



**Diseño y desarrollo de una herramienta SIG para estimar las compensaciones  
bióticas en el contexto colombiano**

**Mónica Piragauta Sierra**

11792314017

**Diana Milena Castillo Castañeda**

11792313066

**Universidad Antonio Nariño**

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C., Colombia

2023



**Diseño y desarrollo de una herramienta SIG para estimar las compensaciones  
bióticas en el contexto colombiano**

**Mónica Piragauta Sierra**

**Diana Milena Castillo Castañeda**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Especialización en sistemas de información geográfica**

Director (a):

Dra. Liliana Vanessa Celis Gil

**Universidad Antonio Nariño**

Especialización en sistemas de información geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2023



## Contenido

	Pág.
<b>1 Resumen .....</b>	<b>14</b>
<b>2 Abstract .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Introducción .....</b>	<b>16</b>
<b>4 Marco teórico .....</b>	<b>19</b>
<b>5 Objetivos.....</b>	<b>27</b>
<b>6 Diseño metodológico .....</b>	<b>27</b>
<b>7 Resultados y análisis de resultados .....</b>	<b>34</b>
<b>8 Conclusiones.....</b>	<b>75</b>
<b>9 Recomendaciones.....</b>	<b>77</b>
<b>10 Anexos.....</b>	<b>79</b>
<b>11 Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>80</b>



## Lista de Figuras

Figura 1 Proceso de estimación del Cuánto compensar y selección del Dónde compensar	22
Figura 2 Proceso metodológico propuesto (revisar bibliografía) .....	28
Figura 3 Estado de ordenación de las cuencas de Colombia para el año 2021 .....	38
Figura 4 Componentes principales de la caja de herramientas .....	45
Figura 5 Estructura de la geodatabase donde se almacenará la información procesada. ....	47
Figura 6 Procedimiento general del cuánto compensar .....	48
Figura 7 Interfaz de usuario para la fase 1. Cuánto compensar .....	49
Figura 8 Procedimiento general para la selección y generación de las capas de equivalencia ecosistémica y ámbito geográfico .....	49
Figura 9 Interfaz de usuario fase 2a. Ámbito y equivalencia .....	50
Figura 10 Procedimiento general para asignación de la adyacencia en las subzonas hidrográficas .....	51
Figura 11 Interfaz de usuario para la fase 2b. Adyacencia SZH .....	51
Figura 12 Conversión de las áreas de interés a ráster. ....	52
Figura 13 Interfaz de usuario para la fase 3a. Conversión ráster .....	53
Figura 14 Reclasificación NDVI. ....	55
Figura 15 Interfaz de usuario para la fase 3b. Reclasificación NDVI .....	55
Figura 16 Procedimiento de la superposición ponderada .....	56
Figura 17 Interfaz de usuario para la fase 4. Selección de áreas .....	57
Figura 18. Geoprocesamiento del cuánto compensar .....	61
Figura 19. Geoprocesamiento de equivalencia ecosistémica y ámbito geográfico .....	63
Figura 20. Geoprocesamiento de adyacencia de las subzonas hidrográficas.....	64
Figura 21. Geoprocesamiento de selección de áreas a partir de la superposición ponderada. .....	68

### Lista de tablas

Tabla 1 Fórmula para estima el área de compensación .....	31
Tabla 2 Matriz de priorización de las variables de entrada .....	34
Tabla 3 Variables de entrada para el modelo cuanto compensar .....	39
Tabla 4 Historia de usuario para el Cuánto compensar .....	40
Tabla 5 Historia de usuario para 2a. Ámbito y equivalencia.....	41
Tabla 6. Historia de usuario para el módulo 2b. Ámbito y equivalencia ecológica .....	41
Tabla 7 Historia de usuario para la fase del modelo 3a Conversión ráster .....	42
Tabla 8 Historia de usuario para la 3b Reclasificación del NDVI.....	43
Tabla 9 Historia de usuario para la fase 4. Selección de áreas .....	44
Tabla 10 Síntesis de resultados de las validaciones para los dos estudios de caso seleccionados .....	71

### **Lista de Símbolos y Abreviaturas**

**EIA** Estudio de Impacto Ambiental

**MAG** Modelo de Almacenamiento Geográfico

**MCCB** Manual de Compensación de Componente Biótico

**MECMC** Mapa de Ecosistemas Continentales Marinos y Costeros.

**POA** Proyectos, Obras o Actividades

**AICA:** Área importante para la conservación de las aves

**ANLA:** Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

**BBOP:** Business and Biodiversity Offsets Programme

**CRA:** Corporación Autónoma Regional del Atlántico

**IAvH:** Instituto de Investigación de Recursos Biológicos “Alexander von Humboldt”

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

**POMCA:** Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas

**RUNAP:** Registro Único Nacional de Áreas Protegidas

**SIAC:** Sistema de Información Ambiental de Colombia

**SZH:** Subzona hidrográfica

## 1 Resumen

Se realizó la selección de las variables de entrada obligatorias y se desarrolló una caja de herramientas tipo Model Builder en ArcGis Pro. Se diseñó y desarrolló en seis modelos, para los cuales se construyeron seis historias de usuario, estableciendo campo de aplicación, alcance y utilidad de cada modelo que compone la herramienta. La herramienta fue implementada empleando como estudios de caso, la información contenida en dos Modelos de Almacenamiento Geográfico publicados por la ANLA en su página oficial; allí se encontró que tanto para el caso de estudio 1 correspondiente al proyecto Refuerzo Suroccidental 500 kV, Proyecto La Virginia – Alférez como para el caso 2 correspondiente al proyecto Subestación Chivor II y Norte 230 kV y Líneas de Transmisión Asociadas se lograron identificar áreas potenciales de compensación que cumplen con los lineamientos establecidos por el MCCB. Se identificaron las ventajas de la herramienta y de las posibles mejoras en su diseño, concluyendo que es una herramienta útil y rápida para validar la estimación del cuanto compensar y obtener un portafolio general de áreas donde se pueda realizar la compensación.

## 2 Abstract

The selection of the mandatory input variables was carried out and a Model Builder type toolbox was developed in ArcGis Pro. Six models were designed and developed, for which six user stories were also defined, establishing field of application, scope and usefulness of each model that makes up the tool. The tool was implemented using the information contained in two Geographic Storage Models published by ANLA on its official website as case studies; there it was found that both for case study 1 corresponding to the 500 kV Suroccidental Reinforcement project, La Virginia – Alferez Project and for case 2 corresponding to the Chivor II and Norte 230 kV Substation project and Associated Transmission Lines, it was possible to identify potential areas of compensation that meets the guidelines established by the MCCB. The advantages of the tool and possible improvements in its design are identified, concluding that it is a useful and quick tool to validate the estimate of how much to compensate and obtain a general portfolio of areas where compensation can be made.

### 3 Introducción

La ejecución de proyectos y actividades que implican uso y aprovechamiento de recursos naturales y la intervención de ecosistemas terrestres continentales, en ocasiones generan impactos que no pueden ser manejados conforme a la jerarquía de la mitigación bajo las premisas de la prevención, mitigación y corrección (Bigard et al., 2019; Cares et al., 2023; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a), es aquí donde surge la necesidad de compensar la biodiversidad que se ve afectada por la ejecución de estos.

En Colombia, las compensaciones bióticas o por pérdida de biodiversidad corresponden a un requisito normativo con el que deben cumplir los solicitantes de Licencias Ambientales, para el desarrollo de proyecto, obras y/o actividades (de ahora en adelante POA) que implican el uso y aprovechamiento de recursos naturales (C. et al., 2017); estas, actualmente encuentran reglamentadas mediante la Resolución 256 de 2018, a través de la cual se acoge el Manual de Compensaciones de Componente Biótico (de ahora en adelante MCCB) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

Sin embargo, a lo largo del tiempo, tanto las empresas que tienen estas obligaciones, como las organizaciones no gubernamentales, han identificado brechas en la estimación del cuánto compensar y la selección de áreas para llevar a cabo la compensación (Dónde), ya sea por las diferencias en el cálculo de esta o por la posibilidad de llevar a cabo la compensación en las áreas preliminares propuestas (Corzo Mora et al., 2018). Así mismo, se han identificado dificultades en la consolidación de bases de datos que permitan realizar la evaluación y seguimiento al cumplimiento de las obligaciones de compensación por pérdida de

biodiversidad establecidas por las Autoridades Ambientales Regionales en el país, por lo que han surgido herramientas de validación que buscan fortalecer la teledetección y el uso de información geoespacial que brinden la información suficiente para estos ejercicios de monitoreo (Salès et al., 2023).

A nivel nacional e internacional se han generado múltiples herramientas que buscan minimizar la intervención de ecosistemas naturales, partiendo del Convenio de Diversidad Biológica (Cancillería de Colombia, 2023) que ha impulsado la implementación de políticas y normativas nacionales que establecen la obligación de compensación por los impactos causados en la biodiversidad, iniciativa que se ha venido popularizando y consolidando en la última década (Saenz et al., 2013).

En el contexto Colombia, el Manual de compensaciones del componente biótico, establece, evalúa y guía el monitoreo las obligaciones de compensación requeridas en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA de ahora en adelante) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a), el cual fue acogido por la Resolución 256 del 22 de febrero de 2018 y que modificó la Resolución 1517 de 2012 (Salès et al., 2023, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

Los resultados de procesos compensatorios, muestran que su implementación acarrea superar limitantes prácticos que van desde los marcos normativos asociados hasta los procesos metodológicos de planificación; allí se identifica adicionalmente, la necesidad de contar con bases de datos condensadas en Sistemas de Información Geográficos -SIG- siendo una herramienta prioritaria para monitoreo e implementación de las compensaciones de biodiversidad, así como también para realizar retroalimentación constante de las

experiencias y aprendizajes de cada caso con la finalidad de ser replicados y/o mejorados (Blicharska et al., 2022).

Por lo anterior, la calidad de los datos ecológicos espacializados permitirían una mejor implementación de marcos normativos, logrando además mejorar los procesos metodológicos para la formulación, planificación, ejecución, seguimiento y control de procesos de compensación de biodiversidad en ejecución o proyectados a ejecutar. Es así como, desarrollar una herramienta SIG que permita realizar el cálculo del cuanto compensar de acuerdo con los lineamientos establecidos en el MCCB e identificar las áreas potenciales de compensación facilitaría la reducción de la brecha existente entre el sector privado y las Autoridades ambientales y dinamizaría los tiempos en las etapas de planeación y aprobación de estas propuestas.

Bajo este escenario, se plantea desarrollar una herramienta SIG que permita realizar la estimación inicial de las compensaciones del medio biótico en el marco del licenciamiento ambiental para Colombia, aportando a la formulación de las propuestas, así como también a las etapas de evaluación, aprobación y seguimiento a cargo de las Autoridades Ambientales.

## **4 Marco teórico**

### **4.1 Las compensaciones ambientales en el contexto nacional e internacional**

El crecimiento poblacional en las grandes urbes asociado al desarrollo de infraestructura y comunicación, las actividades mineroenergéticas y la agricultura son considerados los principales tensionantes que causan la modificación o alteración de los ecosistemas naturales (Cares et al., 2023). En este sentido, a nivel global se han desarrollado iniciativas para disminuir la intervención de los ecosistemas naturales, siendo un hito importante el Convenio de Diversidad Biológica instaurado el 29 de diciembre de 1993 e impulsado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. En este, respecto a las compensaciones ambientales se menciona en el artículo 14 que se deberán establecer para los proyectos que tengan efectos negativos en el medio ambiente procesos apropiados para la evaluación de impacto ambiental (CONVENIO SOBRE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA, 1992), es decir que se deberá realizar la evaluación de la jerarquía de la mitigación de impactos y definir medidas de prevención, reducción, mitigación y de ser necesaria la compensación. Para Colombia, este convenio fue acogido a través de la Ley 165 del 25 de febrero de 1995,

Para el año 2012 surge el Programa de compensaciones entre negocios y biodiversidad (BBOP por sus siglas en inglés), mediante el cual se buscaba establecer los principios orientadores de las compensaciones, partiendo de un adecuado análisis de la jerarquía de la mitigación, ya mencionada por el Convenio de la Diversidad Biológica (Business and

Biodiversity Offsets Programme (BBOP), 2012). En este sentido, las compensaciones ambientales surgen de la necesidad de resarcir los impactos negativos que se dan sobre los componentes de la biodiversidad en un área y que sean generados por la ejecución de proyectos, es decir, implica reponer las pérdidas mediante la ganancia de atributos de biodiversidad en áreas equivalentes (Vaissière & Meinard, 2021). La popularización del término de compensaciones de biodiversidad ha implicado que su implementación se encuentre en renovación constante, para su implementación, incluyendo modificaciones tanto en el ámbito político internacional y nacional, como en la inclusión de nuevos conceptos como por ejemplo los servicios ecosistémicos que impulsaron la valoración económica de la biodiversidad (Hrabanski, 2015).

Para Colombia, así como para otros países de la región, la compensación por pérdida de biodiversidad corresponde a un requisito normativo en el proceso de formulación de Estudios de Impacto Ambiental -EIA- para otorgar Licencias Ambientales que implican el uso de recursos naturales, sobre los cuales se aplica -de acuerdo con la identificación y calificación de impactos- la jerarquía de mitigación. (Quétier et al., 2014)

En el país en la última década, este requisito se ha formalizado a través de la adopción de políticas que establecen metodológicamente cómo deben ejecutarse las compensaciones (Salès et al., 2023), en este caso hablamos de los Manuales de compensación (Manual de Compensación por Pérdida de Biodiversidad adoptado por la Resolución 1428 de 2012 y el Manual de Compensaciones del Componente Biótico (MCCB), adoptado por la Resolución 256 de 2018) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012, 2018a). Respecto a este último, es importante mencionar que considera la compensación biótica para ecosistemas transformados e incluye la compensación por aprovechamiento forestal y

sustracciones de reserva nacionales y regionales (ANLA, 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a); así mismo, establece principios orientadores de las compensaciones bióticas: a) No pérdida Neta de La Biodiversidad (NPNB), b) Jerarquía de la Mitigación y c) Adicionalidad (Business and Biodiversity Offsets Programme (BBOP), 2012; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

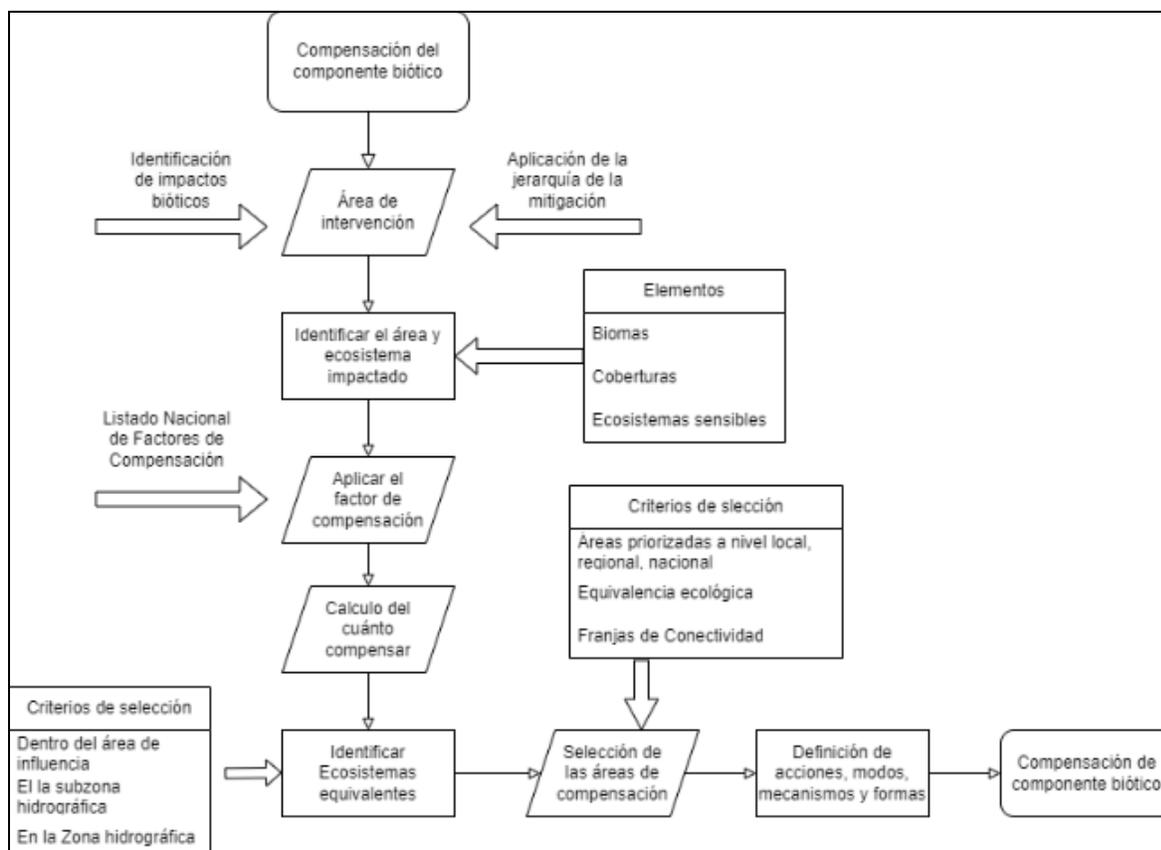
Una compensación exitosa se basa en la no pérdida neta de biodiversidad y de servicios ecosistémicos, lo que requiere para su formulación información amplia sobre las pérdidas y ganancias de la biodiversidad (Cole et al., 2021). La Jerarquía de la mitigación, permite a través del análisis de los impactos ambientales y específicamente para los impactos bióticos, identificar si estos pueden ser evitados, controlados, mitigados o compensados. La compensación se hace necesaria debido a la intervención por la ejecución del Proyecto, Obra o Actividad (POA); buscando resarcir los impactos bióticos y evitar la pérdida neta de biodiversidad (Bull et al., 2017; Cares et al., 2023; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

#### **4.2 El análisis geográfico en las compensaciones ambientales**

El Manual de Compensaciones de Componente Biótico (MCCB) del año 2018, establece una serie de pasos para desarrollar el plan de compensación del componente biótico, el cual incluye de manera detallada la estimación del Cuánto compensar, los criterios de selección del Dónde compensar y por último las diferentes alternativas para desarrollar la

compensación, es decir el Cómo compensar (Figura 1) (Corzo Mora et al., 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a); Respecto al Qué compensar, este corresponde al área de intervención donde se localizan los impactos bióticos residuales negativos que no pudieron ser prevenidos, corregidos o mitigados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

Figura 1 Proceso de estimación del Cuánto compensar y selección del Dónde compensar



Fuente: Adaptado del Manual de compensaciones del componente biótico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)

En el marco de esta regulación, las herramientas cartográficas cobran vital importancia, ya que su uso facilita el estudio y monitoreo de los atributos de biodiversidad de las áreas

intervenidas y las áreas compensadas (Salès et al., 2023). En Colombia, se cuenta con diferentes insumos cartográficos que están disponibles en línea para su consulta en el Sistema de Información Ambiental de Colombia -SIAC-(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018c) a diferentes escalas de detalle a nivel nacional; adicionalmente a nivel regional, las Corporaciones Autónomas cuentan con diferentes instrumentos que permiten la formulación y ejecución de las compensaciones, resaltando que estas son iniciativas de algunas y que no corresponde a una generalidad para el país. (Uribe, 2007).

La revisión de información cartográfica resulta fundamental para la adecuada evaluación, seguimiento y control de la compensación del componente biótico por parte de las Autoridades Ambientales, en donde se verifica principalmente el área propuesta de compensación (Murcia et al., 2017). Es así como las autoridades ambientales encargadas del seguimiento y control de las obligaciones de los licenciatarios cuentan con herramientas para la verificación de su cumplimiento como lo son los Informes de Cumplimiento Ambiental, que corresponde a la compilación de las actividades ejecutadas por los titulares para dar cumplimiento a todas y cada una de las obligaciones impuestas en las licencias ambientales y la cual incluye información cartográfica siguiendo el Modelo de Almacenamiento Geográfico establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución 2186 de 2016.(Resolución 2182 de 2016., 2016).

A nivel nacional, desde 2020 la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, implemento la revisión cartográfica reportada por los titulares de licencia ambiental a través del SDE que corresponde al Seguimiento Documento Espacial que emplea herramientas de

teledetección y cartografía para control y seguimiento de las obligaciones ambientales entre las cuales se encuentra la compensación biótica (Salès et al., 2023).

Las compensaciones bióticas, como se mencionó en los apartes anteriores requieren de un análisis cartográfico, el cual para el contexto colombiano, se basa en información suministrada por las autoridades ambientales e instituciones del Estado y por otro lado en información propia del usuario que solicita el licenciamiento ambiental (Salès et al., 2023); En este sentido, para las compensaciones ambientales, los Sistemas de Información Geográfica son un apoyo para la toma de decisiones, puesto que implican la integración de datos espaciales y el análisis multicriterio que reúnen atributos de importancia para la selección de áreas para llevar a cabo la compensación (Bigard et al., 2019; Bonfilio et al., 2012; Nowak & Pe, 2018).

#### **4.3 Los modelos como elementos para automatizar análisis y reducir tiempos**

El análisis de bases de datos con un alto volumen de información, principalmente a nivel geográfico es un elemento fundamental que ha permitido a lo largo del tiempo realizar análisis de todo tipo (Ilba, 2021); no obstante, el volumen de información ha hecho que se planteen alternativas para el análisis de datos en las que no se dependa de una sola máquina, sino que se distribuya el análisis en varios grupos de máquinas haciendo más eficiente el análisis de una gran cantidad de datos (Hu et al., 2018; Ilba, 2021).

Los Model Builder se definen como un lenguaje de programación visual a partir del cual se crean flujos de trabajo en el geoprocesamiento de información que optimizan los tiempos de

análisis (ESRI, n.d.); por lo general, son empleados para la modelación de suelos, hidrología y paisajes (Abdelrahman et al., 2018; Abdelrahman & Tahoun, 2018; Brunetti et al., 2023).

Es así como el análisis de datos espaciales ha hecho uso de herramientas como los Model Builder de ArcGIS Pro (Abdelrahman & Tahoun, 2018; David et al., 2022) o las librerías en lenguaje Python para diferentes aplicativos ha permitido el acceso y análisis de información de manera más eficiente y en muchos casos, sin depender de algún tipo de aplicación paga (Naghibi et al., 2021).

Por ejemplo, Bigard et al., (2019) en Francia, proponen desde el análisis de la jerarquía de la mitigación realizar una intervención más eficiente de los ecosistemas, es decir reducir su impacto sobre estos y a su vez identificar las áreas en las cuales, desde la equivalencia ecosistémica, se recomendaría efectuar la compensación ambiental. En Colombia, para el Manual de Compensaciones por Pérdida de Biodiversidad del año 2012, se desarrolló como complemento la herramienta MaFe v2.0 (Mapping Alternatives for Equivalents) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2012), esta herramienta con arquitectura PostgreSQL 9.2, PostGIS 2.0.1, MS4W 3.0.6 y GeoPortal 2.4, permite a partir del análisis de contexto paisajístico y tamaño de los fragmentos identificar las áreas sobre las que desde la equivalencia ecosistémica presentan una mayor viabilidad para el desarrollo de las compensaciones por pérdida de biodiversidad, centrándose en la ubicación de las compensaciones ambientales a partir del contexto paisajístico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2012).

Así mismo Mandle et al. (2016) para el año 2016 desarrollaron OPAL (Offset Portfolio Analyzer and Locator), una herramienta de código abierto basado en lenguaje Python

mediante el cual se mapean los impactos sobre los hábitats y los servicios ecosistémicos, facilitando la selección de áreas para desarrollar la compensación e identificando las áreas con mayor vulnerabilidad en términos ecosistémicos con respecto a los impactos provocados por el proyecto.

En complemento, existen herramientas como Google Earth Engine a través de las cuales es posible realizar el análisis de imágenes e identificar los cambios en las coberturas de la tierra para ciertos periodos de tiempo empleado modelos de código abierto (Pande et al., 2023)

En conclusión, existen actualmente variedad de elementos que permiten la integración de los análisis multicriterio y atributos geográficos, los cuales son ampliamente usados para la toma de decisiones a nivel geográfico, tales como la selección de áreas para el establecimiento de plantaciones, áreas para el establecimiento de proyecto fotovoltaicos, la delimitación y modelamiento de las cuencas y específicamente en las compensaciones ambientales, con respecto al análisis de la jerarquía de la mitigación, evaluación de impactos sobre servicios ecosistémicos o selección de áreas para el establecimiento de las compensaciones ambientales (Offset Portfolio Analyzer and Locator, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2012, Bigard et al., 2019, Naghibi et al., 2021, AbdelRahman & Tahoun, 2019, Scott et al. 2023).

## **5 Objetivos**

### **5.1 Objetivo general**

Desarrollar una herramienta SIG que permita realizar la estimación inicial de las compensaciones bióticas en el contexto del licenciamiento ambiental para Colombia.

### **5.2 Objetivos específicos**

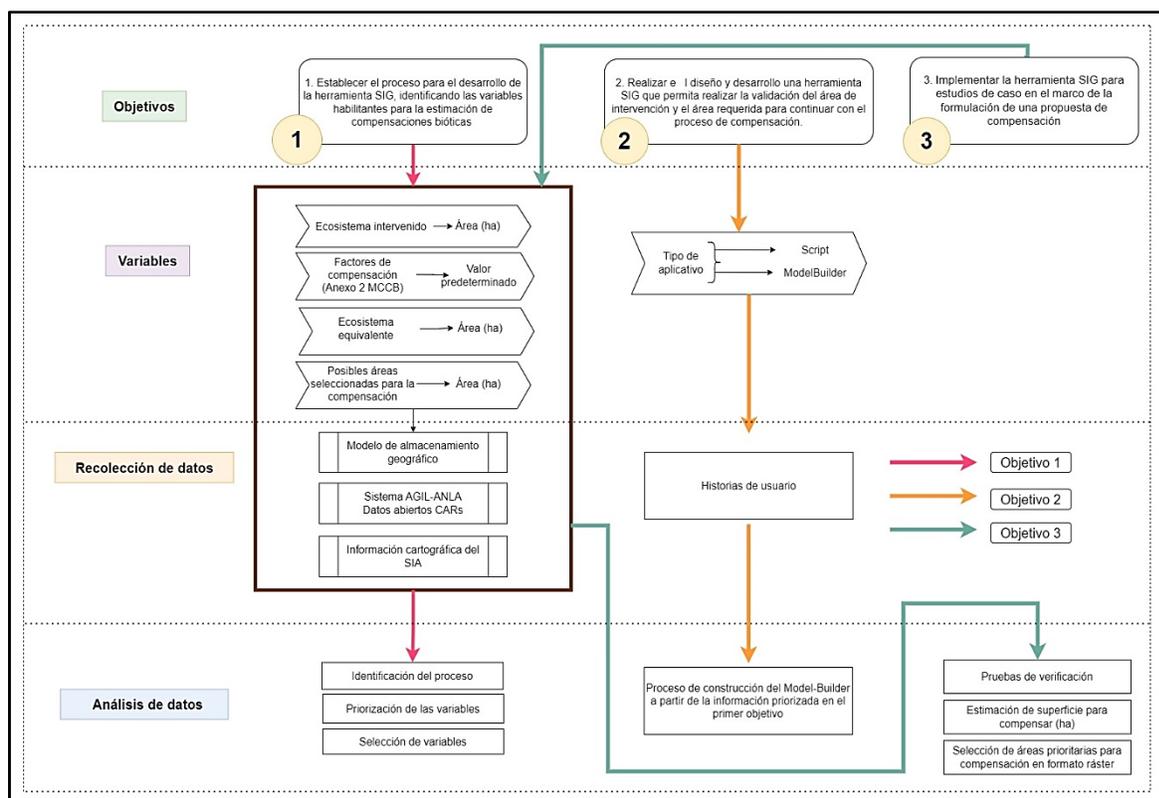
- Establecer el proceso para el desarrollo de la herramienta SIG, identificando las variables espaciales habilitantes para la estimación de compensaciones bióticas.
- Realizar el diseño y desarrollo una herramienta SIG que permita realizar la validación del área de intervención y el área requerida para continuar con el proceso de compensación.
- Implementar la herramienta SIG para estudios de caso en el marco de la formulación de una propuesta de compensación.

## **6 Diseño metodológico**

La metodología que se expone a continuación partió de los lineamientos establecidos en el Manual de compensaciones de componente biótico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a) respecto al ¿Qué, Cuánto, Cómo y Dónde compensar?.

El enfoque propuesto para el desarrollo de la herramienta SIG comprende la identificación de variables, recolección y análisis de datos para cada uno de los objetivos propuestos en el marco de esta herramienta, que busca estimar la compensación biótica ocasionada por un impacto (Figura 2)

Figura 2 Proceso metodológico propuesto (revisar bibliografía)



El diseño metodológico se desarrolla en tres etapas, la primera, identifica las variables que se incluirán en el diseño de la herramienta, las cuales según el Manual de compensaciones del componente biótico corresponden a la identificación y definición del ecosistema intervenido por el proyecto, es decir, las coberturas que serán impactadas en el Bioma, unidad biótica donde se localiza el proyecto y si existe la presencia de ecosistemas sensibles correspondientes a bosque seco tropical, áreas RAMSAR, ecosistemas de páramo y

ecosistemas de manglar; en este punto es preciso mencionar, que la herramienta se desarrolló únicamente para ecosistemas terrestres continentales, ya que el MCCB solamente se centra en los ecosistemas en mención (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a; Murcia et al., 2017). Para la selección de las variables a incluir en el modelo, se analizaron tres fuentes de información correspondientes a: el ICDE (<https://www.icde.gov.co/geoservicio>), SIAC(<http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>), Datos abiertos ANLA (<https://datosabiertos-anla.hub.arcgis.com/>). Con respecto a la primera fuente de información, se buscaba encontrar información ambiental asociada a los instrumentos de ordenación (POMCA, POT, PBOT, EOT, entre otros), áreas priorizadas por las Corporaciones Autónomas Regionales para la conservación, preservación y restauración y por último información relacionada con las características de las coberturas o el cambio en el uso del suelo para cada una de las jurisdicciones, teniendo en cuenta que estos son insumos que pueden ser empleados en la selección de las áreas de compensación, mientras que con el SIAC y los Datos abiertos ANLA se buscaba obtener información ambiental oficial.

## **6.1 Definición del área requerida de compensación**

Con la definición del área requerida de compensación, se identifica el ecosistema equivalente, el cual corresponde a un área que tiene los mismos atributos ecosistémicos del área impactada; es decir se debe localizar en el mismo bioma unidad biótica y en la mismas subzona hidrográfica o en las subzonas hidrográficas adyacentes que se localicen en la misma zona hidrográfica donde se localiza el proyecto(Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible, 2018a); adicionalmente, estas áreas deben garantizar que sean equiparables con las pérdidas ocasionadas por el proyecto y generar ganancias adicionales a la biodiversidad (GLOBAL BUSINESS AND BIODIVERSITY PROGRAMME, 2015), por lo que es importante incluir áreas de importancia ecológica y ambiental.

En síntesis, las variables seleccionadas en el modelo deben cumplir con lo siguiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018b):

- a. Respecto al Cuánto compensar:
  - i. Equivalencia ecosistémica: Identificación de biomas y unidades bióticas
  - ii. Identificación de factores de compensación.
  - iii. Ámbito geográfico: Subzonas y zona hidrográficas donde se localiza el proyecto y zona
- b. Respecto al Dónde compensar:
  - i. Equivalencia ecosistémica
  - ii. Ámbito geográfico
  - iii. Priorización de áreas de Importancia ecológica y ambiental

Debido a que estas variables corresponden a elementos cartográficos oficiales, su obtención se realizará a través de la consulta de los portales abiertos de las entidades Estatales tales como el SIAC (<http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>), Datos Abiertos de la ANLA (<https://datosabiertos-anla.hub.arcgis.com/>), entre otros.

De acuerdo con lo anterior, en la primera fase, se realizó una identificación preliminar de la información cartográfica requerida según el proceso metodológico descrito en el MCCB, de la cual se obtuvo una matriz de selección que permitió priorizar las variables indispensables para el desarrollo y validación de la herramienta SIG siguiendo la metodología de (Moilanen et al., 2020).

Es importante aclarar que para el cálculo del ¿cuánto compensar?, los factores de compensación, fueron consultados en el Anexo 2 Listado Nacional de Factores de Compensación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a) y se asignaron de acuerdo a su grado de integridad ecológica, así para los ecosistemas naturales se asignó el factor de compensación total, para la vegetación secundaria se asignó la mitad del factor de compensación y para coberturas transformadas con atributos ecológicos fue asignado un valor de 1, tal y como lo establece el MCCB (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

La estimación del área de compensación corresponde al producto del área de cada ecosistema (cobertura + Bioma unidad Biótica) intervenido por el factor de compensación asignado de acuerdo con el Anexo 2 mencionado.

Tabla 1 Fórmula para estimar el área de compensación

<b>Ecosistemas naturales</b>	<b>Ecosistemas seminaturales</b>	<b>Ecosistemas transformados</b>
$A_i * F.C = A_c$	$A_i * (F.C / 2) = A_c$	$A_i * 1 = A_c$

Ai: Área de intervención, F.C.: Factor de Compensación, Ac: Área por compensar

Fuente; (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)

Es necesario adicionalmente, que se verifique si existe la intervención en ecosistemas naturales de importancia ecológica (manglar, páramos, Bosque seco tropical, áreas RAMSAR) puesto que sobre estos el factor de compensación corresponde a 10.

## **6.2 Diseño y desarrollo de la herramienta**

La segunda etapa (diseño y desarrollo de la herramienta SIG) se realizó en ArcGIS Pro 3.1.3, mediante la configuración de seis Model Builder, estos se configuraron de manera secuencial, teniendo en cuenta el proceso de identificación del ¿Cuánto y el Dónde?, para este último la herramienta se basa en un análisis multicriterio que permite obtener los resultados a verificar por los tomadores de decisiones y demás usuarios, por lo que, si bien se busca la optimización del proceso de revisión, se requiere integrar la experticia del usuario para la interpretación de los resultados (Bigard et al., 2020). Adicionalmente en el análisis se incluyó un Script para Google Earth Engine (GEE)(n.d., 2019), el cual a partir de un análisis multitemporal de la vegetación con el índice NDVI permite identificar las áreas con mayor estado de transformación, esta información puede ser empleada como una de las variables para la selección de las áreas de compensación.

Por último, se sugiere realizar un análisis de conectividad a través de un paquete de R denominado Makurhini, el cual calcula la fragmentación y conectividad del paisaje con el objetivo de identificar áreas para la conservación (Godínez-Gómez & Correa-Ayram, 2020), para la herramienta, tiene como objetivo realizar la valoración de las áreas obtenidas con el fin de identificar las alternativas que generarán una mayor conectividad con la

implementación de acciones de compensación como complemento a la herramienta desarrollada.

### **6.3 Implementación y validación de la herramienta**

Finalmente en la tercera etapa, para llevar a cabo la validación de la caja de herramientas se empleó información cartográfica de los proyectos de interés en evaluación en proceso de licenciamiento publicados en la Página Web de la ANLA ([https://www.anla.gov.co/01\\_anla/todos-los-proyectos/interes-en-evaluacion](https://www.anla.gov.co/01_anla/todos-los-proyectos/interes-en-evaluacion)), priorizando los sectores de energía, minería e infraestructura puesto que estos cuentan con información cartográfica relacionada con las áreas de intervención en el Modelo de Almacenamiento Geográfico (MAG), que en el caso de los proyectos de Hidrocarburos al construirse por zonificación de manejo no cuentan con áreas ciertas para intervención, por lo que no serán empleados.

En este sentido, de manera general con los resultados obtenidos a partir del Model Builder, se realizará un comparativo de las áreas obtenidas en la tabla resumen que arroja el modelo, con respecto al desarrollo manual del cálculo de la compensación. Por otro lado, se verifica a nivel cartográfico la localización de cada uno de los ecosistemas de importancia, si existiesen para así identificar si la herramienta está realizando de manera adecuada la consulta.

## 7 Resultados y análisis de resultados

### 7.1 Selección de las variables para desarrollar el modelo

Se identificaron 15 variables geográficas, que de acuerdo con los lineamientos del MCCB (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a) permiten definir el cuanto y dónde compensar. De estas variables, nueve se relacionan con el cuánto compensar y 12 se encuentra relacionadas con el dónde compensar, lo que quiere para las dos etapas se emplearan elementos en común, como las áreas de bosque seco tropical, áreas RAMSAR y páramos, puesto que al ser ecosistemas sensibles cuentan con un factor de compensación de 10 y son área que se deberían priorizar la compensación si son afectadas por el POA.

Tabla 2 Matriz de priorización de las variables de entrada

Variable Entrada	Obligatoria (SI / NO)	Nombre de la capa	Origen	Cuanto	Dónde	Descripción
Área de intervención	SI	AreaProyecto, AprovechaForestalPG, Area de intervención (creada por el usuario)	MAG	X		Corresponde a las áreas que desde la jerarquía de la mitigación requieren de la compensación por afectación del medio biótico (impactos residuales) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)
Área de influencia	SI	AreaInfluencia	MAG		X	Área en la que se especializan los impactos físicos, bióticos y socioeconómicos causados por un proyecto (MADS & ANLA, 2018)
Biomás	SI	Biomás_2017	SIAC	X	X	Corresponde a la generalización del mapa de Ecosistemas continentales, Costeros y Marinos de Colombia (IDEAM et al., 2017)

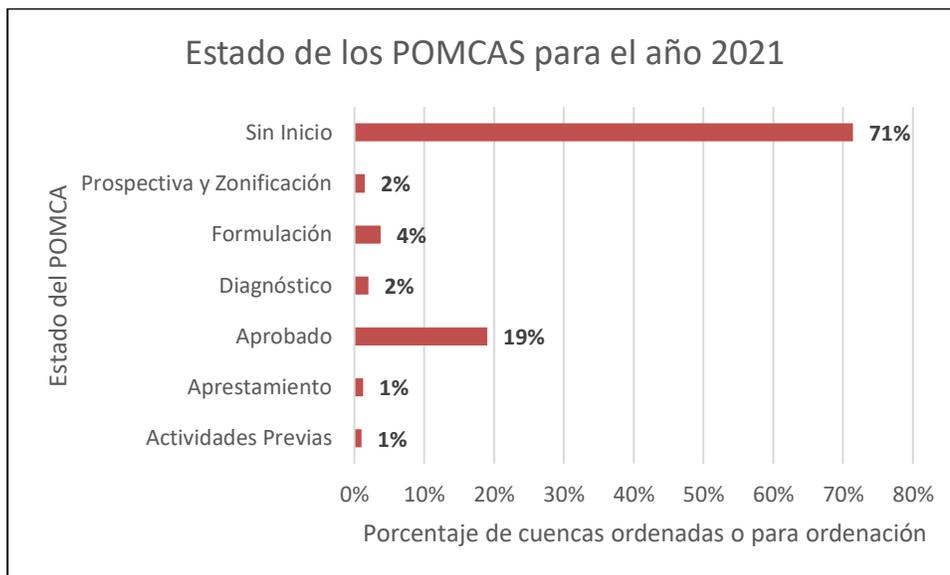
<b>Cobertura de la Tierra</b>	SI	CoberturaTierra	MAG	X	X	Coberturas de la tierra delimitadas a escala de detalle para el área de influencia del proyecto
<b>Zonas hidrográficas</b>	SI	Zonificacion_Hidrografica_2013	SIAC	X	X	Mapa de Zonificación hidrográfica, el cual incluye todas las subzonas hidrográficas para Colombia (IDEAM, 2013)
<b>Factores de compensación</b>	SI	Anexo 2 Manual de compensación del componente biótico		X		Definidos para las unidades bióticas, estiman el incremento del área inicialmente impactada. Tiene en cuenta cuatro criterios relacionados con la representatividad del ecosistema dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de (SINAP), la rareza, la remanencia y la tasa de transformación de este (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)
<b>Ecosistema equivalente</b>	SI	Capa Resultante de la consulta en el Modelo		X	X	Área que tiene los mismos atributos ecológicos del área impactada, en donde además las ganancias de biodiversidad logradas con las acciones de compensación deben ser equiparables con las pérdidas ocasionadas por el proyecto, corresponde al bioma unidad de biótica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)
<b>Áreas de compensación</b>	SI	Capa Resultante de la consulta en el Modelo			X	Área ecológicamente equivalente en donde se desarrollan las acciones de compensación (restauración y preservación), la cual además tiene la superficie estimada mediante el ecosistema intervenido y el factor de compensación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)
<b>Áreas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas</b>	SI	RUNAP	SIAC		X	Conjunto de áreas protegidas que contribuyen al cumplimiento de los objetivos de

						conservación del país (PNN, 2021)
<b>Acciones de compensación</b>	NO	Actividades definidas de acuerdo con las Áreas de compensación	Plan de compensación		X	Restauración ecológica bajo los enfoques de rehabilitación, recuperación y/o restauración ecológica propiamente dicha (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)
<b>Áreas RAMSAR</b>	SI	Humedales Ramsar	SIAC	X	X	Áreas designadas bajo Convenio internacional Ramsar., asociadas principalmente a humedales. Para el MCCB tienen un factor de compensación de 10 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a; Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)
<b>Áreas de Bosque seco tropical (bs-T)</b>	SI	Bosque Seco Tropical 2018 escala 1:100.000	SIAC	X	X	Formación vegetal que presenta una cobertura boscosa continua, que corresponde al bosque seco tropical de Holdridge. Debido a su alta importancia y tasa de transformación según el MCCB cuentan con un factor de compensación de 10 (Instituto Alexander von Humboldt, 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a)
<b>Páramos delimitados para Colombia</b>	SI	Páramos delimitados	SIAC	X	X	Ecosistema con predominio de vegetación de matorral (arbustiva) de alta montaña. Debido a su alta importancia, según el MCCB cuentan con un factor de compensación de 10 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a, 2020)
<b>Áreas prioritarias según la capa de Ordenamiento</b>	NO	Zonificación del Instrumento de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica	Corporaciones Autónomas Regionales			Zonificación del Instrumento de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica

<b>de la Cuenca Hidrográfica</b>					
<b>Conectividad</b>	NO	Capa de Conectividad para el Área de influencia	Anexos EIA	X	Análisis de conectividad para el área de influencia en el Estudio de impacto Ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)
<b>Portafolio de áreas prioritarias de conservación y compensación</b>	NO	Áreas de compensación definidas por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico	CRA	X	Determina los escenarios de conservación y acciones de compensación enmarcadas en el ordenamiento ambiental, del territorio y las estrategias regionales y nacionales de conservación (Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA), 2018)

De las variables identificadas se obtiene que el 75% son de tipo obligatorio para modelo, mientras que el porcentaje restante se relacionaban con elementos cartográficos que no se podrían conseguir para todo el territorio nacional, puesto que en términos de ordenamiento del territorio no existe la totalidad de la información asociada a cada municipio o cuenca. Por ejemplo, respecto a los POMCA, según el (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), tan solo el 19% se encuentra en ejecución, mientras que el 71% de las cuencas restantes no cuentan con inicio en el proceso de ordenación (Figura 3), en este sentido al no contar con información cartográfica asociada para toda Colombia, es un elemento que no se puede incluir como obligatorio en el modelo.

Figura 3 Estado de ordenación de las cuencas de Colombia para el año 2021



Así mismo, en algunos casos, las corporaciones autónomas regionales aún no cuentan con un portafolio de áreas priorizadas para la conservación, preservación o restauración. No obstante, se incluyó dentro de las variables para tener en cuenta ya que la en este aspecto la Corporación Autónoma regional del Atlántico tiene conformado para su jurisdicción un portafolio de áreas dirigidas a estos objetivos de conservación y que se encuentran ampliamente relacionadas con las compensaciones bióticas (Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA), 2018; Salès et al., 2023). Ahora bien, teniendo en cuenta que estos elementos cartográficos pueden ser importantes en la toma de decisiones, con el diseño del modelo se buscó permitir al usuario la inclusión de esta información en formato ráster, como se verá más adelante.

## 7.2 Diseño y desarrollo de la herramienta

### 7.2.1 Diseño de la herramienta

Partiendo de los elementos identificados y priorizados para cada una de las fases (cuánto y dónde compensar), se procedió a estructurar la herramienta a partir de las historias de usuario, como presenta a continuación.

#### 7.2.1.1 1. Cuánto compensar

A partir de la información priorizada y teniendo en cuenta las necesidades generales de un proyecto tipo, se partió de las siguientes variables para la primera fase de la modelo relacionada con el Cuánto compensar:

Tabla 3 Variables de entrada para el modelo cuanto compensar

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
Cobertura de la tierra	Capa del Modelo de Almacenamiento Geográfico, entregada por el titular de la licencia
Zonificación hidrográfica año 2013	IDEAM
Mapa de Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Paramos delimitados junio 2020	Instituto Alexander von Humboldt – SIAC
Bosque seco tropical, año 2018	Instituto Alexander von Humboldt – SIAC
Humedales RAMSAR, año 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Área de intervención (AreaProyecto AprovechaForestalPG, InfraestructuraPG, Área de intervención (creada por el usuario))	Capa del Modelo de Almacenamiento Geográfico, entregada por el titular de la licencia
Listado Nacional de Factores de Compensación, 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

De acuerdo con esto, se creó el diseño para el desarrollo donde se identificó el perfil de usuario, lo que se espera de cada función en el modelo y el objetivo de la misma, a continuación se presenta la historia de usuarios de cuánto compensar (Tabla 4); para estimar la extensión de la compensación biótica, se requiere la identificación del bioma unidad biótica sobre el que se localiza el proyecto, la identificación de áreas de importancia ecológica y ambiental (RAMSAR, Bosque Seco Tropical, Páramos) y los factores de compensación; así mismo, es importante para el usuario establecer las subzonas hidrográficas y zonas hidrográficas donde se localiza el proyecto, puesto que en estos elementos serán determinantes más adelante.

Tabla 4 Historia de usuario para el Cuánto compensar

<b>Perfil</b>
Planificador de la compensación (usuario): Ingenieros forestales, biólogos, ecólogos, ingenieros ambientales e Ingenieros catastrales interesados en estimar las compensaciones bióticas, los cuales buscan automatizar procesos, reducir tiempos y disminuir incertidumbre
<b>Quiero</b>
Desarrollar una herramienta que a través del análisis de localización y la intersección con los biomas y subzonas hidrográficas me permita estimar el cuánto compensar y obtener una tabla resumen con la información asociada al ámbito geográfico y la equivalencia ecosistémica.
<b>Para</b>
Estimar la compensación en términos de área, a partir del área de intervención del proyecto que presenta impactos bióticos residuales negativos e identificar los biomas equivalentes y el ámbito geográfico dónde se localiza la intervención

#### 7.2.1.2 2a. Ámbito Equivalencia

La historia de usuario (Tabla 5) para esta fase del modelo partió de la necesidad de identificar la extensión de los ecosistemas equivalentes, es decir el bioma unidad biótica, en las subzonas hidrográficas; teniendo en cuenta que es obligatorio conocer los ecosistemas

equivalentes, las subzonas hidrográficas y las zonas hidrográficas, a fin de poder realizar la consulta; en este escenario se espera obtener una capa en formato polígono que identifique la extensión total de los biomas que serán afectados en las zonas hidrográficas donde se efectuará el proyecto como se relaciona a continuación.

Tabla 5 Historia de usuario para 2a. Ámbito y equivalencia

<b>Perfil</b>
Planificador de la compensación (usuario): Ingenieros forestales, biólogos, ecólogos, ingenieros ambientales e Ingenieros catastrales interesados en estimar las compensaciones bióticas, los cuales buscan automatizar procesos, reducir tiempos y disminuir incertidumbre
<b>Quiero</b>
Desarrollar una herramienta que permita las áreas de ecosistemas equivalentes al interior de las zonas hidrográficas en las que se desarrolla el proyecto.
<b>Para</b>
Definir las áreas disponibles para la ejecución de las compensaciones ambientales teniendo en cuenta la equivalencia ecosistémica y el ámbito geográfico.

### 7.2.1.3 2b Adyacencia SZH

Para la selección de las áreas de compensación, es necesario tener en cuenta lo referente al ámbito geográfico de acuerdo con los lineamientos establecidos en el numeral 5.3 del MCCB (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a). En este sentido, es importante identificar la presencia de los ecosistemas equivalentes, no solo en las subzonas donde se localiza el proyecto, si no en las subzonas hidrográficas adyacentes, de acuerdo con lo anterior se construyó la siguiente historia de usuario (Tabla 6).

Tabla 6. Historia de usuario para el módulo 2b. Ámbito y equivalencia ecológica

<b>Perfil</b>
---------------

---

Planificador de la compensación (usuario): Ingenieros forestales, biólogos, ecólogos, ingenieros ambientales e Ingenieros catastrales interesados en estimar las compensaciones bióticas, los cuales buscan automatizar procesos, reducir tiempos y disminuir incertidumbre

---

**Quiero**

Determinar las subzonas hidrográficas viables sobre las cuales se espera desarrollar la compensación biótica, teniendo en cuenta las subzonas hidrográficas donde se realiza el proyecto y aquellas que son adyacentes.

---

**Para**

Reducir la probabilidad de seleccionar áreas que no son viables para la compensación, teniendo en cuenta las restricciones frente al ámbito geográfico.

---

#### 7.2.1.4 3a Conversión ráster

Con el modelo en siguientes fases se espera identificar las áreas probables dónde se efectuará la compensación, en este sentido, debido a que para dicho proceso es necesario contar con información en formato ráster, para el usuario es valioso automatizar dicho proceso, por lo que para esta fase se construyó la siguiente historia de usuario. El usuario necesita obtener la información en formato ráster cortada al ecosistema equivalente en la subzona hidrográfica dónde se localiza el proyecto (Tabla 7).

Tabla 7 Historia de usuario para la fase del modelo 3a Conversión ráster

<b>Perfil</b>				
Planificador	de	la	compensación	(usuario):
Ingenieros forestales, biólogos, ecólogos, ingenieros ambientales e Ingenieros catastrales interesados en estimar las compensaciones bióticas, los cuales buscan automatizar procesos, reducir tiempos y disminuir incertidumbre				
<b>Quiero</b>				

---

Convenir de manera ágil, las áreas identificadas en los dos procesos previos y los ecosistemas de importancia ambiental y ecológica en formato ráster con el fin de realizar una superposición ponderada.

---

**Para**

Convertir los atributos de importancia obtenidos en los dos modelos previos y los ecosistemas y áreas de importancia a formato ráster con el fin de incluirlos en la superposición ponderada, para la toma de decisión respecto a las áreas de compensación.

---

### 7.2.1.5 3b Reclasificación NDVI

Para la selección de áreas de compensación además de cumplir con el ámbito geográfico y la equivalencia ecosistémica, se incluyó un parámetro que permitiera identificar áreas que representen coberturas vegetales con valores de NDVI altos, medios y bajos, para la implementación de acciones de compensación, ya sea restauración ecológica en cualquiera de sus enfoques y/o preservación. Para esto se definió la siguiente historia de usuario, en donde se busca definir las áreas en las cuales se deben priorizar las acciones de compensación, como se describe a continuación (Tabla 8):

Tabla 8 Historia de usuario para la 3b Reclasificación del NDVI

Perfil
Planificador de la compensación (usuario) Ingenieros forestales, biólogos, ecólogos, ingenieros ambientales e Ingenieros catastrales interesados en estimar las compensaciones bióticas, los cuales buscan automatizar procesos, reducir tiempos y disminuir incertidumbre
Quiero
Definir áreas y núcleos de vegetación con altos, medios o bajos valores de NDVI -obtenidos mediante el cálculo de este índice para colecciones de imágenes satelitales-, a partir de la reclasificación de estos valores que permitan identificar áreas prioritarias de compensación asociadas a posibles tensionantes ambientales.
Para

---

Priorizar las áreas de compensación ideales acorde al enfoque de las acciones que se proyecten a ejecutar (restauración ecológica en cualquiera de sus enfoques y/o preservación)

---

#### 7.2.1.6 4. Selección de áreas

Una vez procesada la información en formato ráster, el usuario necesita realizar una superposición ponderada en la que asigne pesos y clasifique la información procesada dando prioridad a los siguientes criterios:

- Que sea en ecosistemas equivalentes, es decir en la misma área del bioma unidad biótica.
- Que sea en la subzona hidrográfica donde se localiza el proyecto o en las subzonas hidrográficas adyacentes que se localicen en la misma zona hidrográfica.
- Adicionalmente, se deberá dar prioridad a las áreas que se encuentren en el área de influencia del proyecto, en áreas de importancia ecológica y ambiental que se ubican en estas áreas o aquellas en las que se identifique alta fragmentación por procesos de transformación.

Por lo que el modelo para esta fase se construyó a partir de la siguiente la historia de usuario (. Tabla 9).

Tabla 9).

Tabla 9 Historia de usuario para la fase 4. Selección de áreas

<b>Perfil</b>	
Planificador de la compensación (usuario): Ingenieros forestales, biólogos, ecólogos, ingenieros ambientales e Ingenieros catastrales interesados en estimar las compensaciones bióticas, los cuales buscan automatizar procesos, reducir tiempos y disminuir incertidumbre	
<b>Quiero</b>	

Automatizar el proceso de superposición ponderada, con el fin de incluir todos los elementos necesarios que permitan la selección de áreas viables para la compensación teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en el numeral 5.3 del MCCB.

#### Para

Obtener un portafolio de áreas de compensación que permita al usuario seleccionar con mayor facilidad las áreas probables donde pueda llevar a cabo la compensación.

### 7.2.2 Desarrollo de la herramienta

Se siguió cada historia de usuario definida en el diseño y basada conceptualmente en lo establecido en el MCCB (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a), tomando como base los elementos definidos como obligatorios, categorizados en el Dónde compensar, de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 2.

A partir de la interacción entre las variables, se definieron modelos que permitieran hacer el procesamiento de los dos hitos de la formulación de las propuestas de compensación (cuánto y dónde compensar).

Para la estimación del área de compensación y su posible ubicación, se estructuraron seis modelos usando la herramienta ModelBuilder de ArcGis Pro© versión 3.1.3 (Figura 4).

Figura 4 Componentes principales de la caja de herramientas



En general el procesamiento de la información se realiza en formato vectorial, a excepción de las dos últimas fases de procesamiento, puesto que la selección de áreas requiere para el análisis la información cartográfica en formato ráster, por lo que se creó un módulo que permite la conversión de la información a este formato.

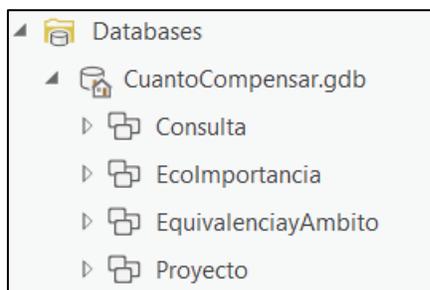
En este contexto para la herramienta se conformaron cuatro feature datasets en la GDB que crea por defecto el aplicativo ArcGIS Pro y las cuales están configuradas con el origen MAGNA Colombia Único, las cuales cuentan con la información oficial necesaria para interactuar con el modelo y que el usuario podrá actualizar según sea el caso, respecto al contenido de estos feature dataset se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Feature dataset *Consulta* corresponde a la ruta dejada por defecto para los procesamientos que realiza el modelo
- Feature dataset *EcoImportancia* cuenta con la información oficial descargada del SIAC que será necesaria para el procesamiento base.
- Feature dataset *EquivalenciayAmbito*, cuenta con las capas de Zonificación Hidrográfica 2013 y Biomas\_2017, aclarando que para esta última se generalizó extrayendo solamente la información relacionada con el campo Gran\_Bioma y Bioma\_IAvH, teniendo en cuenta que los demás atributos son específicos y para este ejercicio se considera que no son necesarios, además se evidenció que el procesamiento de la capa es mucho más sencillo cuando se encuentra generalizado. Esta capa se relacionó con el Anexo 2 Listado Nacional de Factores de compensación, mediante el geoprocésamiento *Join*, obteniendo la capa en mención.

- Feature dataset proyecto, corresponde al entorno donde el usuario ubicará la información referente a su proyecto, como el área de influencia, área de intervención, las coberturas de la tierra, se recomienda que estas provengan de la información cartográfica que se almacena en el Modelo de Almacenamiento Geográfico solicitado por la autoridad ambiental competente.

Es importante aclarar que el usuario podrá definir la ruta de salida de las consultas efectuadas por el modelo, sin embargo, teniendo en cuenta que muchas de estas son insumos para otras fases del modelo, se sugiere identificar la localización de estos archivos. En Figura 5 se presenta la estructura general de la geodatabase que acompaña la herramienta.

Figura 5 Estructura de la geodatabase donde se almacenará la información procesada.

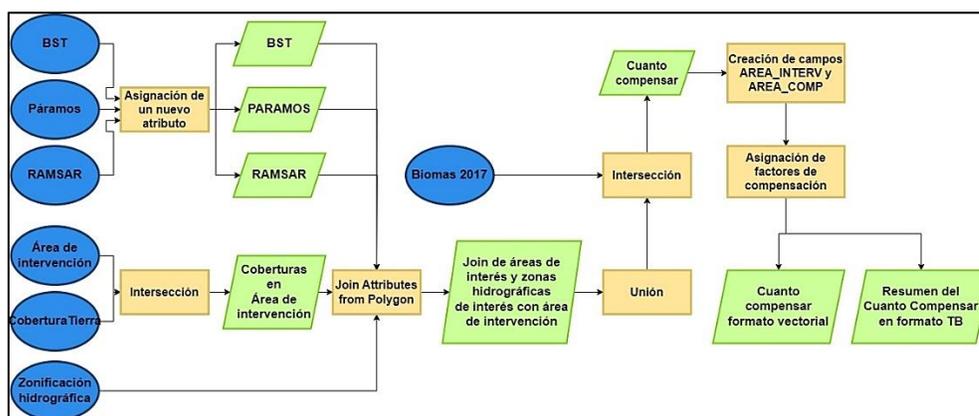


Frente a la estructura de la herramienta, se describe a continuación el proceso llevado a cabo en cada uno de los módulos.

#### 7.2.2.1 1. Cuánto compensar

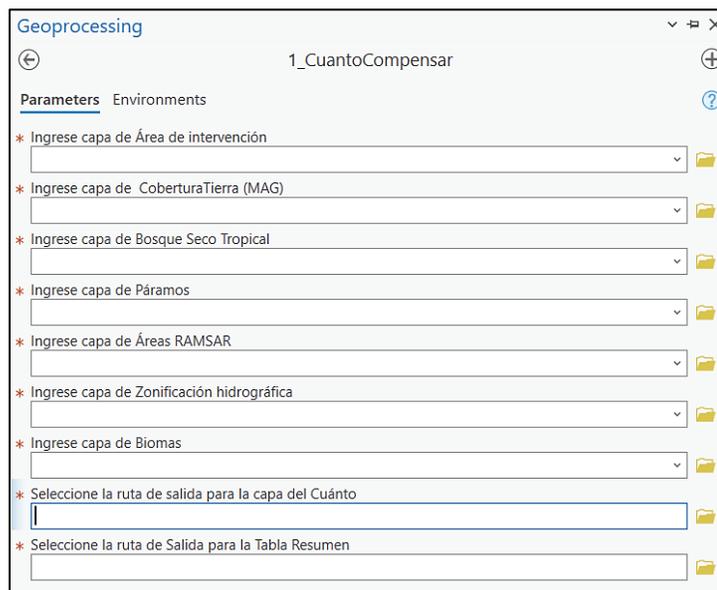
El modelo del Cuanto Compensar incluye para todas las capas provenientes del SIAC el Geoprocamiento *Repair Geometry* e inicia de la intersección entre el área de intervención y la cobertura de la tierra, para este resultado se desarrolla un geoprocamiento de *Join Attributes from polygon*, con el fin de heredar los atributos de las capas de áreas de importancia ecológica y zonificación hidrográfica al área resultante de la intersección, luego se realiza una unión entre el área de intervención con la cobertura de la tierra y la zonificación hidrográfica se intercepta con la capa de biomas 2017, por último se crean los campos de AREA\_INTERV y AREA\_COMP para proceder a asignar los valores y estimar la compensación, en la Figura 6 se realiza el resumen general de la esta fase del modelo.

Figura 6 Procedimiento general del cuánto compensar



Como resultado del diseño y estructuración de la herramienta se obtiene la siguiente interfaz de usuario (Figura 7).

Figura 7 Interfaz de usuario para la fase 1. Cuánto compensar

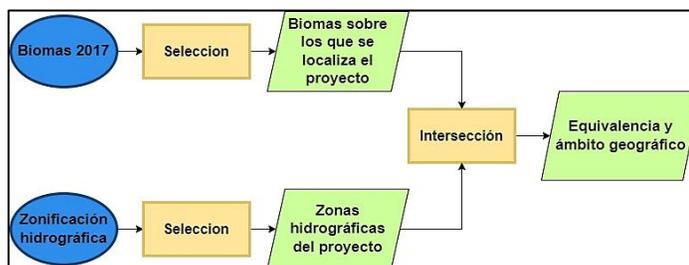


#### 7.2.2.2 2a. Ámbito Equivalencia

Como se menciona en el diseño de esta etapa, se aseguró que el modelo permitiera la selección de los ecosistemas equivalentes a partir del geoprocésamiento “*Select by Attributes*” cómo uno de los parámetros del modelo, es decir, que el usuario de la información resultante en la etapa anterior elegirá los ecosistemas equivalentes y a su vez seleccionará la zona hidrográfica, con el fin de identificar las subzonas hidrográficas donde se localiza el proyecto y las subzonas hidrográficas adyacentes (

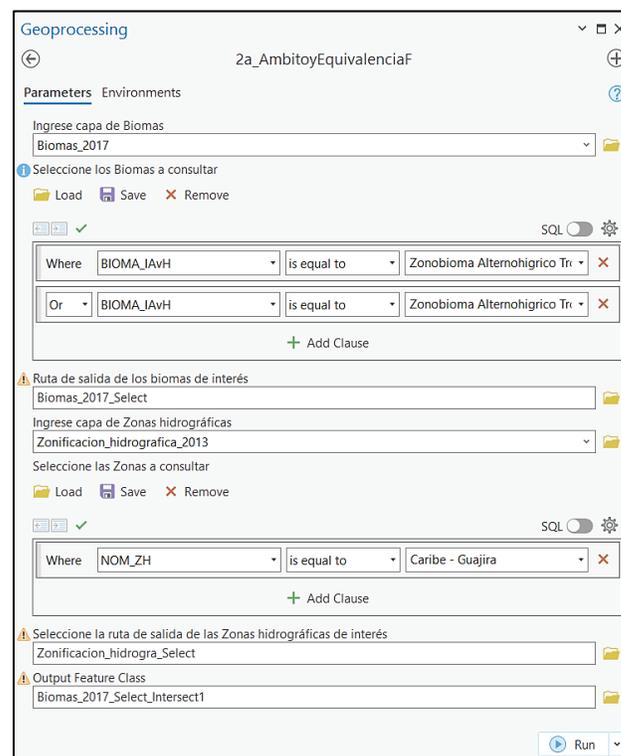
Figura 8), tal y como lo establecen los lineamientos definidos en el numeral 5.3 del MCCB en el numeral 5.3 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018a).

Figura 8 Procedimiento general para la selección y generación de las capas de equivalencia ecosistémica y ámbito geográfico



Resultado de la historia de usuario y las interacciones de las capas se obtiene la siguiente interfaz (Figura 9). Esta involucra la consulta de las subzonas de interés, las cuales deben escritas exactamente como son nombradas en la capa Zonificación Hidrográfica 2013 y Biomas 2017, como resultado en esta fase se obtiene una capa en la cual es posible identificar la extensión de los biomas en la zona hidrográfica de interés, la cual se requerirá como insumo más adelante.

Figura 9 Interfaz de usuario fase 2a. Ámbito y equivalencia

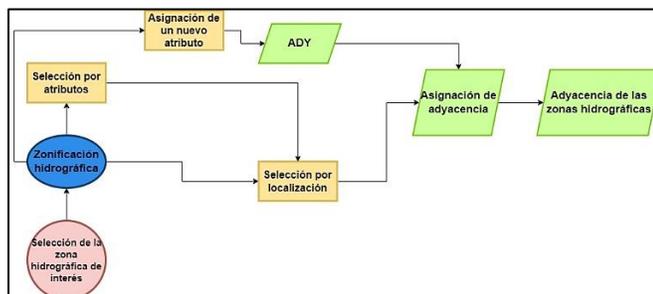


### 7.2.2.3 2b Adyacencia SZH

Esta parte del modelo consta de una selección por atributos y la selección por localización, partiendo de la ubicación del proyecto ya conocida por el usuario y que será asignada en la herramienta. Como resultado se obtiene una asignación de valores que corresponde a “PY”

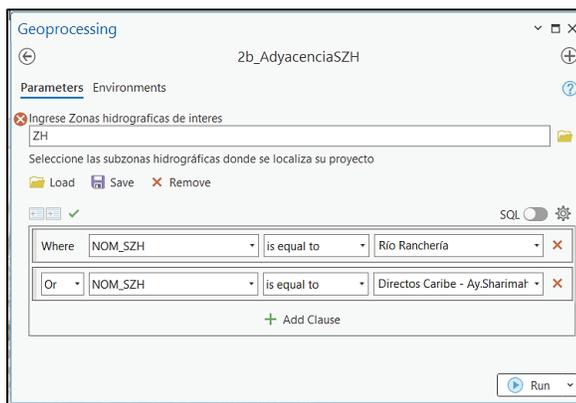
cuando el proyecto se localiza en estas subzonas hidrográficas, “ADY” cuando las subzonas hidrográficas son adyacentes a las primeras y por último a “NO” cuando estas no se localizan en las otras dos valoraciones asignadas (Figura 10).

Figura 10 Procedimiento general para asignación de la adyacencia en las subzonas hidrográficas



Resultado de la historia de usuario y teniendo en cuenta los geoprocесamientos descritos previamente se obtiene la siguiente interfaz de usuario (Figura 11).

Figura 11 Interfaz de usuario para la fase 2b. Adyacencia SZH

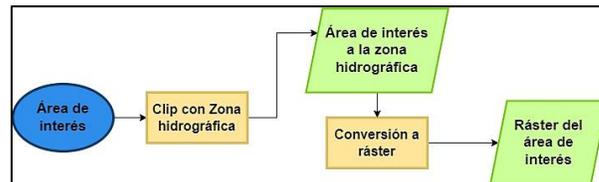


#### 7.2.2.4 3a Conversión ráster

Para la selección de las áreas principales de compensación se introdujo un modelo que realiza la conversión de las capas de consulta a ráster, por lo que se diseñó un modelo que

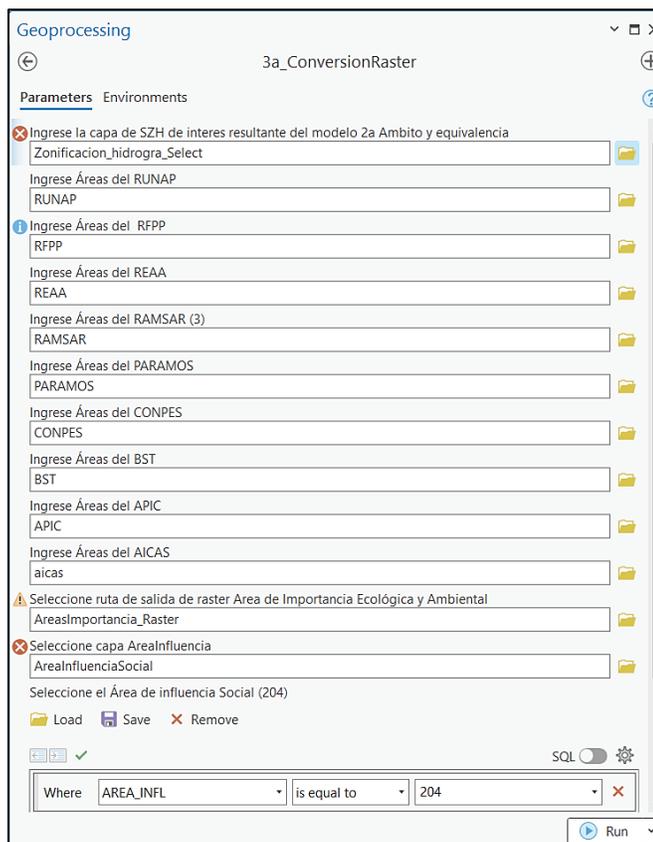
permite cortar dichas áreas a al ámbito geográfico y ecosistema equivalente para luego definir el peso de las variables. Este modelo de manera general consiste en la conversión de las capas de tipo vector a ráster partiendo de las capas seleccionadas en la matriz de la Tabla 2. Como resultado final de este análisis se obtienen archivos en formato ráster que luego será procesado en una superposición ponderada. Es importante mencionar que las áreas de interés ambiental y ecológico se unen en un solo ráster para efectuar la superposición ponderada (Figura 12).

Figura 12 Conversión de las áreas de interés a ráster.



La interfaz de usuario producto del desarrollo de esta fase del modelo es la siguiente (Figura 13).

Figura 13 Interfaz de usuario para la fase 3a. Conversión ráster



#### 7.2.2.5 3b Reclasificación NDVI

Mediante código realizado en la plataforma Google Earth Engine©, se estructuró el cálculo del NDVI - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada- para una temporalidad determinada, esto con el fin de tener diferentes insumos relacionados con el cambio y/o identificación de coberturas vegetales; estas temporalidades, tipo de satélite y características de las imágenes pueden ser ajustadas por el usuario según las necesidades y características de cada proyecto.

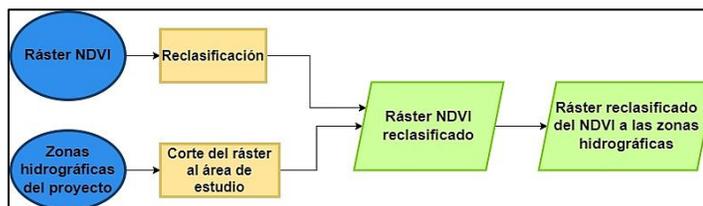
Con este código el usuario podrá generar una colección de imágenes satelitales de diferentes satélites para un rango de fecha determinado y realizar el cálculo el NDVI para posterior reclasificación como se detalla en la sección de diseño de la herramienta.

Con lo anterior, el usuario podrá obtener el NDVI multitemporal el cual requiere la definición de tres rangos de tiempo diferentes, el cual muestra -de acuerdo con tonalidades- los posibles cambios en las masas boscosas de vegetación, de manera que se puedan identificar áreas prioritarias para ejecución de acciones de compensación (restauración ecológica en cualquiera de sus enfoques y/o preservación), la cual es la finalidad de esta parte de la herramienta.

Adicionalmente, como parte del cálculo del NDVI multitemporal, el usuario tendrá tres resultados diferentes de NDVI (en momentos específicos), que le permitirá definir, acorde con los resultados y características del área en la que se proyecta realizar la compensación, si emplea un momento puntual o el análisis multitemporal en la matriz de ponderación de la selección de áreas.

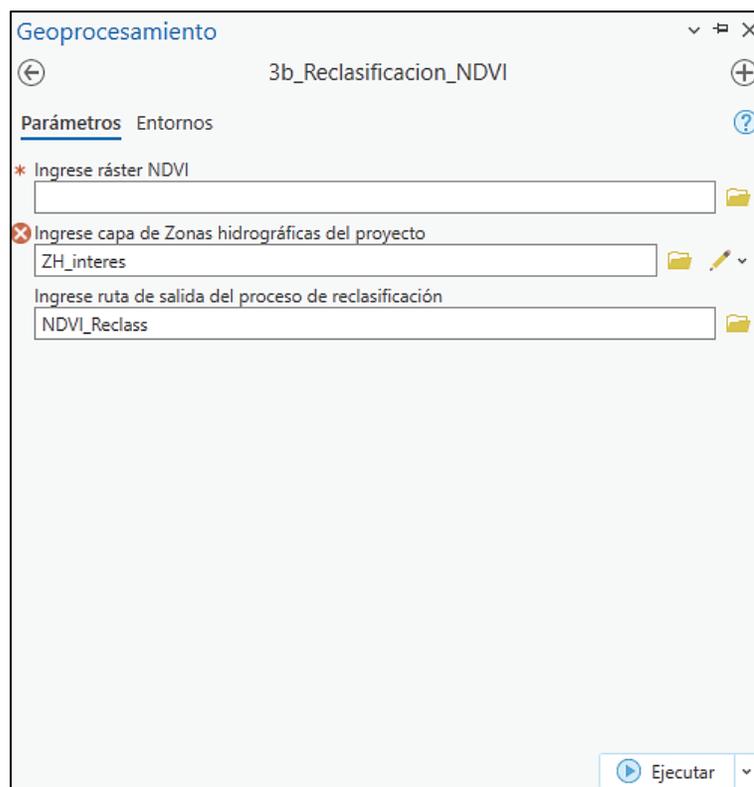
Posterior al cálculo de los tres NDVI de diferentes periodos de tiempo, y el NDVI Multitemporal, la plataforma de Google Earth Engine© permite al usuario exportar todos los resultados NDVI calculados o solamente los que se requieran, para continuar con el proceso de selección de áreas en ArcGis Pro©. El archivo generado será reclasificado dentro del modelo para la posterior calificación y ponderación para seleccionar las áreas potenciales de compensación (Figura 14).

Figura 14 Reclasificación NDVI.



La interfaz de usuario producto del desarrollo de esta fase del modelo es la siguiente (Figura 15).

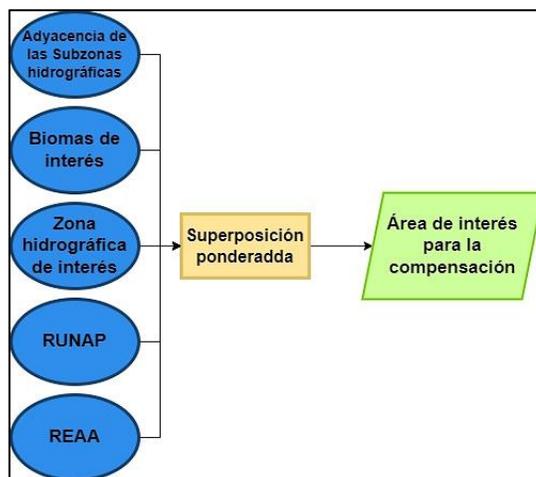
Figura 15 Interfaz de usuario para la fase 3b. Reclasificación NDVI



#### 7.2.2.6 4. Selección de áreas

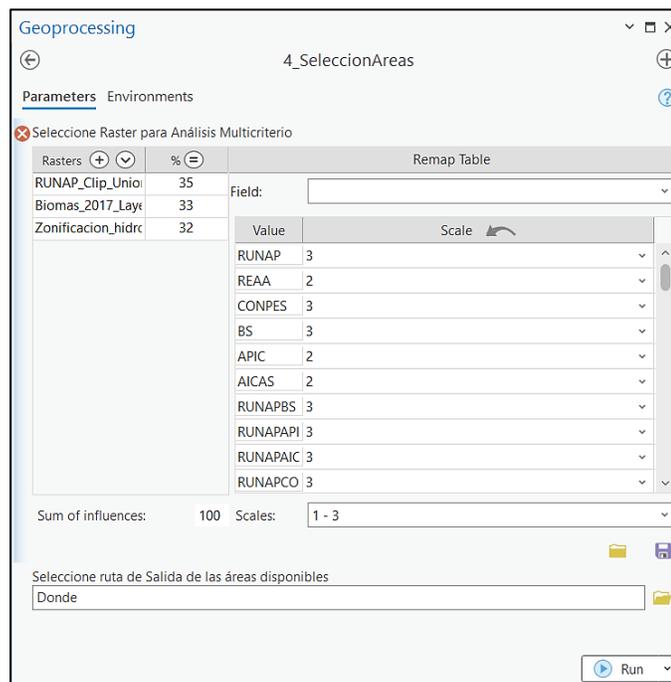
Una vez se tienen las áreas en formato ráster, incluido el NDVI, se realizó el análisis de superposición ponderada, en este el usuario tiene la opción de dar pesos a la ponderación y definir los valores que dará a cada una de las variables, así mismo es posible definir el rango sobre el cual se efectuará la ponderación. Como resultado de este análisis se obtiene la valoración de las áreas seleccionadas de acuerdo con los criterios empleados y teniendo en cuenta la importancia en términos de equivalencia ecosistémica y ámbito geográfico (Figura 16).

Figura 16 Procedimiento de la superposición ponderada



Partiendo de las historias de usuario y como resultado de su análisis se obtiene la siguiente interfaz de usuario (Figura 17).

Figura 17 Interfaz de usuario para la fase 4. Selección de áreas



### 7.2.3 Herramienta desarrollada con respecto a herramientas predecesoras.

Durante la fase de la elaboración de la herramienta, de acuerdo con los criterios establecidos en el MCCB se empleó el uso de diferentes geoprocесamientos, tal y como se mencionó en los apartes anteriores, en este contexto la herramienta se diseñó de manera que permitiera al usuario obtener información directa respecto al estimativo de las áreas de compensación, incluyendo una evaluación de la localización de aquellos ecosistemas sensibles que cuentan con un factor de compensación de 10. A diferencia de MAFE V2.0 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2012), esta caja de herramientas requiere la aplicación ArcGIS pro para su ejecución, sin embargo facilita la interacción con el usuario al emplear información base del Modelo de Almacenamiento Geográfico solicitada por la Autoridad

Ambiental, tanto en procesos de Seguimiento como en evaluación, así mismo, contiene la información cartográfica asociada al análisis, la cual puede ser actualizada de acuerdo con las modificaciones que realicen las instituciones ambientales de dónde proviene.

Con respecto al Dónde compensar, MAFE V2.0 efectúa el análisis de selección de áreas en términos del cálculo del contexto paisajístico y fragmentos de igual o mayor tamaño, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2012), cerrando la oferta de áreas a puntos específicos lo que puede reducir la disponibilidad de áreas para llevar a cabo la compensación cuando la extensión de estas es muy amplia o en el caso en el que las áreas presentan una alta transformación. Como ventaja, la caja de herramientas propuesta, cuenta con un módulo de ponderación que define a partir de los pesos dados a las variables y las características de ámbito geográfico y equivalencia ecosistémica la viabilidad de las superficies a compensar, en este sentido el usuario podrá incluir capas adicionales como el portafolio de áreas priorizadas para la conservación de las Corporaciones autónomas Regionales, la zonificación del manejo de los POMCA en cuencas ordenadas o la viabilidad y el tamaño del predio para la selección preliminar de sus áreas y determinar finalmente sobre cuales superficies se debe enfocar, así mismo, como bondad el modelo, descarta las superficies que no cumplen con la equivalencia ecosistémica y el ámbito geográfico reduciendo la posibilidad de error. Es importante mencionar que en su momento el aplicativo MAFE V2.0 se construyó con un enfoque en el Manual de compensaciones por pérdida de biodiversidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012), el cual a diferencia del MCCB actual presentaba una mayor rigurosidad en la estimación del cuánto compensar ya que solamente se enfocaba en ecosistemas naturales y en cuanto a la selección de las

áreas de compensación se reducía al área de influencia, centrándose principalmente en el contexto paisajístico, por lo que el enfoque varía con respecto a la herramienta propuesta.

Por otro lado, OPAL la herramienta propuesta por Mandle et al. (2016), identifica los impactos causados por el proyecto en el medio biótico y los servicios ecosistémicos, áreas posibles para la localización de la compensación y por último un balance que determina pérdidas y ganancias en los servicios ecosistémicos.; a diferencia de la herramienta propuesta en el presente documento, esta vincula los servicios ecosistémicos y permite realizar un análisis de las pérdida y las ganancias que en los ecosistemas en función de los impactos del proyecto y las áreas de compensación seleccionadas en este sentido, se hace necesario evaluar la inclusión de este tipo de elementos, de manera tal que faciliten aún más la toma de decisiones en la compensación.

### **7.3 Implementación de la herramienta SIG**

Como se mencionó en la metodología, para realizar la validación de la herramienta generada, se seleccionaron dos proyectos al azar de la página de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA- ([https://www.anla.gov.co/01\\_anla/todos-los-proyectos/interes-en-evaluacion](https://www.anla.gov.co/01_anla/todos-los-proyectos/interes-en-evaluacion)) que son de interés y de los cuales se cuenta con la información cartográfica publicada, es decir de libre acceso.

De manera ilustrativa se presenta el procesamiento de información desarrollado para el estudio de caso correspondiente al proyecto *-Refuerzo Suroccidental 500 kV, Proyecto La Virginia – Alférez*, que se encuentra ubicado en los departamentos de Valle del Cauca y Risaralda en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Este, corresponde a un proyecto del sector de energía, que busca construir una línea eléctrica que conecte las subestaciones existentes de La Virginia y Alférez.

Así mismo se empleó otro caso de estudio, con el que como se verá más adelante, se generó una tabla resumen que indica los resultados principales obtenidos con el procesamiento de la información en cada fase del modelo, para las variables seleccionadas en la primera sección de los resultados.

**Estudio de caso: Proyecto Refuerzo Suroccidental 500 kV, Proyecto La Virginia – Alférez**

- I. Para la estimación del cuánto compensar se empleó el modelo “1\_CuantoCompesar”, partiendo de importar las capas *AprovechaForestalPG*, *CoberturaTierra* y *AreaInfluencia* a la GDB de la modelo denominada “Proyecto” y asignado la ruta de salida (Figura 18).

Figura 18. Geoprocesamiento del cuánto compensar



Según los resultados de la tabla obtenidos, el proyecto se ubica en la zona hidrográfica Cauca y se intercepta con 12 subzonas hidrográficas las cuales son:

- Río Bugalagrande
- Río Guachal (Bolo – Fraile y Párraga)
- Río La Vieja
- Río Otún y otros directos al Cauca
- Río Paila
- Ríos Amaime y Cerrito
- Ríos Claro y Jamundí
- Ríos Guabas, Sabaletas y Sonso
- Ríos Guadalajara y San Pedro
- Ríos Lilí-, Melendez y Canaveralejo

- Ríos Tuluá y Morales
- Ríos Las Cañas – Los Micos y Obando

Por su parte, los biomas IAvH – Instituto Alexander von Humboldt, que cruzan el área de proyecto según la tabla resultado y sobre los cuales se debe buscar la equivalencia ecosistémica, corresponden a:

- Helobioma Cauca medio
- Hidrobioma Cauca medio
- Orobioma Azonal Subandino Cauca medio
- Orobioma Subandino Cauca medio

Los anteriores parámetros corresponden a información fundamental para realizar el siguiente modelo de identificación del ámbito geográfico y equivalencia ecosistémica. Adicionalmente, en la tabla resultado se verificó la estimación del área requerida de compensación según el área de intervención y el factor de compensación que allí se relaciona.

- II. Equivalencia ecosistémica y ámbito geográfico (zonas y subzonas hidrográficas) que determina el área objeto de estudio (en donde por estos criterios determinantes se debe buscar el área de compensación).
  - i. En la primera parte del modelo (parte a) a partir de la sección de los Biomas IAvH identificados para el área de proyecto y la Zona Hidrográfica del Cauca, se obtuvo

el área de estudio o interés en donde se debe buscar el área de compensación (Figura 19).

Figura 19. Geoprocesamiento de equivalencia ecosistémica y ámbito geográfico

2a\_AmbitoyEquivalenciaF

Parámetros Entornos

Ingrese capa de Biomas  
Biomass\_2017

Seleccione los Biomas a consultar  
Cargar Guardar Quitar

SQL

Donde BIOMA\_IaVH es igual que Helobioma Cauca medi

O BIOMA\_IaVH es igual que Hidrobioma Cauca mec

O BIOMA\_IaVH es igual que Orobioma Azonal Suba

O BIOMA\_IaVH es igual que Orobioma Subandino C

+ Agregar cláusula

Seleccione las Zonas a consultar  
Cargar Guardar Quitar

SQL

Donde NOM\_ZH es igual que Cauca

+ Agregar cláusula

Seleccione la ruta de salida de las Zonas hidrográficas de interés  
Zonificacion\_hidrogra\_Select

Output Feature Class  
Biomass\_2017\_Select\_Intersect1

Ejecutar

Con esta parte del segundo modelo, se obtuvo la zona hidrográfica que contiene el área de intervención y muestra específicamente allí los biomas que presentan equivalencia con los biomas intervenidos por el proyecto.

- ii. Con la segunda parte del modelo (parte b) se buscó seleccionar las subzonas hidrográficas de interés (es decir aquellas en las cuales se encuentra el área de intervención y las cuales se deben priorizar para la selección del área de compensación en lo posible, ya que, de no existir allí áreas de compensación se deberá incluir en la selección de zona hidrográfica las zonas vecinas al área de intervención como última instancia) (Figura 20).

Figura 20. Geoprocesamiento de adyacencia de las subzonas hidrográficas

The screenshot shows a software interface titled "2b\_AdyacenciaSZH". At the top, there are tabs for "Parámetros" and "Entornos". Below the tabs, there is a text input field labeled "Ingrese Zonas hidrograficas de interes" containing the text "Zonificacion\_hidrogra\_Select". Below this, there is a blue information icon and the text "Seleccione las subzonas hidrográficas donde se localiza su proyecto". There are three buttons: "Cargar" (with a folder icon), "Guardar" (with a save icon), and "Quitar" (with a red X icon). Below these buttons, there is a green checkmark icon and a "SQL" toggle switch. The main area contains a list of five rows, each representing a selected subzone. Each row has a dropdown menu with the value "0", a dropdown menu with the value "NOM\_SZH", a dropdown menu with the value "es igual qu", and a dropdown menu with the name of the subzone. The subzones listed are: "Sabaletas y Sonso", "Ialajara y San Pedro", "dez y Canaveralejo", "íos Tulua y Morales", and "os Micos y Obando". Each row has a red X icon to its right. At the bottom of the list, there is a green plus icon and the text "Agregar cláusula".

- III. Con el modelo 3 “ConversionRaster”, se convirtió la información importante para la búsqueda del área de compensación en formato ráster, que permita dar una calificación para la ponderación de las áreas potenciales de compensación, calificando mejor las características ideales del área de compensación según lo define el MCCB. Esta información incluye:

- Área de influencia

- Zonificación hidrográfica
- Áreas de importancia ambiental y ecosistémica (RUNAP, AICAS, APIC, BST, CONPES, PARAMOS, RAMSAR, REAA, RFPP)

Inicialmente se realizó un recorte de las áreas de importancia ecosistémica con el resultado obtenido con el modelo 2a correspondiente al ámbito geográfico y equivalencia ecosistémica, para luego unir todos los resultados y tener un solo insumo en formato capa, al cual se le crea un campo “AIAE\_T” (áreas de importancia ambiental y ecosistémica total) en el cual se relaciona cuáles de las áreas de importancia ambiental y ecosistémica se encuentra presente.

Con lo anterior se obtuvieron tres ráster correspondientes a: i) área de influencia, ii) zonificación hidrográfica de interés y iii) áreas de importancia ambiental y ecosistémica.

Previo a la ejecución, el modelo que permite seleccionar las áreas de compensación, se calculó el NDVI para encontrar tanto áreas prioritarias de conservación, como áreas que requiere restauración asociadas a posibles tensionantes sobre relictos de vegetación, se realizó un código en la plataforma Google Earth Engine© que permitiera calcular los valores de NDVI para una colección de imágenes satelitales con fechas determinadas, en este caso de enero de 2019 a septiembre de 2023, empleando una colección para este rango del satélite Copernicus SENTINEL-2 (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>).

En este proceso de cálculo es importante señalar que se pueden generar en este código, tres tipos de NDVI y se podrán emplear para la selección del área de compensación según los resultados que se obtengan, las características de las colecciones de imágenes que se obtengan y la necesidad de definición de acciones de compensación por parte del planificador de la compensación. Para este caso se generó el análisis de NDVI multitemporal a partir de la obtención de tres resultados de NDVI para tres temporalidades diferentes (incluidas dentro del rango de búsqueda de la colección de imágenes satelitales), esto con la finalidad de generar un ráster que simulara las bandas RGB (correspondientes a la temporalidad 1, 2 y 3 respectivamente) y permitiera diferenciar por tonalidades cuáles son las áreas que han sufrido transformación en cuanto a pérdida o ganancia de vegetación, mostrando también la dinámica de cambio o de intervenciones en el área de estudio.

No obstante, durante el proceso, se observó que la presencia de nubosidad puede llegar a afectar este índice multitemporal dado que la presencia y ausencia de las nubes en las diferentes temporalidades es marcada como un cambio que no implica afectación o ganancia de vegetación. Siendo así, su uso está condicionado a las condiciones de nubosidad de la zona y a la disponibilidad de imágenes satelitales con poca nubosidad como se indicó previamente. Este es el caso del proyecto seleccionado, por lo que para la calificación del criterio del NDVI se seleccionó el resultado de una sola temporalidad y no del total por la alta presencia de nubosidad en esta región.

Así mismo, es preciso señalar que, el área de estudio para la cual se calculan los índices de NDVI puede llegar a ser muy extensa, ya que esta área de estudio corresponde a la o las

zonas hidrográficas que cruza el proyecto en donde se busca priorizar las subzonas hidrográficas. De no ser posible su selección, el límite se extiende a subzonas vecinas de la misma zona hidrográfica, lo que puede llegar a ampliar aún más el área de estudio. Es así, que exportar el resultado de NDVI puede tomar bastante tiempo y capacidad de almacenamiento, siendo estos factores claves para tener en cuenta según la disponibilidad de recursos del planificador de la propuesta de compensación.

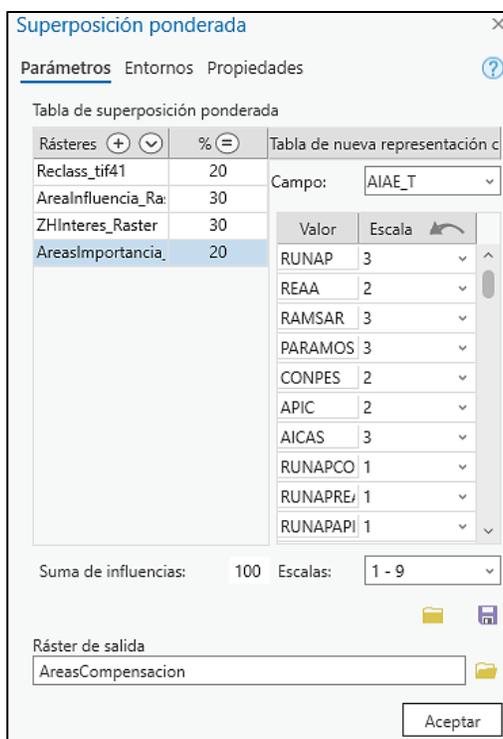
Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó el resultado de NDVI para la temporada enero de 2022 a septiembre de 2023, el cual se reclasificó usando el modelo 3b Reclasificación NDVI., empleando la opción de “Natural Breaks - Jenks” para tres clases (valores bajos, medios y altos), en este punto es preciso señalar que de manera ilustrativa se seleccionaron tres clases con esta opción de reclasificación, pero esta es información que se deberá determinar técnicamente por el planificador de la compensación según el grado o criterio de selección que defina para cada caso específico y acorde a las características de la zona en cuanto a presencia y conectividad de las coberturas vegetales.

IV. Con esta clasificación ya se cuenta con la totalidad de insumos para calificar mediante el modelo “4. Selección de áreas” las áreas potenciales para realizar la compensación. En este punto el modelo permite ingresar los parámetros de calificación para la selección de las áreas potenciales de compensación, esta calificación deberá ser determinada técnicamente por el planificador de la propuesta de compensación. Para este caso puntual se dio una ponderación de 20% al parámetro de Áreas de importancia ambiental y ecosistémica dando mayor peso a

las áreas que estuvieran representadas por algunas o varias de estas áreas. Para el parámetro de Área de influencia se asignó un valor de 30% teniendo en cuenta que el MCCB prioriza como ámbito de selección del área de compensación el área de influencia, siendo esta donde se generan los impactos que originan la obligación.

Al parámetro de zonificación hidrográfica se determinó una ponderación de 30% priorizando las subzonas que cruza el área de intervención, y en segunda instancia las subzonas hidrográficas adyacentes. Producto de esta ponderación y calificación de cada uno de los valores que las componen, se obtienen las áreas que se deberían priorizar con estos criterios para realizar la compensación (Figura 21).

Figura 21. Geoprocesamiento de selección de áreas a partir de la superposición ponderada.



Los porcentajes de ponderación y las calificaciones de los valores de cada ráster se deben determinar teniendo en cuenta parámetros técnicos por el planificador de la compensación teniendo en cuenta las características puntuales de cada caso.

Es importante mencionar además que, los usuarios de la herramienta SIG pueden incluir acá otro tipo de parámetros ráster que permitan tener en cuenta otros criterios de selección como por ejemplo disponibilidad predial, cercanía a vías y cuerpos de agua, conectividad ecológica, entre otros, que ayuden a seleccionar según cada necesidad la mejor opción de compensación que además cumpla con todos los lineamientos establecidos por el MCCB.

Este mismo ejercicio se realizó para el estudio de caso del proyecto Subestación Chivor II y Norte 230 kV y Líneas de Transmisión Asociadas, el cual es un proyecto del sector energía que atender la demanda energética del país. Este proyecto se encuentra localizado en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá.

Producto de estos dos análisis se relaciona en la siguiente tabla, los resultados principales para cada uno de los modelos empleados

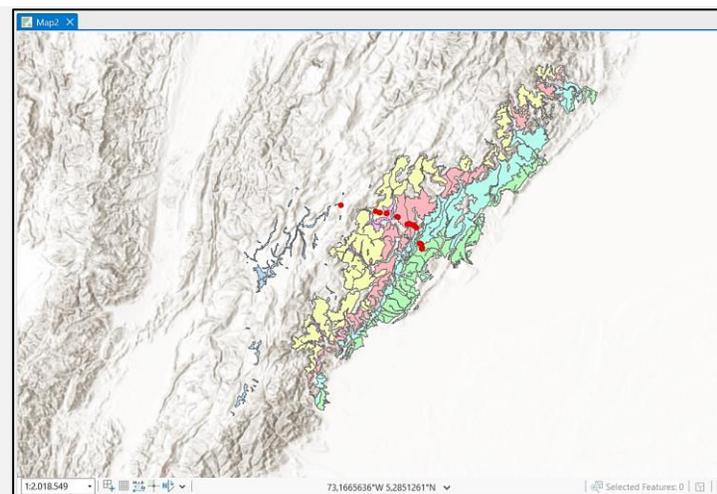
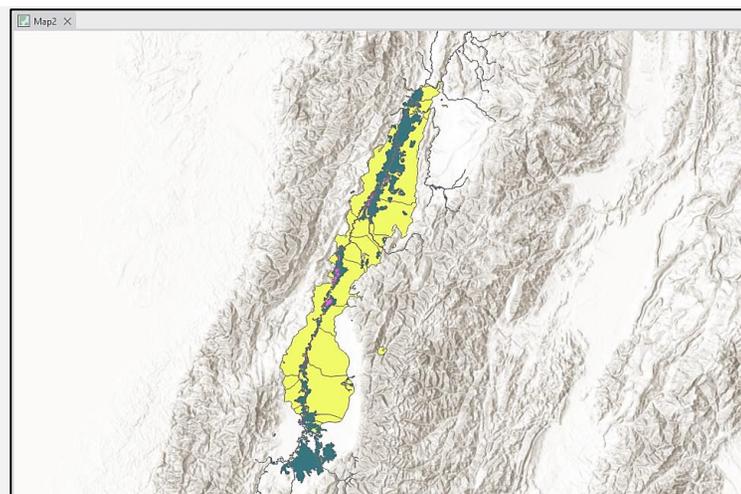


Tabla 10 Síntesis de resultados de las validaciones para los dos estudios de caso seleccionados

<i>Proceso de la herramienta</i>	<i>Proyecto Alférez</i>	<i>Proyecto Chivor</i>
1. <i>Cuanto compensar (ha)</i>	316,46	1

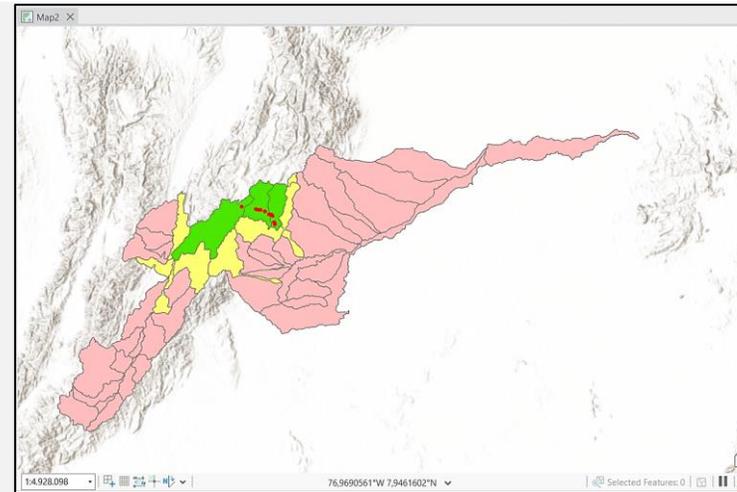
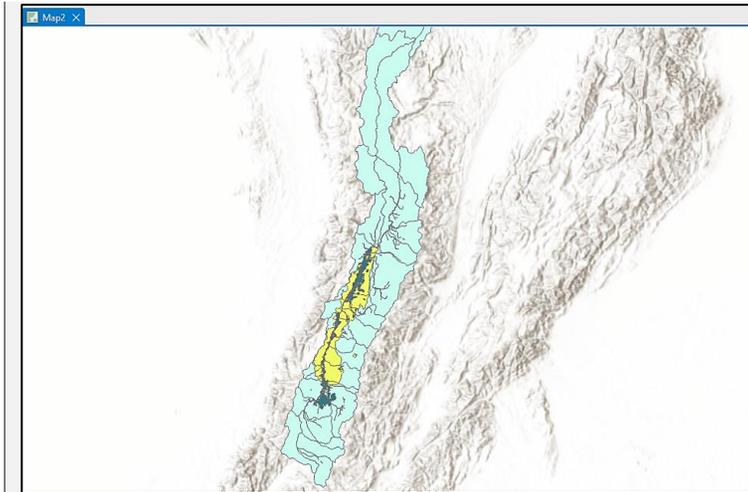
Los resultados obtenidos se dan en hectáreas; y según estos *resultados, se requiere compensar por la afectación de ecosistemas terrestres naturales y seminaturales un total de 316,46 ha para el proyecto Alférez y 1 ha para el proyecto Chivor. Es de resaltar que para ninguno de los dos casos se identificaron áreas de importancia ambiental y ecosistémica que afectara la asignación de factor de compensación.*

2ª. *Ámbito y equivalencia (shape)*



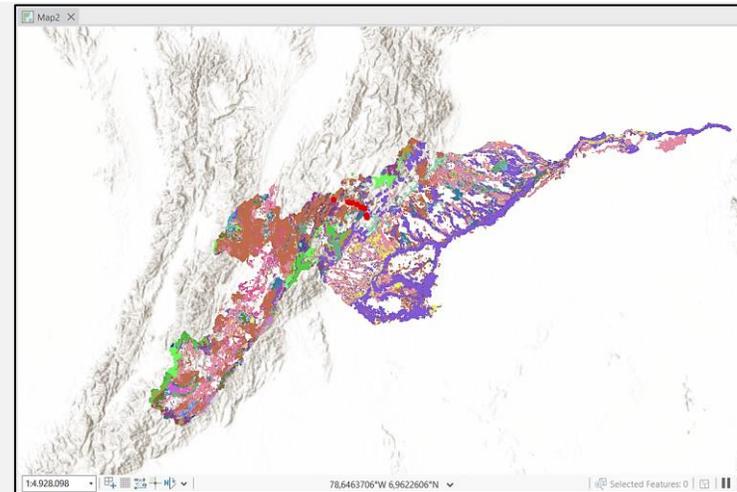
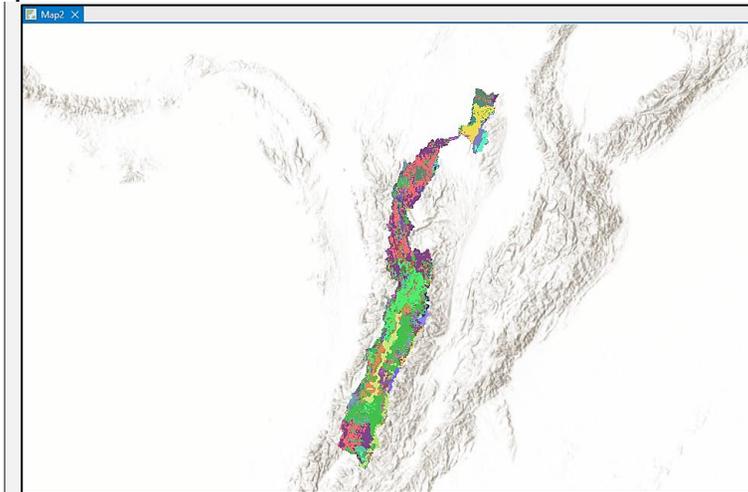
Como área de estudio o potencial para búsqueda de las áreas putnuales de compensación, se obtienen específicamente los biomas equivalentes dentro de las subzonas hidrográficas que contiene la zona hidrográfica en la que se ubica el área de intervención. Para ambos casos es de resaltar que esta área de estudio resulta bastante extensa por tratarse de proyectos de tipo lineal que atraviesan varios ecosistemas terrestres.

2b.  
Adyacencia  
SZH (shape)

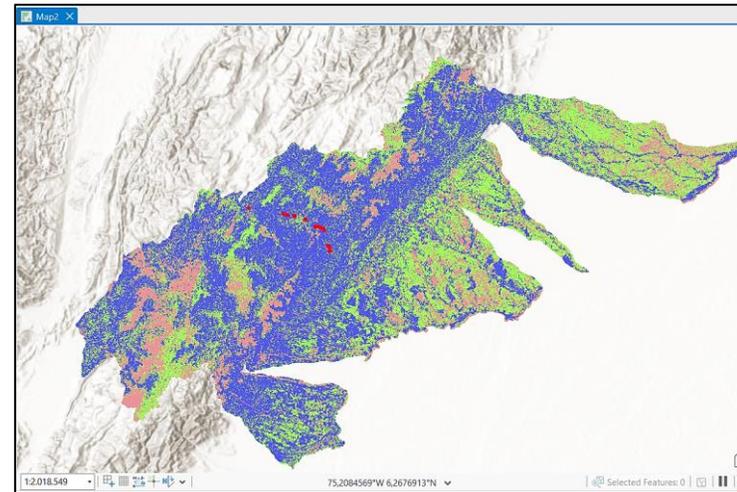
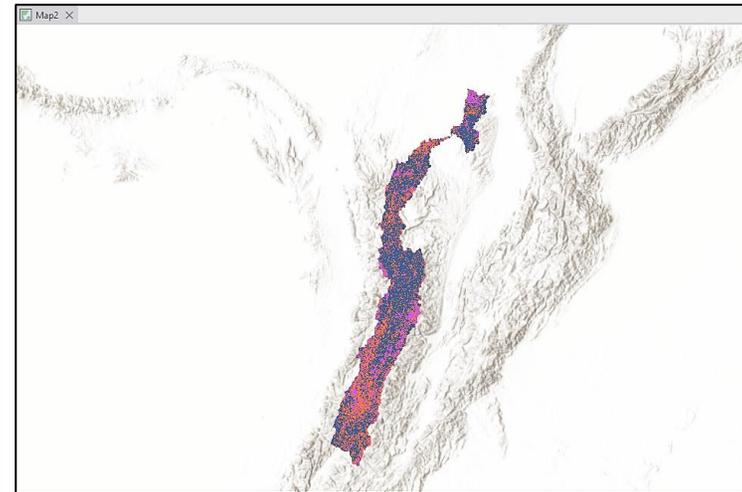


Se determinó para cada caso qué tipo de adyacencia se tenía respecto a las subzonas hidrograficas por las cuales pasa el área de intervención, este resultado fue necesario para la posterior calificación de los parametros determinantes para la selección del área potencial de compensación.

3ª. Conversión  
ráster (raster)

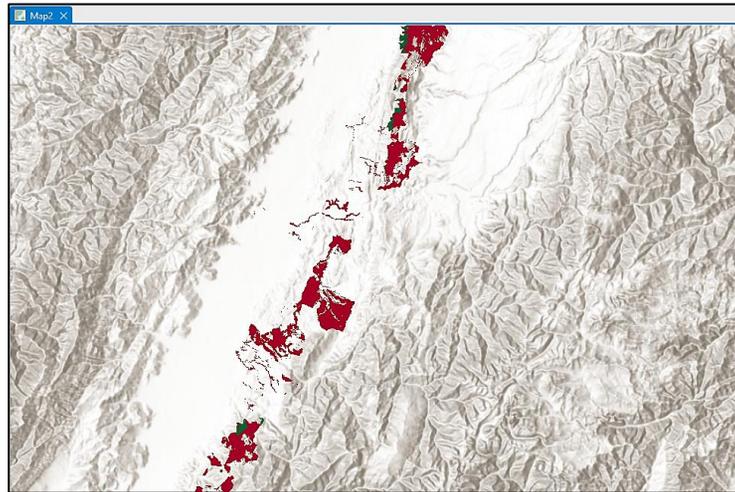


3b.  
Reclasificació  
n NDVI  
(raster)

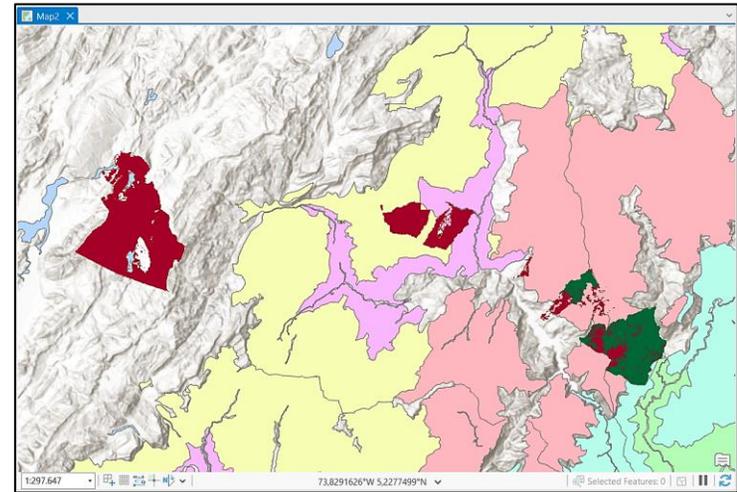


Para ambos casos, la reclasificación se realizó con tres categorías para el cálculo de NDVI de un solo momento, dada la disponibilidad de imágenes con poca nubosidad que permitieran identificar los cambios en la vegetación en un análisis multitemporal. Este proceso se hizo para toda el área de estudio obtenida en el modelo 2a.

4. Selección  
de áreas  
(raster)



Verde: áreas viables



Verde: áreas viables

Rojo: áreas con baja viabilidad

Rojo: áreas con baja viabilidad

Como resultado principal se obtienen para ambos casos las áreas potenciales de compensación de 39 mil para Alférez y 16 mil para Chivor aproximadamente. Es preciso resaltar nuevamente, que estas extensiones tan grandes obedecen a la superficie de área que se obtuvo como área de estudio siguiendo los lineamientos del MCCB, pero que el usuario puede acotar incluyendo más criterios de calificación y descarte, siendo esta una herramienta de aproximación para selección de áreas que cumplan con los supuestos del dónde compensar.

*Peso de la información obtenida (GB)*

3,10 GB

3,6 GB

*La información generada dada la extensión de las áreas de intervención de ambos casos de estudio, generaron información con pesos considerables, lo anterior debido a la superficie de área que se obtuvo como área de estudio y al peso de los diferentes ráster generados y procesados para la obtención de las áreas de compensación.*

*Tiempo de procesamiento (horas)*

1,25

1,1

Para ambos casos el tiempo de procesamiento fue similar, resaltando que los recursos empleados para todo el proceso contemplaron el uso de un PC con procesador Intel(R) Core (TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz 1.99 GHz y 20 GB de memoria RAM, lo afecta directamente el tiempo de procesamiento. Adicionalmente, el uso de ArcGis Pro requiere de conexión a internet y para el caso puntual se realizó con una conexión de 5 GHz de banda y 300 Mbps.

## 8 Conclusiones

Durante la fase de diseño de la herramienta se evidenció problemas en la ejecución por la inestabilidad del ArcGIS pro, por lo que se hace necesario replicar el modelo para otros aplicativos geográficos como QGIS y si es necesario debido al volumen de la información replicarlo como un script que trabaje en la nube y facilite el procesamiento de la información.

Así mismo, se evidencia una alta dificultad cuando las zonas hidrográficas que se quiere consultar son extensas o el proyecto requiere de la intervención de una o más subzonas que abarcan una o más áreas, puesto que el procesamiento de la ponderación supervisada requiere del índice NDVI, por lo que se considera necesario evaluar alternativas para desarrollar la herramienta en un script que no requiera de la máquina física para su procesamiento.

La selección del NDVI multitemporal, dependerá de la disponibilidad de imágenes satelitales que tengan un porcentaje bajo de nubosidad; si bien, esta opción se puede ajustar en el script, para áreas muy grandes y con zonas montañosas resulta difícil encontrar una colección que en alguno de sus periodos no presente alta nubosidad que al ser empleada generaría ruido en el resultado del NDVI multitemporal al mostrar cambios en el aumento o disminución de vegetación que puedan estar realmente asociadas a la presencia y ausencia de nubes.

Para los casos en los que el porcentaje de nubosidad no permite realizar el cálculo de un NDVI multitemporal, es viable usar el cálculo del NDVI para una sola temporada de tiempo en la que se pueda seleccionar un porcentaje bajo de nubosidad; este insumo es igualmente valioso para la identificación de áreas de vegetación aisladas, o con tensionantes asociados que requieran la priorización de implementar acciones de restauración ecológica en cualquiera de sus enfoques y/o preservación.

La herramienta propuesta facilita a los usuarios de licencias ambientales, determinar y verificar de manera adecuada la estimación del cuanto compensar, considerando tanto los ecosistemas transformados como seminaturales o naturales, teniendo en cuenta los ecosistemas sensibles que presentan un mayor factor de compensación, lo cual permitiría definir la necesidad de afectar ecosistemas naturales y realizar de manera más precisa la jerarquía de la mitigación definiendo una afectación menor sobre dichos ecosistemas.

Respecto a las áreas de compensación, la herramienta presenta un potencial identificando desde los ecosistemas transformados y teniendo en cuenta los criterios de ámbito geográfico y equivalencia ecosistémica. En este sentido se reduce el riesgo de no identificar ecosistemas relictuales que por sus características son considerados únicos y generar alertas sobre afectación, permitiendo a los usuarios definir la necesidad de modificar su proyecto u optimizarlo evitando la afectación de dichas áreas.

## 9 Recomendaciones

A manera de complemento, se sugiere emplear la metodología “Makurhini: Analyzing landscape connectivity” (Saura & Pascual-Hortal, 2007) para comparar la conectividad ecológica en dos escenarios; uno sin las áreas resultantes de compensación y otro con las áreas resultantes de compensación que permita observar si la propuesta de compensación impactara de manera positiva la conectividad ecológica del área de estudio.

Este cálculo se puede realizar mediante el software RStudio©, utilizando como insumo las capas de fragmentos de bosque en el escenario sin la compensación y los fragmentos del escenario actual más el área propuesta de compensación.

De igual forma, es de destacar que la herramienta desarrollada e implementada es aplicable a todo el territorio nacional, ya que permite la interacción entre los tomadores de decisiones, planificadoras y ejecutores de las compensaciones, de manera que se d cumplimiento a la obligación y a los lineamientos establecidos para su ejecución, por lo que se recomienda su uso oficial.

Por otra parte, se recomienda a los usuarios de la herramienta emplear para el modelo de “4. Selección de áreas”, complementar los criterios de ponderación incluyendo otros

adicionales que según la experticia del usuario, sean fundamentales para la selección de áreas, estos pueden ser, aspectos técnicos y jurídicos prediales, cercanía a vías, recursos hídricos, corredores biológicos, proveedores de insumos, pendientes, entre otros. Lo anterior, teniendo en cuenta que la herramienta desarrollada no es estática, y es adaptable al usuario y al objetivo que se plantee para ejecutar la compensación.

Finalmente, se recomienda trasladar la herramienta a un lenguaje que facilite el procesamiento como un Notebook (geopandas o collab), de manera que se disminuya el requerimiento de hardware que en ocasiones puede afectar el tiempo de procesamiento de los modelos, resaltando además, que de esta forma se podría conectar la herramienta a las fuentes de datos abiertos con la que se cuenta a nivel nacional, de manera que se tenga la información actualizada.

## 10 Anexos

Anexo 1. Modelo QW\_compensación y Geodatabase con información intermedia obtenida del procesamiento del modelo.

Anexo 2. Script Calculo NDVI para plataforma Google Earth Engine©

Anexo 3. Modelos de almacenamiento geografico para los casos de estudio

## 11 Referencias Bibliográficas

- Abdelrahman, M. A. E., Natarajan, A., Hegde, R., & Prakash, S. S. (2018). *Assessment of land degradation using comprehensive geostatistical approach and remote sensing data in GIS-model builder*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.002>
- Abdelrahman, M. A. E., & Tahoun, S. (2018). *GIS model-builder based on comprehensive geostatistical approach to assess soil quality*. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.012>
- ANLA. (2021). *MARCO NORMATIVO DE LAS COMPENSACIONES DEL MEDIO BIÓTICO*. MARCO NORMATIVO DE LAS COMPENSACIONES DEL MEDIO BIÓTICO. <https://www.anla.gov.co/eureka/normatividad/2678-marco-normativo-de-compensaciones-del-medio-biotico>
- Bigard, C., Thiriet, P., Pioch, S., & Thompson, J. D. (2019). *Strategic landscape-scale planning to improve mitigation hierarchy implementation: An empirical case study in Mediterranean France*. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104286>
- Bigard, C., Thiriet, P., Pioch, S., & Thompson, J. D. (2020). Strategic landscape-scale planning to improve mitigation hierarchy implementation: An empirical case study in Mediterranean France. *Land Use Policy*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104286>
- Blicharska, M., Hedblom, M., Josefsson, J., Widenfalk, O., Ranius, T., Öckinger, E., & Widenfalk, L. A. (2022). Operationalisation of ecological compensation – Obstacles and ways forward. *Journal of Environmental Management*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114277>
- Bonfilio, N., Jaimes, P., Sendra, J. B., Delgado, M. G., Franco Plata, R., Némiga, X. A., Ricardo, L., & Solís, M. (2012). Determination of Optimal Zones for Forest Plantations in the State of Mexico Using Multi-Criteria Spatial Analysis and GIS. *Journal of Geographic Information System*, 4, 204–218. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.43025>
- Brunetti, I., Sabatier, R., & Mouysset, L. (2023). A spatial model for biodiversity offsetting. *Ecological Modelling*, 481, 110364. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110364>
- Bull, J. W., Abatayo, A. Lou, & Strange, N. (2017). Counterintuitive Proposals for Trans-boundary Ecological Compensation Under ‘No Net Loss’ Biodiversity Policy. *Ecological Economics*, 142, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.010>

- Business and Biodiversity Offsets Programme (BBOP). (2012). *Standard on Biodiversity Offsets*. <http://bbop.forest-trends.org/guidelines/Standard.pdf>
- C., M., M.R., G., E., Q.-V., & W., R. (2017). La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia: Un análisis crítico. In *La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia: Un análisis crítico*. Center for International Forestry Research (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006611>
- Cancillería de Colombia. (2023, August 30). *Convenio sobre Diversidad Biológica (CBD)*. <https://www.cancilleria.gov.co/convenio-sobre-diversidad-biologica-cbd>
- Cares, R. A., Franco, A. M. A., & Bond, A. (2023). Investigating the implementation of the mitigation hierarchy approach in environmental impact assessment in relation to biodiversity impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 102(May), 107214. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107214>
- Cole, S., Moksnes, P. O., Söderqvist, T., Wikström, S. A., Sundblad, G., Hasselström, L., Bergström, U., Kraufvelin, P., & Bergström, L. (2021). Environmental compensation for biodiversity and ecosystem services: A flexible framework that addresses human wellbeing. *Ecosystem Services*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101319>
- Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA). (2018). *PORTAFOLIO DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN Y COMPENSACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO ESCALA 1:25.000*.
- Corzo Mora, G., Silva, L. M., Herrera Santos, C. M., Moncada Rasmussen Dora María, Puyana, J., Bejarano, J., Pinzón Tellez, J., Arias, J., & Vieira, M. I. (2018). *COMPENSACIONES BIÓTICAS EN PROYECTOS LINEALES: Lineamientos para su gestión efectiva*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. [www.puntoaparte.com.co](http://www.puntoaparte.com.co)
- David, S. R., Murphy, B. P., Czuba, J. A., Ahammad, M., & Belmont, P. (2022). *USUAL Watershed Tools: A new geospatial toolkit for hydro-geomorphic delineation*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105576>
- ESRI. (n.d.). *¿Qué es ModelBuilder?—ArcGIS Pro | Documentación*. ESRI. Retrieved October 27, 2023, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>
- GLOBAL BUSINESS AND BIODIVERSITY PROGRAMME. (2015). *No Net Loss and Net Positive Impact Approaches for Biodiversity: Exploring the potential application*

*of these approaches in the commercial agriculture and forestry sectors.* IUCN.  
[www.iucn.org/publications](http://www.iucn.org/publications)

- Godínez-Gómez, O., & Correa-Ayram, C. A. (2020). Makurhini: Analyzing landscape connectivity. In <https://github.com/connectscape/Makurhini>.
- Hrabanski, M. (2015). The biodiversity offsets as market-based instruments in global governance: Origins, success and controversies. *Ecosystem Services*, *15*, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.12.010>
- Hu, F., Yang, C., Schnase, J. L., Duffy, D. Q., Xu, M., Bowen, M. K., Lee, T., & Song, W. (2018). *ClimateSpark: An in-memory distributed computing framework for big climate data analytics*. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.03.011>
- IDEAM. (2013). Zonificación hidrográfica año 2013. In <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>. SIAC.
- IDEAM, INVEMAR, IIAP, IA vH, IGAC, PNN, MAVDT, & SINCHI. (2017). *Mapa de ecosistemas continentales, marinos y costeros de Colombia 2017. Versión 2.1*. IDEAM.
- Ilba, M. (2021). Parallel algorithm for improving the performance of spatial queries in SQL: The use cases of SQLite/SpatialLite and PostgreSQL/PostGIS databases. *Computers & Geosciences*, *155*, 104840. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104840>
- Instituto Alexander von Humboldt. (2018). Bosque Seco Tropical 2018 escala 1:100000. In *SIAC*.
- MADS, & ANLA. (2018). *METODOLOGÍA GENERAL PARA LA ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTUDIOS AMBIENTALES*.
- Mandle, L., Douglass, J., Lozano, J. S., Sharp, R. P., Vogl, A. L., Denu, D., Walschburger, T., & Tallis, H. (2016). *OPAL: An open-source software tool for integrating biodiversity and ecosystem services into impact assessment and mitigation decisions*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.008>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *MANUAL PARA LA ASIGNACIÓN DE COMPENSACIONES POR PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018a). *Manual de compensaciones del componente biótico* (Segunda Ed, Issue 2). <https://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/estrategia-nacional-de-compensaciones-ambientales/manual-de-compensaciones-del-componente-biotico>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018b). *Manual de compensaciones del componente biótico* (Segunda Ed, Issue 2).  
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/estrategia-nacional-de-compensaciones-ambientales/manual-de-compensaciones-del-componente-biotico>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018c, September 23). *CATÁLOGO DE MAPAS - IDEAM*. Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC).  
<http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Paramos Delimitados*. SIAC.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). POMCAS. In *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.  
<https://www.arcgis.com/sharing/rest/content/items/16ded4a9cb464511ae030d30224f68b5/data>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, & The Nature Conservancy. (2012). *Manual del Usuario para la herramienta MAFE v2.0 - Mapeo de Fórmulas Equivalentes* (Issue 25).
- Resolución 2182 de 2016., Pub. L. No. 2182, Resolucion-2182-de-2016 (2016).
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Humedales Ramsar*. SIAC.
- Moilanen, A., Kujala, H., & Mikkonen, N. (2020). A practical method for evaluating spatial biodiversity offset scenarios based on spatial conservation prioritization outputs. *Methods in Ecology and Evolution*, *11*(7), 794–803.  
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13381>
- Murcia, C., Guariguata, M. R., Quintero-Vallejo, E., & Ramírez, W. (2017). *La restauración ecológica en el marco de las compensaciones por pérdida de biodiversidad en Colombia* (CIFOR, Ed.). Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006611>
- CONVENIO SOBRE LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA, Naciones Unidas 1 (1992).  
<https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>
- Naghibi, S. A., Hashemi, H., & Pradhan, B. (2021). *APG: A novel python-based ArcGIS toolbox to generate absence-datasets for geospatial studies*.  
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101232>

- n.d. (2019, February 10). *Análisis de vegetación NDVI multitemporal en Google Earth Engine*. <https://www.gisandbeers.com/Analisis-de-Vegetacion-Ndvi-Multitemporal-Google-Earth-Engine/>.
- Nowak, M. M., & Pe, K. (2018). *Modeling potential tree belt functions in rural landscapes using a new GIS tool*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.118>
- Pande, C. B., Moharir, K. N., Varade, A. M., Abdo, H. G., Mulla, S., & Yaseen, Z. M. (2023). Intertwined impacts of urbanization and land cover change on urban climate and agriculture in Aurangabad city (MS), India using google earth engine platform. *Journal of Cleaner Production*, 422, 138541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138541>
- PNN. (2021). RUNAP. In <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>. SIAC.
- Quétier, F., Regnery, B., & Levrel, H. (2014). No net loss of biodiversity or paper offsets? A critical review of the French no net loss policy. *Environmental Science and Policy*, 38, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.11.009>
- Saenz, S., Walschburger, T., González, J. C., León, J., McKenney, B., & Kiesecker, J. (2013). A framework for implementing and valuing biodiversity offsets in colombia: A landscape scale perspective. *Sustainability (Switzerland)*, 5(12), 4961–4987. <https://doi.org/10.3390/su5124961>
- Salès, K., Frascaria-Lacoste, N., & Marty, P. (2023). The place of spatialized ecological information in defining and implementing biodiversity offsets policies. A comparative study of Colombia and France. *Environmental Science and Policy*, 147, 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.06.014>
- Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83(2–3), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>
- Vaissière, A. C., & Meinard, Y. (2021). A policy framework to accommodate both the analytical and normative aspects of biodiversity in ecological compensation. *Biological Conservation*, 253, 108897. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2020.108897>