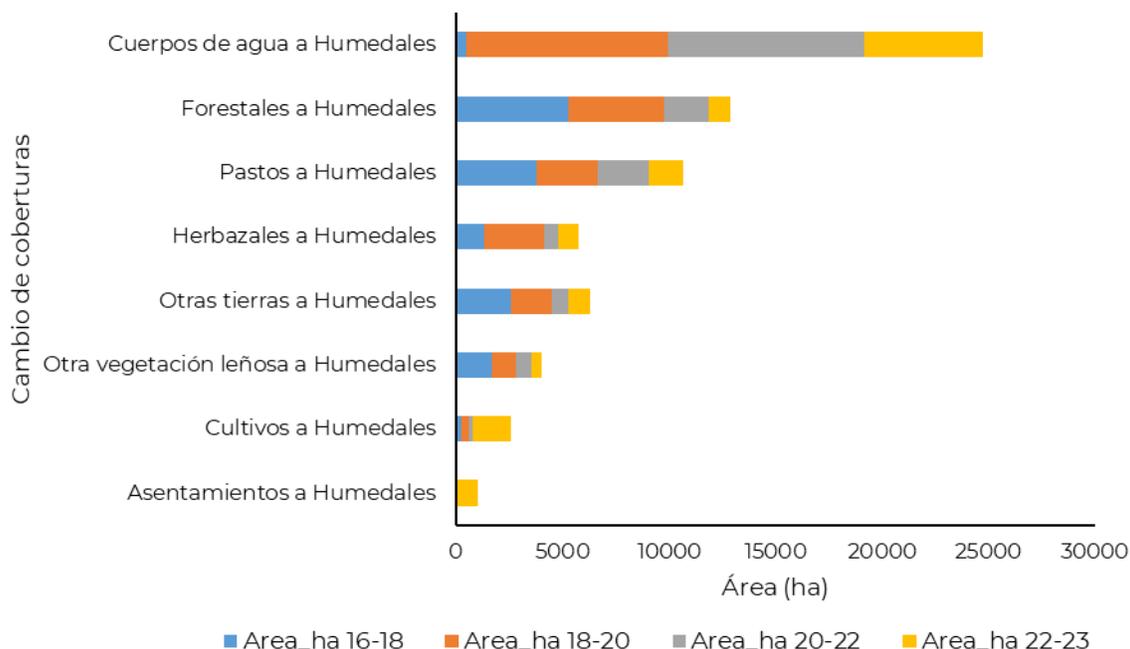
**Figura 10.** Cambios de coberturas de humedales a otras o con permanencia de humedales durante la temporada de lluvias en el CCZ. Fuente: elaboración propia (2024).

**Tabla 9.** Relación de datos de cambios de humedal a otras coberturas en los cuatro periodos y en la temporada de lluvias en el CCZ.

Cambios de cobertura	Área (ha) 2016-2018	Área (ha) 2018-2020	Área (ha) 2020-2022	Área (ha) 2022-2023
Humedales a Asentamientos	25,68	25	1246,92	2895,21
Humedales a Cultivos	597,1	212,1	3035,85	3326,74
Humedales a Herbazales	1436,47	635,2	2776,47	1531,35
Humedales a Otra vegetación leñosa	976,32	838,13	897,08	907,3
Humedales a Otras tierras	1421,73	865,54	1430,99	914,13
Humedales a Forestales	3347,29	2329,89	2145,57	1965,06
Humedales a Pastos	4072,3	2801,74	3043,18	3567,5
Humedales a Cuerpos de agua	18 121,46	4072,47	8434,9	9290,46
Humedales a Humedales	12 703,97	16 458,29	16 538,09	8174,16

Fuente: elaboración propia (2024).

También se ratifica que en la temporada de lluvias hay una relación entre las coberturas de cuerpo de agua y los humedales, por ser esta la mayor transformación de superficie (Figura 11, Tabla 10).



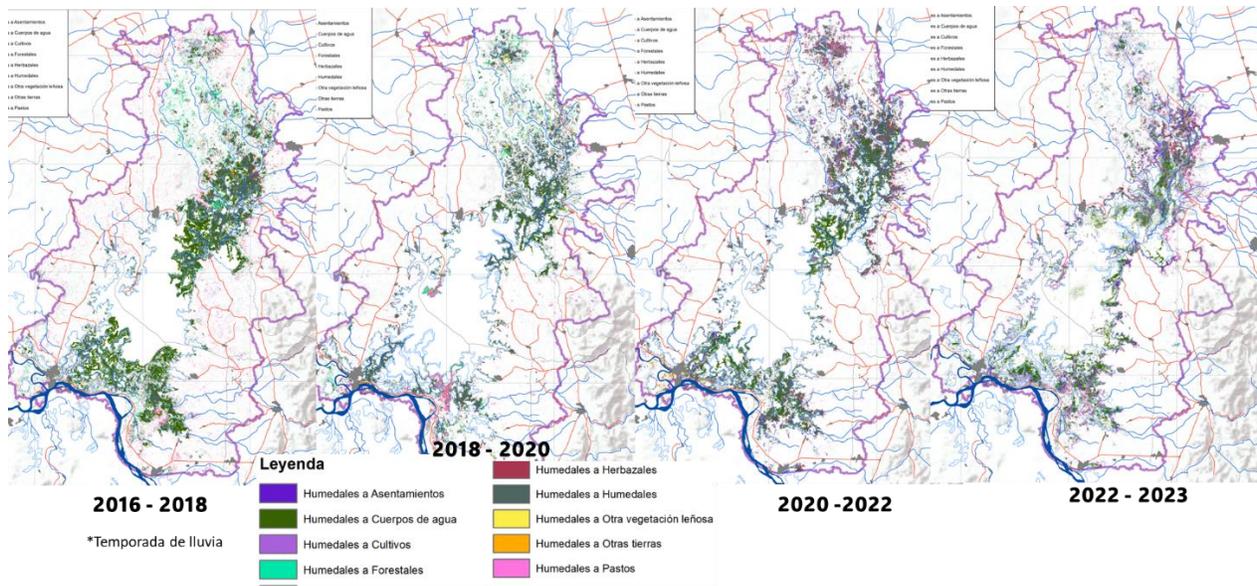
**Figura 11.** Coberturas diferentes transformadas en humedales durante la temporada de lluvias y para los cuatro periodos en el CCZ. Fuente: elaboración propia (2024).

**Tabla 10.** Relación de datos de cambios de diferentes coberturas convertidas en humedales durante la temporada de lluvias en el CCZ.

Cambios de coberturas a humedales	Área (ha) 2016-2018	Área (ha) 2018-2020	Área (ha) 2020-2022	Área (ha) 2022-2023
Asentamientos a Humedales	17,01	19,06	9,34	1011,82
Cultivos a Humedales	286,18	355,2	165,38	1780,87
Otra vegetación leñosa a Humedales	1686,05	1170,18	716,68	450,14
Otras tierras a Humedales	2611,19	1914,71	775,94	974,2
Herbazales a Humedales	1360,26	2814	659,22	917,18
Pastos a Humedales	3781	2905,67	2376,28	1602,62
Forestales a Humedales	5299,03	4451,33	2134,91	1028,86
Cuerpos de agua a Humedales	492,44	9460,61	9196,07	5581,31

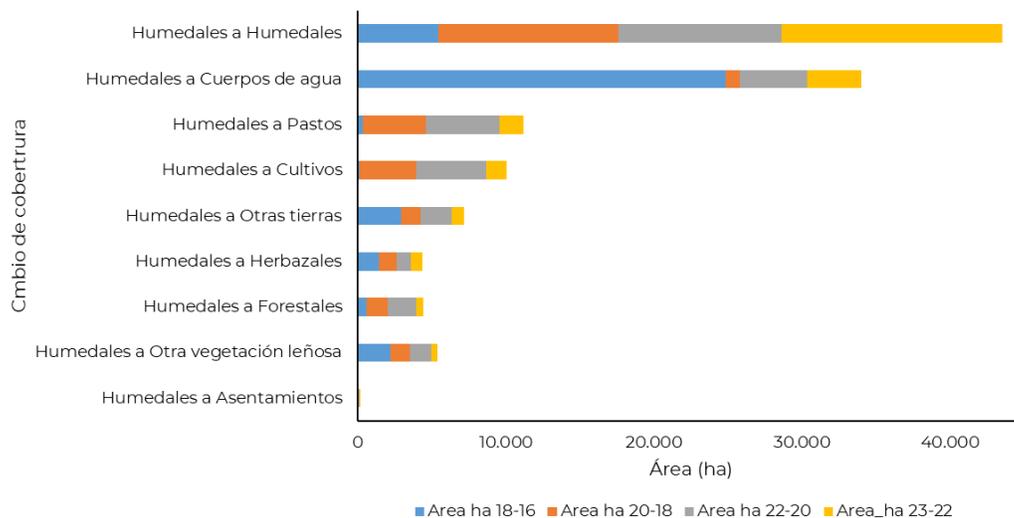
Fuente: elaboración propia (2024).

Adicionalmente, en la Figura 11 se observa la predominancia de la permanencia de las coberturas de humedal y de la transformación a cuerpos de agua principalmente.



**Figura 11.** Mapa de cambio de coberturas de humedales convertidos en diferentes coberturas durante la temporada de lluvias. Fuente: elaboración propia (2024).

Por otro lado, durante la temporada seca se cumple la misma relación de transformación de coberturas, con mayor representación de permanencia de los humedales, para luego cambiar a cuerpos de agua; sin embargo, en esta temporada dicha transformación no es tan alta, probablemente por el régimen climático de la disminución de lluvias y la consecuente disminución de las superficies de agua (Figura 123, Tabla 11).



**Figura 12.** Humedales con cambios a otras coberturas o con permanencia de humedales durante la temporada seca. Fuente: elaboración propia (2024).

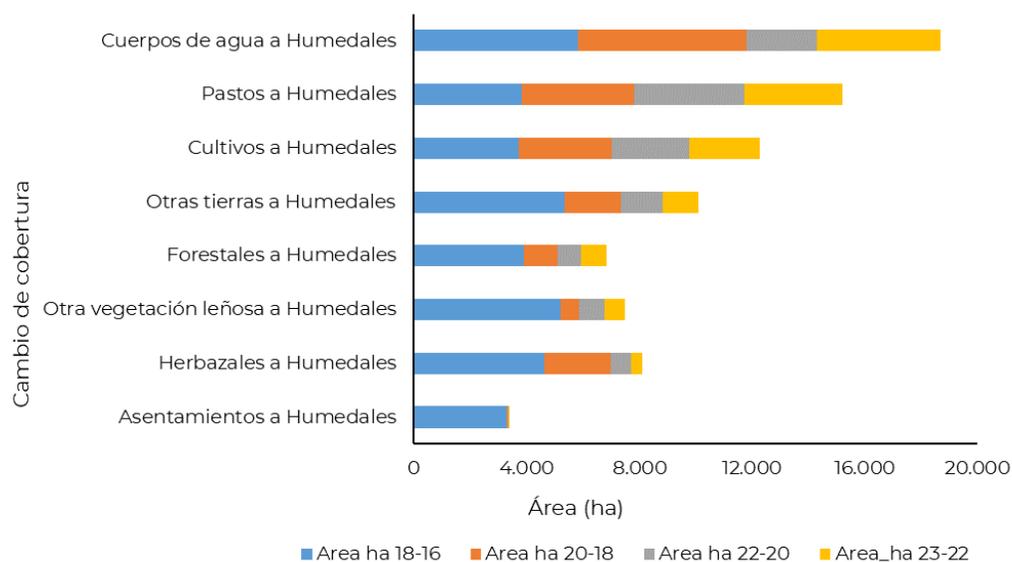
**Tabla 11.** Relación de datos de cambios de humedal a otras coberturas en los cuatro

periodos y en la temporada seca en el CCZ.

Cambio	Área (ha) 2016-2018	Área (ha) 2018-2020	Área (ha) 2020-2022	Área (ha) 2022-2023
Humedales a Asentamientos	24,35	46,54	41,44	36,05
Humedales a Otra vegetación leñosa	2195,88	1347,93	1428,46	413,96
Humedales a Forestales	564,47	1471,90	1925,94	487,62
Humedales a Herbazales	1414,86	1220,59	937,86	779,46
Humedales a Otras tierras	2917,66	1329,52	2087,67	850,79
Humedales a Cultivos	111,35	3835,05	4722,66	1385,67
Humedales a Pastos	321,06	4256,90	4992,98	1617,87
Humedales a Cuerpos de agua	24 873,21	963,73	4514,90	3646,17
Humedales a Humedales	5426,16	12 194,04	11 029,13	14 920,98

Fuente: elaboración propia (2024).

Por otro lado, durante esa misma temporada, la transformación de cuerpos de agua a humedales es la más notoria a causa de la baja precipitación y de la disminución de agua en estos. También se observa una alta transformación de pastos, cultivos y asentamientos a humedales, debido a que el algoritmo pudo confundir las características espectrales de algunas coberturas relacionadas con pastos, cultivos, zonas abiertas y humedales, y esto afectó los resultados de cambios (Figura 13, Tabla 12).



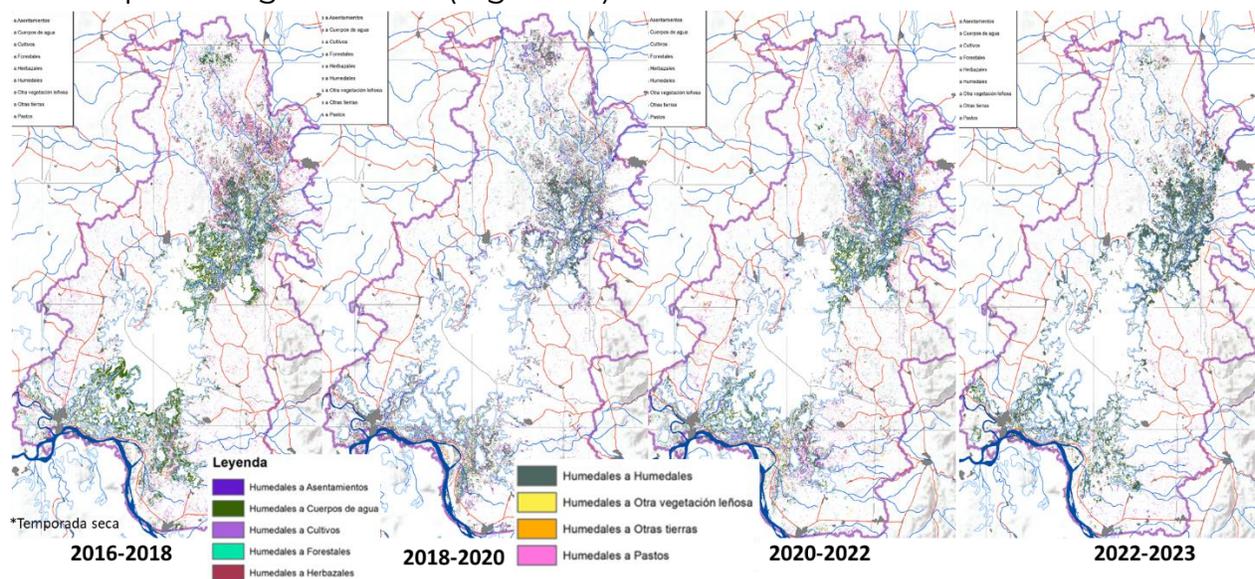
**Figura 13.** Coberturas diferentes convertidas en humedales durante la temporada seca en el CCZ. Fuente: elaboración propia (2024).

**Tabla 12.** Relación de datos de cambios de coberturas convertidas en humedales durante la temporada seca en el CCZ.

Cambio	Área ha 2016-2018	Área ha 2018-2020	Área ha 2020-2022	Área ha 2022-2023
Asentamientos a Humedales	2928,46	682,83	2084,32	1392,08
Cuerpos de agua a Humedales	247,33	5997,81	2478,52	4607,08
Cultivos a Humedales	3035,8	3274,2	2768,35	168,21
Forestales a Humedales	1508,66	1187,1	826,99	385,59
Herbazales a Humedales	2220,12	2361,02	707,98	494,13
Otra vegetación leñosa a Humedales	902,91	643,04	871,78	1246,84
Otras tierras a Humedales	1600,31	1990,34	1461,73	349,29
Pastos a Humedales	3202,48	3331,57	1860,9	2965,57

Fuente: elaboración propia (2024).

De acuerdo con los anteriores resultados, se observa que las coberturas de humedales se conservan y son las de mayor permanencia durante la temporada seca. Probablemente, esto se debe a que están conformadas por vegetación acuática y zonas pantanosas, que se conservan durante esa época, de tal forma que predomina la cobertura de humedales y la transformación de los cuerpos de agua a estos (Figura 14).

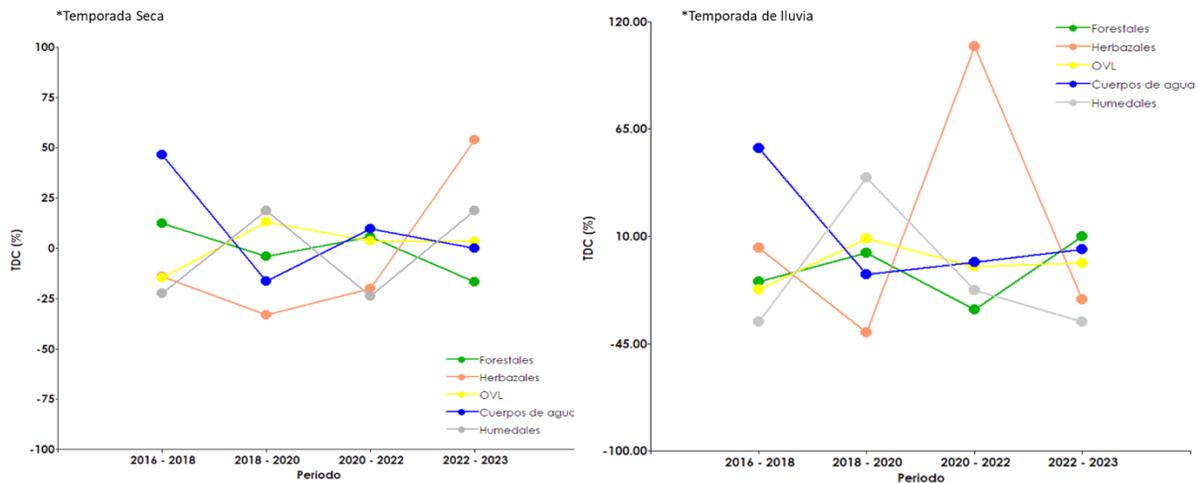


**Figura 14.** Mapa de cambio de coberturas de humedales convertidos en diferentes coberturas durante la temporada seca. Fuente: elaboración propia (2024).

## INDICADOR DE CAMBIO: TASA PROMEDIO ANUAL DE CAMBIO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR DIFERENTES COBERTURAS

Este indicador corresponde a la variación de la superficie cubierta por coberturas naturales en dos periodos de tiempo (t1, t2). De esta manera, tiene valores positivos y negativos que, para este caso, oscilan entre -40 y 105 % para

la temporada de lluvias y de -34 a 56 % para la temporada seca (Figura 15, Tabla 13).



**Figura 15.** Tasa de Cambio (TDC) de las coberturas naturales durante los periodos y las dos temporadas hidroclimatológicas en el Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fuente: elaboración propia (2024).

Adicionalmente, se observa una fluctuación muy alta en las coberturas de herbazales, especialmente en el periodo 2020-2022, cuando sobrepasa el límite del 100 %, debido posiblemente a la alta nubosidad de las imágenes y a que el algoritmo pudo relacionar estas coberturas con pastos o con humedales.

También se observa que los cuerpos de agua tienden a disminuir su superficie, situación que amerita un monitoreo para conocer la fluctuación de esta o su disminución total. Igualmente, la tasa de las coberturas de forestales tiene una tendencia decreciente, lo que señala la importancia de fomentar los monitoreos del CCZ.

**Tabla 13.** Tasa de cambio de las coberturas naturales por periodos y en las dos temporadas hidroclimatológicas en el CCZ.

Uso IPCC	Periodo	Temporada de lluvias	Temporada Seca
Cuerpos de agua	2018-2016	55,3	46,45
	2020-2018	-9,58	-16,3
	2022-2020	-3,39	9,57
	2023-2022	3,4	-0,14
Forestales	2018-2016	-13,3	12,41
	2020-2018	1,56	-4,08
	2022-2020	-27,62	5,74
	2023-2022	10,02	-16,57
Herbazales	2018-2016	4,14	-13,92

	2020-2018	-39,34	-33,19
	2022-2020	107,53	-19,94
	2023-2022	-22,54	53,73
Humedales	2018-2016	-33,87	-22,31
	2020-2018	40,06	18,81
	2022-2020	-17,71	-23,81
	2023-2022	-33,82	18,57
Otra vegetación leñosa	2018-2016	-17,3	-14,82
	2020-2018	8,99	13,13
	2022-2020	-5,46	3,65
	2023-2022	-3,51	3,22

Fuente: elaboración propia (2024).

## CONCLUSIONES

- ✦ La agricultura, la ganadería y los monocultivos de gran extensión son los motores de transformación de mayor importancia en las tierras medias y bajas de la macrocuenca Magdalena-Cauca. Esto se asocia con la tenencia de la tierra y, por eso, las decisiones tomadas desde el Estado, en conjunto con los sectores productivos, deben buscar acuerdos para atender estos temas y para impulsar buenas prácticas que mitiguen los efectos del cambio climático.
- ✦ La degradación del hábitat es la resultante de todas las presiones actuales relacionadas con los usos del suelo. Se requiere enfocar esfuerzos para disminuir estos impactos, especialmente mediante acuerdos sobre el uso del suelo que tengan implicaciones para la conservación de los ecosistemas de humedal y su biodiversidad.
- ✦ Incluir los ríos, las lagunas, los lagos y las ciénagas naturales dentro de la homologación de los usos del suelo del IPCC hizo la diferencia para entender la relación de estas coberturas con otras, como humedales y herbazales.
- ✦ La definición de los periodos bianuales, desde 2016 hasta 2022, incluyendo el año 2023, coincide con la temporalidad de los informes bienales de actualización para el cambio climático, razón por la cual se recomienda trabajar con estos periodos para que en un futuro puedan ser tenidas en cuenta en las comunicaciones nacionales.
- ✦ Adicionalmente, para el área de estudio, desde el 2016, se encontraron imágenes Sentinel-2 de 12 bandas espectrales y con resolución espacial de 10 m, las cuales fueron procesadas con algoritmos de GEE y ArcGIS, en una buena comunión de insumos y herramientas gratuitas con herramientas

comerciales.

- ✦ La elaboración de dos temporadas, una de lluvia y otra seca, para el CCZ, tiene pocos beneficios al hacer el cálculo de los DA, por lo siguiente:
  - En temporada de lluvias las imágenes pueden llegar a estar cubiertas hasta el 100 % y la utilización de los filtros puede no dar la solución completa. Por ende, es necesario ampliar el rango temporal para generar el mosaico; en este caso, se debió ampliar de junio a noviembre. Igualmente, en temporadas secas pueden existir nubes en el mosaico y la reflectancia puede afectar el proceso de interpretación; no obstante, son mejores las imágenes de esta temporada.
  - Para realizar el estudio en las dos temporadas se requiere de un recurso humano amplio, profesional y especializado para el procesamiento de imágenes, al igual que equipos robustos para el procesamiento de los insumos, lo que puede aumentar los costos del estudio.
  - También se genera una expectativa alta de querer comparar las dos temporadas en el mismo periodo, lo que puede ser contraproducente, ya que hay que separar el impacto de las estaciones climáticas.
- ✦ A partir de la adaptación de una fórmula multinomial se fijaron entre 200 y 500 puntos de entrenamiento para cada cobertura, y se llegaron a generar hasta 12000 puntos por imágenes.
- ✦ Se observó que la menor cobertura en los periodos y temporadas son los asentamientos, lo cual es coherente con capas relacionadas con centros poblados y con las coberturas de la tierra oficiales. Sin embargo, estas coberturas son menores que las oficiales, debido a que el algoritmo identifica otras coberturas al interior del asentamiento.
- ✦ En los periodos y temporadas las mayores coberturas son los pastizales, situación que se da porque el área de interés abarca un área mayor y con tierras dedicadas a cultivos y pastos, ya que las actividades económicas de la región están dirigidas, entre otras, a actividades agropecuarias.
- ✦ La permanencia o estabilidad es el cambio con mayor representatividad. La inclusión de los cuerpos de agua en los análisis de los DA contribuyó a que los cambios por pérdida o ganancia fueran menores, debido a que son la cobertura de mayor área en el complejo cenagoso, en la mayoría de los periodos, y a que conservan parte de su extensión de manera permanente.
- ✦ También se observaron cambios de pérdida y ganancia alrededor de las ciénagas del CCZ. De este modo, cuando las coberturas de cuerpo de agua disminuyen, aumentan las asociadas con humedales, pastizales y herbazales o viceversa; es decir, disminuyen las de agua y aumentan las

otras.

- ✦ La fórmula adaptada de Kindu et al. (2013) fue útil para analizar los cambios entre las diversas coberturas, mediante procesos algebraicos ráster, y no hubo la necesidad de hacer procesos vectoriales, que requieren mayor consumo de máquina, de tiempo y de recursos para un área tan grande como la del CCZ.
- ✦ La cobertura de humedal permanece como tal en los periodos analizados; se hizo una asociación directa del paso de coberturas de humedal a cuerpos de agua, lo que ratifica que hay una relación de pérdida y ganancia de estos usos, ya que se observa una menor conversión a las otras categorías.
- ✦ Así mismo, se observa que las coberturas de humedales se conservan y son las de mayor permanencia en épocas secas, debido a su conformación por vegetación acuática y zonas pantanosas, que perduran durante esas temporadas. Así, predomina la permanencia de las coberturas de humedales y la transformación de los cuerpos de agua a estas.
- ✦ El indicador TCN mostró una fluctuación muy alta en las coberturas de herbazales, hasta llegar a sobrepasar el límite del 100 %. Esto se debe a la alta nubosidad de las imágenes y a que el algoritmo pudo relacionar estas coberturas con pastos o con humedales. También se observó que los cuerpos de agua y las coberturas forestales tienden a disminuir su superficie.

## RECOMENDACIONES

El análisis prospectivo es una herramienta de gestión territorial de fácil manejo. Apoyarse en información secundaria y complementar con acercamientos locales a los actores presentes en el territorio establece un marco operativo para el ejercicio. Conceptualizar cada motor es fundamental para un análisis correcto. Asumir el territorio como un escenario estático es inapropiado, y hay que apoyarse en las observaciones propias y replantear la actividad siempre que se considere que sea necesario.

En la actualidad hay insumos y herramientas tecnológicas gratuitas que pueden ser utilizadas en proyectos de esta magnitud; sin embargo, es importante contar con un equipo humano amplio y especializado que pueda realizar los trabajos. Adicionalmente, si se requiere generar la información por temporadas, según el régimen climático, es importante contar con insumos como imágenes radar o LiDAR, que disminuyan el efecto de la nubosidad.

Se deben utilizar todos los insumos existentes para ampliar el conocimiento del área de estudio, como cartografía oficial existente, notas oficiales, informes, cartografía social y conocimiento local, entre otros.

Para mejorar los puntos de entrenamiento es importante contar con trabajo de campo que corrobore la interpretación de las imágenes, lo que disminuye el error y aumenta la precisión de esta.

La nubosidad en la temporada de lluvias, principalmente, genera errores de interpretación, los cuales pueden tener soluciones costosas en tiempo, personal o insumos; es así como se propone realizar el análisis del periodo sin tener en cuenta dicha temporada del régimen climático. Esto puede hacerse con un mosaico de las mejores imágenes, preferiblemente en el mismo rango; así, se ajusta al contexto de los informes bienales y se disminuyen los costos del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo, C. A. R., Delgado, J., Andrade, G. y Guzmán, A. (2015). Interacciones socioecológicas que perpetúan la degradación de la laguna de Fúquene, Andes orientales de Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 19(37), 49-66. <https://www.conservation.org.co/media/R1-2015-Franco-Ruiz-CA-.pdf>
- Angarita, H., Santos-Fleischmann, A., Rogeliz, C., Campo, F., Narváez-Campo, G., Delgado, J., Santos, T., Santos, A., Herrera-R., G. y Jiménez-Segura, L. (2020). Modificación del hábitat para los peces para la cuenca del río Magdalena, Colombia. En L. Jiménez-Segura y C. A. Lasso (Eds.). *XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible* (pp. 265-293). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Chung, K. S. (2001). Adaptabilidad ecofisiológica de organismos acuáticos tropicales a cambios de salinidad. *Revista de biología tropical*, 49(1), 9-13. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/16737>
- Chuvienco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección*. Ediciones Rialp.
- Díaz Escobar, A. M. y Sánchez Torres, F. J. (2004). *Geografía de los cultivos ilícitos y conflicto armado en Colombia*. Centro de Estudios de Desarrollo Económico de la Universidad de los Andes.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/b55c060b-7ecc-42b9-b73e-1f94cb4f7226/content>

- Eggleston, S., Buendía, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K. (Eds.). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Forero, G., Pinel, N., Clerici, N., López-Casas, S., Molina, L. F., Pinilla, M. C., Ríos, H. F., Sánchez, A., Villegas, C. I. y Villegas, J. C. (2021). Motores directos de transformación y pérdida de biodiversidad. En R. Gómez-S., M. E. Chaves, W. Ramírez, M. Santamaría, G. Andrade, C. Solano y Aranguren, S. (Eds.), *Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania.
- Gutiérrez-Moreno, L. C. y de la Parra-Guerra, A. C. (2020). Contaminación en la cuenca del río Magdalena (Colombia) y su relación con los peces. En L. Jiménez-Segura y C. A. Lasso (Eds.). *XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible* (pp. 239-263). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Fundación Natura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación y Cancillería de Colombia. (2021). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. <https://www.andi.com.co/Uploads/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf>
- Junk, W. J. (2013). Current state of knowledge regarding South America wetlands and their future under global climate change. *Aquatic Sciences*, 75(1), 113-131. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0253-8>
- Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D. y Knoke, T. (2013). Land Use/Land Cover Change Analysis Using Object-Based Classification Approach in Munessa-Shashemene Landscape of the Ethiopian Highlands. *Remote Sensing*, 5(5), 2411-2435. <https://doi.org/10.3390/rs5052411>
- Senhadji-Navarro, K., Ruiz-Ochoa, M. A. y Rodríguez-Miranda, J. P. (2017). Estado

ecológico de algunos humedales colombianos en los últimos 15 años: una evaluación prospectiva. *Colombia forestal*, 20(2), 191-200.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a07>