



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo de análisis espacial como herramienta de intervención para el manejo integral de *Acacia decurrens* en el embalse de Tominé

Bryam Felipe Espinosa Pinzón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía
Bogotá, Colombia

2023

Modelo de análisis espacial como herramienta de intervención para el manejo integral de *Acacia decurrens* en el embalse de Tominé

Bryam Felipe Espinosa Pinzón

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Análisis Espacial

Director:

Ph.D. José Daniel Pabón Caicedo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía
Bogotá, Colombia

2023

Declaración de obra original

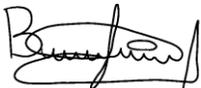
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Bryam Felipe Espinosa Pinzón

Fecha 24/04/2023

Resumen

Modelo de análisis espacial como herramienta de intervención para el manejo integral de *Acacia decurrens* en el embalse de Tominé

Resulta de especial importancia optimizar el manejo integral de la colonización de *A. decurrens* en el Área Operativa Inundable (AOI) del embalse de Tominé, ya que el conocimiento amplio de la ecología y dinámica de la invasión de esta especie, permite determinar con claridad los factores que inciden en su expansión, los cuales, a su vez determinan la distribución espacial del evento y proporcionan la capacidad de modelar el fenómeno natural con el fin de simularlo. Dada esta necesidad de conocimiento, se plantea el objetivo de disponer con un algoritmo en Model Builder - ArcGIS que permita definir las áreas que requieran intervención prioritaria de manejo integral de *A. decurrens* dentro del AOI del embalse de Tominé, de acuerdo con el tiempo teórico de madurez sexual de la especie después de las intervenciones aleatorias realizadas por el Plan de Manejo Ambiental entre los años 2015 a 2022.

Palabras clave: Model Builder; invasiones biológicas; colonización.

Abstract

Spatial analysis model as a tool for the integral management of *Acacia decurrens* in the Tominé reservoir

It is especially important to optimize the integral management of the colonization of *A. decurrens* in the Floodable Operational Area (AOI) of the Tominé reservoir, since the extensive knowledge of the ecology and dynamics of the invasion of this species, allows to clearly determine the factors that affect its expansion, which, in turn, determine the spatial distribution of the event and provide the ability to model the natural phenomenon. in order to simulate it. Given this need for knowledge, the objective is to have an algorithm in Model Builder - ArcGIS that allows defining the areas that require priority intervention for the comprehensive management of *A. decurrens* within the AOI of the Tominé reservoir, according to the theoretical time of sexual maturity of the species after the random interventions carried out by the Environmental Management Plan between the years 2015 and 2022.

Keywords: ModelBuilder; biological invasions; colonization.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	¡Error! Marcador no definido.
Lista de Símbolos y abreviaturas	¡Error! Marcador no definido.
Introducción	1
1. Antecedentes	5
1.1 Área de estudio	5
1.2 Introducción de <i>Acacia decurrens</i> en el área de estudio	8
1.3 Manejo integral aleatorio de <i>Acacia decurrens</i> en el embalse de Tominé	12
2. Justificación	14
3. Estado del Conocimiento	15
3.1 Invasiones biológicas	15
3.2 Invasión de <i>Acacia decurrens</i>	17
3.3 Modelos de manejo espacial de invasiones biológicas.....	19
4. Metodología	21
4.1 Materiales e insumos	21
4.2 Procedimiento	24
4.2.1 Identificación del periodo de establecimiento de núcleos de plantaciones forestales de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé	24
4.2.2 Cobertura de la tierra inicial y actual en plantaciones maduras de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé	24
4.2.3 Mapa factores potencializadores de la invasión de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé	25
4.2.4 Mapa y algoritmo Model Builder para las intervenciones de manejo integral aleatorio de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé - (Periodo 2015 a 2022).....	25
4.2.5 Mapa y algoritmo Model Builder para las intervenciones de manejo integral aleatorio de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé - (Periodo 2015 a 2022).....	26
5. Resultados	29
5.1 Identificación del periodo de establecimiento de núcleos de plantaciones forestales de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé.....	29

5.2	Cobertura de la tierra inicial y actual en plantaciones maduras de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé	30
5.3	Mapa de factores potencializadores de la invasión de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé.....	32
5.4	Mapa y algoritmo Model Builder para las intervenciones de manejo integral aleatorio de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé - (Periodo 2015 a 2022).....	35
5.5	Mapa y algoritmo Model Builder para priorización de áreas de manejo integral de <i>A. decurrens</i> en el área operativa inundable (AOI) del embalse de Tominé	38
6.	Discusión y conclusiones	41
6.1	Discusión	41
6.2	Conclusión	42
	Bibliografía	45

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Áreas operativas del embalse de Tominé.....	7
Figura 1-2: Cambio visual cobertura natural de suelo entre los años 1959 y 2022 – Sector occidental embalse de Tominé.....	9
Figura 1-3: Cambio visual cobertura natural de suelo entre los años 1959 y 2022 – Sector suroccidental embalse de Tominé.....	10
Figura 1-4: Cambio visual cobertura natural de suelo entre los años 1959 y 2022 – Sector sur embalse de Tominé.....	11
Figura 4-1: Diagrama de flujo metodológico.....	28
Figura 5-1: Identificación del periodo de establecimiento de plantaciones de <i>A. decurrens</i> en el embalse de Tominé entre 1985 a 1992.....	30
Figura 5-2: Cobertura de la tierra inicial (1985) y actual (2020) en plantaciones maduras de <i>A. decurrens</i> en el área operativa del embalse de Tominé.....	31
Figura 5-3: Ejemplo visual variación de cobertura en <i>A. decurrens</i> en el área operativa del embalse de Tominé.....	32
Figura 5-4: Mapa de factores potencializadores de invasión de <i>A. decurrens</i> – embalse Tominé.....	34
Figura 5-5: Algoritmo Model builder de intervenciones de manejo integral de <i>A. decurrens</i> entre 2015 y 2022.....	36
Figura 5-6: Mapa de intervenciones de manejo integral aleatorio de <i>A. decurrens</i> entre 2015 y 2022.....	37
Figura 5-7: Model Builder para el manejo integral priorizado de <i>A. decurrens</i> en el Área Operativa Inundable del embalse de Tominé.....	39
Figura 5-8: Mapa de manejo integral priorizado para regeneración natural de <i>A. decurrens</i> en el Área Operativa Inundable de embalse de Tominé.....	40

Introducción

La *Acacia decurrens* Wild es un árbol originario de Australia, perteneciente a la familia botánica Fabaceae, con características biológicas que la determinan como una especie exótica invasora en varias partes del mundo (D. Richardson *et al.*, 2015). Las particularidades que la definen como una especie invasora son: crecimiento vertical acelerado, maduración sexual temprana, alta producción de semillas, producción fenológica recurrente, alta capacidad de rebrotes, producción de compuestos alelopáticos y adaptación dentro de áreas degradadas (Donaldson *et al.*, 2014; Vieites-Blanco y González-Prieto, 2020).

Para la década de 1980, en Cundinamarca se establecieron núcleos de plantaciones forestales de *A. decurrens* en distintas zonas del departamento. Una de las áreas con mayor intervención fue la cuenca media y alta del río Bogotá; el objetivo de su establecimiento en la cuenca, fue iniciar procesos de restauración de suelos degradados, dentro de los cuales se encontraban los suelos del área operativa del embalse de Tominé (Velásquez-González y Viancha Rodríguez, 2021).

La medida de manejo ambiental implementada en la década de 1980 para la restauración de suelos no contempló la capacidad de colonización de esta especie por fuera de los núcleos de establecimiento, convirtiéndola en invasora para la región (CAR, 2020): el embalse de Tominé no fue ajeno a la problemática ambiental, ya que la colonización de *A. decurrens* en el área operativa se convirtió en un impacto ambiental negativo, que debían gestionarse mediante un plan de manejo ambiental (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. - GEB S.A. E.S.P. *et al.*, 2021).

Actualmente el Área Operativa No Inundable (AONI) cuenta con 311,74 ha de plantaciones forestales de *A. decurrens*, sobremaduras y con cerca de 37 años de aporte de semillas a las zonas circundantes. En cuanto al Área Operativa Inundable (AOI), entre los años 2005 y 2015 se realizó el aprovechamiento de plantaciones forestales maduras de *A. decurrens* en una superficie de 387,8 ha (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. *et al.*, 2023). A partir del disturbio ecológico generado por este aprovechamiento, se iniciaron procesos de regeneración natural y colonización de *A. decurrens* en nuevas áreas dentro de la misma AOI (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P., 2021).

El proceso de colonización de *A. decurrens* en el AOI del embalse es tratado por el Plan de Manejo Ambiental, con el objetivo de reducir el potencial de invasión dentro del área operativa y disminuir los aportes de materia orgánica al agua del embalse. En términos socioeconómicos, el manejo ambiental de la invasión de *A. decurrens*, contribuye con la función primaria del embalse constituida en regular los caudales del río Bogotá y mantener en condiciones óptimas el agua para uso doméstico en acueductos veredales y municipales de la cuenca Tominé (Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé, 2008).

En este contexto, desde el 2011 y hasta la fecha, el Plan de Manejo Ambiental del embalse de Tominé gestiona el manejo integral de la regeneración natural de *A. decurrens* en el AOI del embalse, trabajos que hasta el 2022 se han desarrollado en 2596,36 ha, con un promedio anual de 216,36 ha/año. Este manejo consiste en el corte de biomasa aérea y subterránea de la expresión sexual y/o asexual de la *A. decurrens*, con intervenciones aleatorias en las áreas del AOI y sin una frecuencia clara de intervención espacial. (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. *et al.*, 2021).

Resulta de especial importancia optimizar el manejo integral de la colonización de *A. decurrens* en el AOI del embalse de Tominé, ya que el conocimiento amplio de la ecología y dinámica de la invasión de esta especie (Morris *et al.*, 2011; Richardson y Rejmánek, 2011; Wilson *et al.*, 2011), permite determinar con claridad los factores que inciden en su

expansión, los cuales, que a su vez determinan la distribución espacial del evento y proporcionan la capacidad de modelar el fenómeno natural con el fin de simularlo (Maldonado y Gómez Cruz, 2010).

Dada esta necesidad de conocimiento, se plantea el objetivo de disponer con un algoritmo en Model Builder - ArcGIS que permita definir las áreas que requieran intervención prioritaria de manejo integral de *A. decurrens* dentro del AOI del embalse de Tominé, de acuerdo con el tiempo teórico de madurez sexual de la especie después de las intervenciones aleatorias realizadas por el Plan de Manejo Ambiental entre los años 2015 a 2022.

1. Antecedentes

1.1 Área de estudio

El embalse de Tominé se ubica en la cuenca alta del río Bogotá, entre los municipios de Guasca, Guatavita y Sesquilé, 44 km al noreste de la ciudad de Bogotá D.C. Su función principal es almacenar o embalsar las aguas provenientes —por gravedad— del cauce del río Tominé (confluencia del río Siecha y el río Aves) y las aguas provenientes mediante el bombeo de los caudales excedentes de la cuenca alta, cumpliendo la función de regulador hídrico del caudal de la cuenca media del río Bogotá. De igual manera, cumple funciones secundarias como prestador de servicios ecosistémicos relacionado con el uso de agua doméstica para acueductos veredales y municipales. (Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé, 2008).

El embalse cuenta con un perímetro de 87,65 km y un área operativa total de 4887,66 ha, las cuales se dividen en dos zonas de manejo (*Figura 1-1*) (Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé, 2008):

- a - Área Operativa Inundable (AOI):** dependiente del volumen de agua almacenado por la operación del embalse, se ubica entre el nivel mínimo técnico (2566,63 m s.n.m.) y la cota máxima de inundación (2598,38 m s.n.m.), y cuenta con una superficie total de 3640,77 ha de las cuales, en promedio durante el 2022, permanecieron inundadas el 51,7 % (1882,28 ha).

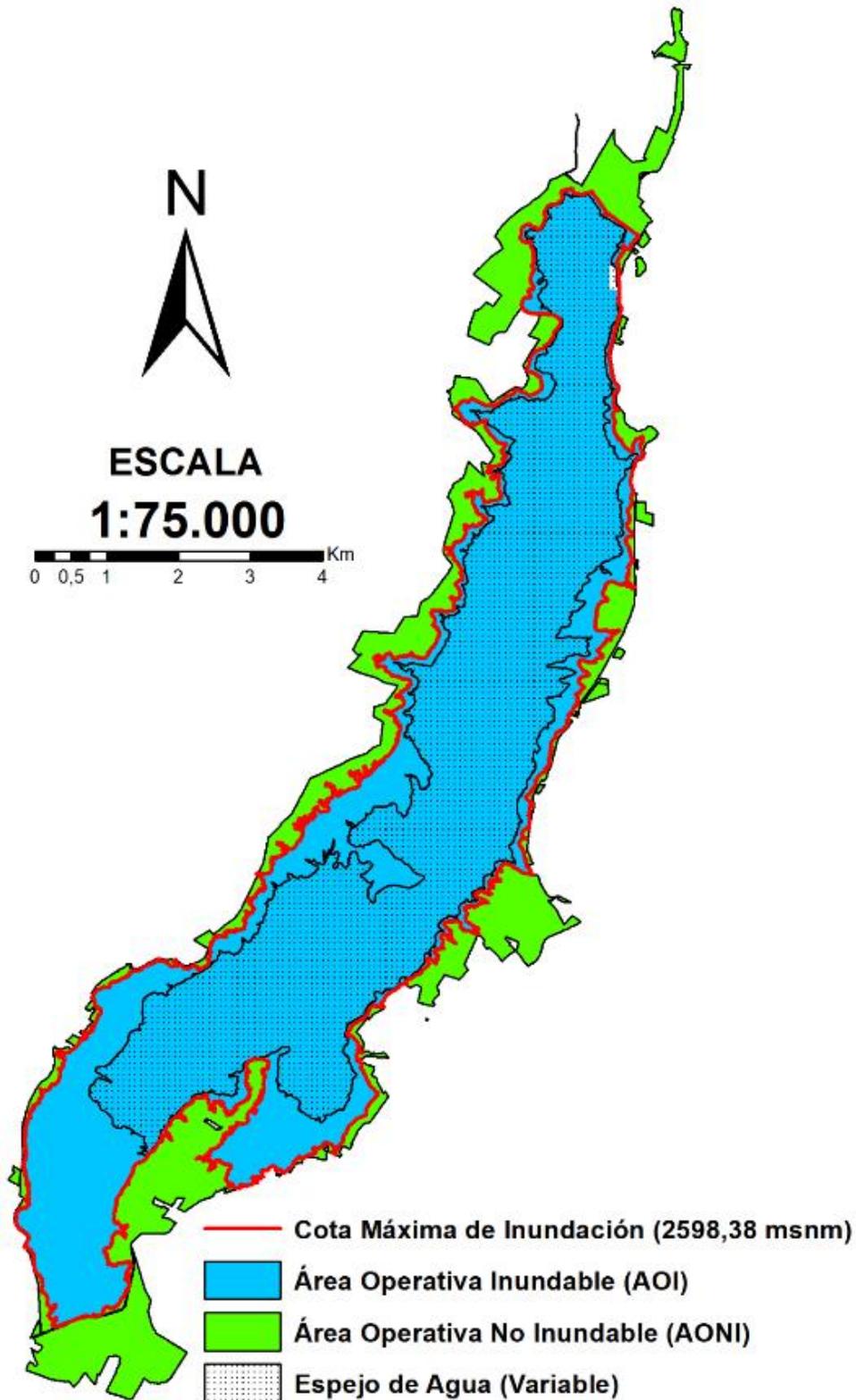
b - Área Operativa No Inundable (AONI): no dependiente del volumen de agua almacenado por la operación del embalse, se ubica entre la cota máxima de inundación (2598,38 m s.n.m.) y los límites prediales del Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P., cuenta con una superficie total de 1246,89 ha.

c - Espejo de Agua (EA): volumen de agua variable represado por la operación del embalse; hace parte del Área Operativa Inundable (AOI).

d - Cota máxima de inundación (CMI): hace referencia a la cota del nivel máximo físico a donde puede llegar el agua represada por el embalse; se identifica por la cota 2598,38 m s.n.m. y es el límite entre el Área Operativa Inundable (AOI) y el Área Operativa No Inundable (AONI).

Para el desarrollo de este trabajo se tomarán como áreas de estudio el *Área Operativa Inundable (AOI)* y el *Área Operativa No Inundable (AONI)* del embalse de Tominé.

Figura 1-1: Áreas operativas del embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Adaptado de GEB S.A. E.S.P., 2023

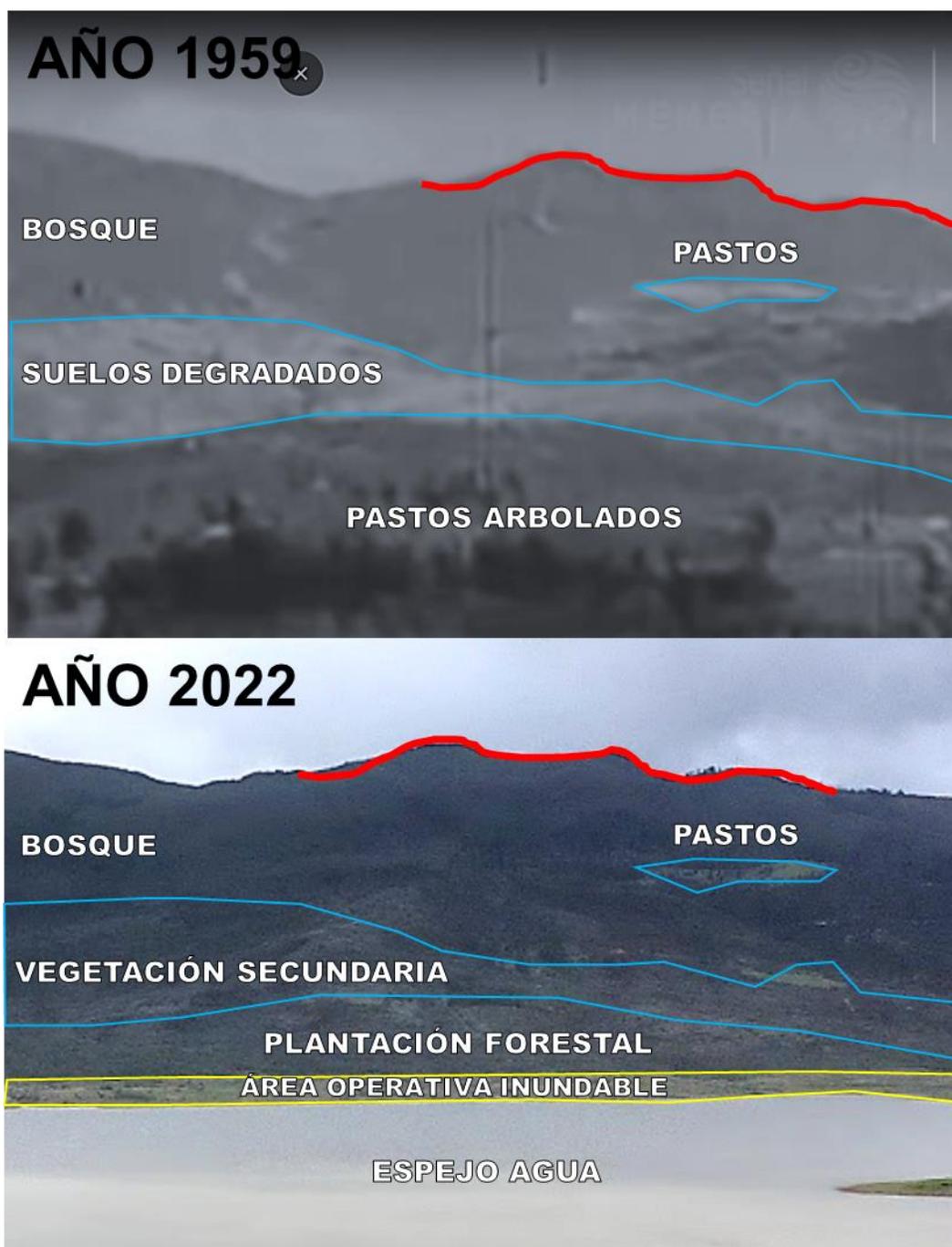
1.2 Introducción de *Acacia decurrens* en el área de estudio

En 1959 la Empresa de Energía de Bogotá S.A. E.S.P. —hoy Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. (GEB S.A. E.S.P.)— inició la construcción del embalse de Tominé, diseñado y ejecutado por INGETEC. El 10 de octubre de 1962, con el cierre de la compuerta de la Presa de Sesquilé, se inició la operación del embalse (Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé, 2008).

Como lo señala el informe de diseño del proyecto —el cual se adaptó a la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra (INGETEC, 1959; IDEAM, 2010), desde sus inicios (1959)—, el proyecto embalse de Tominé se caracterizaba por disponer de coberturas de tierra principalmente en territorios agrícolas de cultivos transitorios (hortalizas, tubérculos), territorios agrícolas en pastos (pastos limpios, pastos arbolados *Eucalyptus globulus* y *Pinus* sp.) y bosques y/o áreas seminaturales (bosque fragmentado, herbazal abierto, vegetación secundaria, tierras desnudas y degradadas).

El reportaje audiovisual “*Guatavita 1959*” —realizado por Tele Ayer en el año 1991—, muestra imágenes del municipio de Guatavita antes de la inundación requerida para el proyecto, y describió la cobertura natural del suelo de la siguiente manera: “*El valle de Tominé es a trechos, mullido mantel de verdura y en su mayor extensión tierra estéril árida, con camellones sombreados por eucaliptus*” (RTVC - Señal Memoria, 1991). Se extraen imágenes del municipio de Guatavita del documental de 1959 y se compara con imágenes del año 2022, en las que se puede evidenciar el cambio de cobertura en 61 años de funcionamiento del proyecto (*Figuras 1-2 a 1-4*).

Figura 1-2: Cambio visual cobertura natural de suelo entre los años 1959 y 2022 – Sector occidental embalse de Tominé.



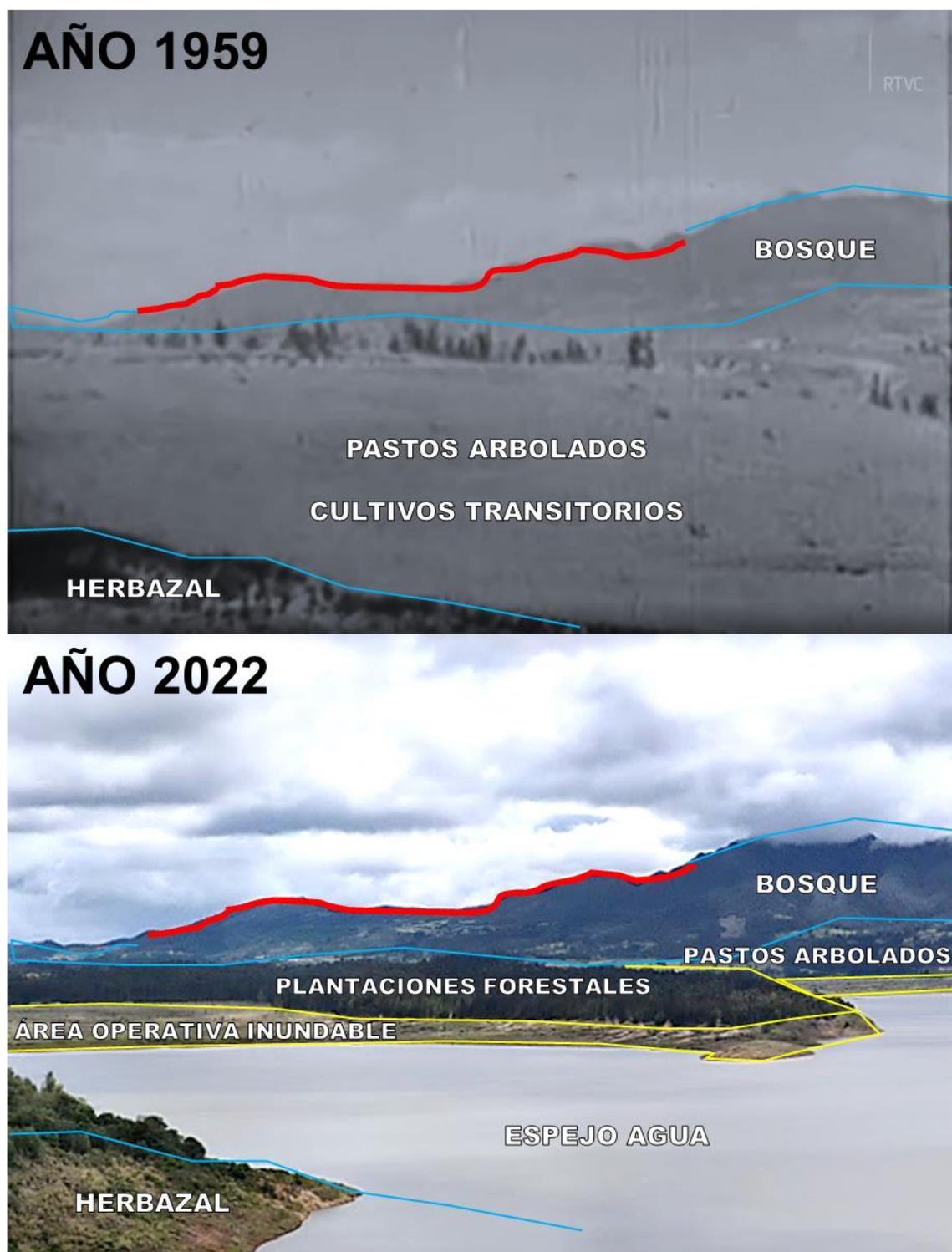
Nombre de la fuente: Adaptado de RTVC - Señal Memoria, 1959.

Figura 1-3: Cambio visual cobertura natural de suelo entre los años 1959 y 2022 – Sector suroccidental embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Adaptado de RTVC - Señal Memoria, 1959.

Figura 1-4: Cambio visual cobertura natural de suelo entre los años 1959 y 2022 – Sector sur embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Adaptado de RTVC - Señal Memoria, 1959.

En la década de 1980, propietarios privados de tierra e instituciones gubernamentales y académicas del departamento de Cundinamarca introdujeron y establecieron núcleos de plantaciones forestales de *Acacia decurrens* y *Acacia melanoxylon* como estrategia para la restauración de suelos degradados o erosionados. Una de las regiones donde se establecieron los núcleos — cerca de 500 ha las establecidas entre las décadas 80 a 90 para la cuenca Tominé (Velásquez-González y Viancha Rodríguez, 2021)— fue la cuenca media y alta del río Bogotá, donde se encuentra el área operativa del embalse.

1.3 Manejo integral aleatorio de *Acacia decurrens* en el embalse de Tominé

No obstante, la medida de manejo ambiental implementada en la década de 1980 para la restauración de suelos no contempló la capacidad de colonización de *A. decurrens* por fuera de los núcleos de establecimiento de las plantaciones forestales, convirtiendo la especie exótica en invasora para la región (CAR, 2020), y el embalse no fue ajeno a la problemática ambiental: la colonización de *A. decurrens* en el área operativa se convirtió en un pasivo ambiental que debió gestionarse años posteriores a su introducción en el territorio (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P - GEB S.A. E.S.P. *et al.*, 2021).

En 1992, una vez finalizado del establecimiento de las plantaciones de *A. decurrens* en el área operativa del embalse de Tominé, se inició el proceso natural de crecimiento, maduración y reproducción de la especie dentro de la zona; pero fue solo hasta el 2005 que la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), autoridad ambiental regional, solicitó al GEB S.A. E.S.P. la remoción de la vegetación arbórea o arbustiva existente dentro de AOI del Embalse de Tominé (Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé, 2008).

Acatando la solicitud de la CAR, el GEB S.A. E.S.P. inició el aprovechamiento forestal de las plantaciones de *A. decurrens* establecidas dentro del AOI del embalse de Tominé, actividad que se desarrolló entre 2005 y 2015, dejando como resultado la tala rasa de 387,8 ha, ocasionando que el AOI quedara sin vegetación de *A. decurrens* (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. et al., 2023).

A partir del disturbio ecológico generado en el AOI del embalse debido al aprovechamiento forestal, se iniciaron procesos de regeneración natural y de colonización de *A. decurrens* en las áreas donde se encontraban las plantaciones forestales iniciales y en nuevas áreas desprovistas de vegetación. Lo anterior, a razón de tres motivantes de la biología propia de *A. decurrens*: (1) banco de semillas latente en áreas de aprovechamiento forestal; (2) dispersión de semillas desde AONI, y (3) regeneración natural asexual (rebrotos de raíz) en las áreas disturbadas por los aprovechamientos forestales (Perea Rojas, 1992; Mora Goyes et al., 2016; IAvH y Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P., 2021).

En virtud de lo anterior, desde el año 2011 el GEB S.A. E.S.P. gestiona el manejo integral de la regeneración natural de *A. decurrens* en el AOI del embalse (Plan de Manejo Ambiental del Embalse de Tominé). A 2022 se han desarrollado trabajos de manejo en 2596,36 ha, con un promedio de 216,36 ha/año. Este manejo consiste en el corte de biomasa aérea y subterránea de la expresión sexual y/o asexual de la *A. decurrens*, con intervenciones aleatorias en las áreas del AOI y sin una frecuencia clara de intervención espacial. (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. et al., 2021). Las intervenciones aleatorias son programadas de acuerdo con inspecciones visuales en terreno: se decide de acuerdo con el tamaño de la regeneración natural, y la prioridad de intervención para el manejo integral de la colonización.

2. Justificación

Para poder reducir las consecuencias del proceso activo de colonización de *A. decurrens* y evitar con ello la invasión de esta especie exótica invasora dentro del Área Operativa Inundable (AOI) del embalse de Tominé, se requiere una metodología que permita optimizar y predecir áreas en procesos de regeneración natural de esta especie para que sean abordadas por el manejo integral que desarrolla actualmente el GEB S.A. E.S.P.

Esta predicción espacial se realizará de acuerdo con la información de manejo integral aleatorio de *A. decurrens* realizado en el AOI, factores potencializadores de colonización de la especie y formulación del ciclo de maduración reproductiva de *A. decurrens*, con lo cual se lograría optimizar la actividad. Este nuevo proceso se realizaría con el uso de herramientas de análisis espacial disponibles, lo que conlleva a mudar un sistema de manejo integral aleatorio basado en inspecciones visuales en terreno a un sistema de manejo integral predecible con el uso de algoritmos de Model Builder - ArcGIS.

Con el desarrollo de esta metodología se abordaría los objetivos de control ambiental establecidos en el Plan de Manejo Ambiental del Embalse de Tominé, relacionados con la reducción de los aportes de materia orgánica al agua del embalse y la conservación de las condiciones óptimas para el uso doméstico del agua en acueductos veredales y municipales de la cuenca Tominé.

3.Estado del Conocimiento

3.1 Invasiones biológicas

Las invasiones biológicas son ocasionadas de forma natural o inducida por actividades humanas, siendo su mayor efecto la alteración de los niveles de organización de la biodiversidad dentro de los ecosistemas nativos (Coblentz, 1990; Duraiappah *et al.*, 2005; Montero-Castaño *et al.*, 2018). Es por ello que las invasiones biológicas se consideran la segunda causa mundial de pérdida de biodiversidad, ya que son capaces de sobrepasar las barreras impuestas por el ambiente, permitiendo la interacción con la biota nativa hasta lograr un punto de adaptación y colonización (Coblentz, 1990; Duraiappah *et al.*, 2005; Hulme, 2006; Montero-Castaño *et al.*, 2018; Pyšek *et al.*, 2012; Ríos y Vargas, 2003; Wittenberg y Cock, 2001).

En general, la presencia de invasiones biológicas en los ecosistemas se considera como un impacto potencialmente negativo en términos económicos y sociales, más aún cuando adquiere representatividad en la pérdida del bienestar humano limitando la productividad de las áreas invadidas, y generando un conflicto entre los espacios naturales y la necesidad del hombre (Kolar y Lodge, 2001; Ríos y Vargas, 2003).

En términos de plantas, a nivel mundial se han reportado cerca de 164 familias reconocidas como especies invasoras, siendo la familia Fabaceae una de las más representativas; a esta familia pertenece el género *Acacia* (Pyšek, 1998; Boudjelas *et al.*, 2000; D. M. Richardson y Rejmánek, 2011). Se han declarado invasiones biológicas a consecuencia de *A. decurrens* en Indonesia, Nueva Zelanda y Sudáfrica. En Colombia es considerada como una especie con alto potencial de invasión, siendo el departamento de Cundinamarca una de las regiones con mayor presencia de la especie a nivel nacional (Perea Rojas, 1992; Mora Goyes *et al.*, 2016; Gutiérrez-Bonilla *et al.*, 2017; CAR, 2020; WFO, 2023).

A partir de la problemática ambiental nacional relacionada con las invasiones biológicas, se han realizado esfuerzos importantes para identificar, manejar y controlar las especies exóticas invasoras en el territorio (Guerrero-Cupacán, 2020). Actualmente contamos con normatividad ambiental de carácter nacional que declara las especies exóticas invasoras (Resolución 848 de 23 de mayo de 2008 MAVDT, Resolución 0207 de 03 de febrero de 2010 MAVDT); adicionalmente se crea el Comité Técnico Nacional de Especies Introducidas y/o Trasplantadas Invasoras (Resolución 1204 de 25 de julio de 2014 MADS); se formula el Plan Nacional para la Prevención, el Control y Manejo de las Especies Introducidas, Trasplantadas e Invasoras, y se establecen lineamientos para la prevención, control y manejo integral de algunas especies exóticas invasoras (IAvH, 2014).

A pesar de la normatividad ambiental vigente, en Colombia no se considera a *A. decurrens* como una especie exótica invasora. Lo contrario ocurre con la administración ambiental regional ejercida por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, que sí la catalogó como especie invasora y determinó los lineamientos para su manejo integral en el territorio CAR (Mora Goyes et al., 2016; CAR, 2020).

Actualmente se define a nivel nacional a las especies exóticas invasoras como “aquella capaz de colonizar efectivamente un área en donde se ha interrumpido la barrera geográfica y se han propagado en hábitats naturales o seminaturales y cuyo establecimiento y expansión amenaza los ecosistemas o especies con daños económicos y ambientales” (MAVDT, 2006).

Ahora bien, se deben conocer claramente las características de los procesos y la ecología de las invasiones biológicas, para determinar la mejor manera de realizar su manejo y control (Ríos y Vargas, 2003). Por lo tanto, una especie invasora es considerada como tal si cumple con algunas características ecológicas generalistas, entre ellas: alta tasa de reproducción sexual (semilla) o asexual (rebrote), amplia adaptabilidad, plasticidad, alta

dispersión, crecimiento vertical acelerado, maduración sexual temprana, producción fenológica recurrente, producción de compuestos alelopáticos y adaptación dentro de áreas degradadas (Donaldson *et al.*, 2014; Vieites-Blanco y González-Prieto, 2020)

De igual manera, el proceso de invasión considera tres fases (D. M. Richardson y Pyšek, 2006; Gutiérrez-Bonilla *et al.*, 2017), determinadas como:

- Introducción: referente a llegada de propágulos de una especie con características ideales para ser invasora.
- Establecimiento: visto como la capacidad de reproducción y establecimiento de una especie invasora en una nueva área.
- Invasión: referido a la expansión de la especie invasora en nuevas áreas a partir del establecimiento, lo que permite entender las dinámicas de las colonizaciones y así poder frenar los impactos a futuro.

Así pues, es de vital importancia interpretar los procesos biológicos y la ecología de las especies invasoras, para limitar sus consecuencias perjudiciales y abordar la problemática actual (Newbold *et al.*, 2016)

3.2 Invasión de *Acacia decurrens*

Al menos 24 especies de *Acacia*, provenientes en su mayoría de Australia, han sido reportadas como invasoras en diferentes partes del mundo. Esto incluye zonas con clima mediterráneo y zonas con clima tropical. Varias de estas especies —*A. decurrens* y *A. melonoxylon*, entre otras—, se reportan en cinco o más sitios (D. M. Richardson y Rejmánek, 2011). Localmente, en el departamento de Cundinamarca se han utilizado para el control de erosión y rehabilitación de zonas altamente degradadas (Solorza Bejarano, 2012; CAR, 2020).

Los factores asociados a las invasiones de *Acacia* son numerosos y complejos. En tal sentido adquieren importancia los estudios predictivos sobre la ocurrencia aleatoria de *Acacia saligna* en áreas nuevas, de acuerdo con factores asociados a disponibilidad de propágulos, factores abióticos y factores bióticos (Lozano *et al.*, 2020). Mediante un modelo lineal generalizado se estableció que la cercanía a plantaciones, la red de vías y las áreas urbanizadas explican en un grado importante la invasión. En un rango menor —pero también significativo— se evidenció que la ocurrencia está asociada positivamente a temperatura y humedad, y negativamente asociada a ocurrencia de fuego. Tal reflexión reitera la importancia del monitoreo ecológico prolongado; en este, caso con el uso de técnicas de análisis espacial.

La invasión biológica de *A. decurrens* ocurre por superioridad competitiva y por la desaparición de barreras que pueden detener su desarrollo (Valéry *et al.*, 2008). La desaparición de barreras está relacionada principalmente con condiciones externas ampliamente mediadas por acciones humanas: en el caso del embalse de Tominé, las medidas de manejo integral aleatoria que se desarrollan posterior al disturbio de aprovechamiento forestal y la nula presencia de vegetación arbórea y arbustiva en el Área Operativa Inundable.

La rápida colonización de sitios por especies de *Acacia* está asociada con rasgos reproductivos como rebrote abundante (Fuentes-Ramírez *et al.*, 2011), alta inversión en producción de flores (Correia *et al.*, 2014) y polinización combinada por viento y abejas (Giovanetti *et al.*, 2018). También tienen bancos de semillas persistentes (Le Maitre *et al.*, 2011) generados a partir de períodos cortos de producción, períodos de fructificación prolongados y propágulos relativamente pequeños (Solorza Bejarano, 2012).

Tanto *A. decurrens* como *A. melanoxyton*, presentes en la zona de estudio e incluidas en listados de especies con potencial invasor, presentan rasgos que explican tal condición.

Las semillas de *A. decurrens* tienen germinación temprana, entre 1 y 2 semanas después de la siembra o disturbio del suelo, y presentan alta viabilidad. Un kilo de semilla produce hasta 20.000 plántulas (Trujillo, 2015). Los bancos de semillas son viables a lo largo de décadas, son resistentes a inundaciones, y su germinación es estimulada por fuego (D. M. Richardson y Kluge, 2008); en cambio, la regeneración natural es aleatoria y no estima un tiempo o cantidades promedio de emergido el rebrote post disturbio. Cuando es por semilla, *A. decurrens* alcanza la madurez sexual a los dos años (24 meses) (Lozano *et al.*, 2020); para rebrotes, entre los 12 y 14 meses (Solorza Bejarano, 2012). Los datos expuestos en cuanto a la madurez sexual se convierten en la variable predictora del modelo desarrollado en este estudio.

3.3 Modelos de manejo espacial de invasiones biológicas

El modelamiento espacial con el uso de software SIG permite simplificar la realidad percibida en representaciones de objetos digitales, con atributos que describen su relación con el territorio (Goodchild & Haining, 2004). Los modelos de invasiones biológicas nacen de la necesidad de entendimiento de las dinámicas de infestación —a razón de los impactos que esta ocasiona en el espacio (Heger y Trepl, 2003; Shigesada y Kawasaki, 1997)—, enfocando los estudios en funciones ecológicas principalmente relacionadas con la migración o la colonización en nuevas áreas (Vicente *et al.*, 2019), y con la dispersión (Rouget *et al.*, 2016) o distribución (Gutierrez *et al.*, 2011) de la especie objeto de estudio.

El éxito de los modelos de invasión biológica enfocados al manejo integral radica en la capacidad de revelar poblaciones invasoras que inicien su etapa reproductiva o de dispersión, priorizando el actuar del manejo sobre estas (Kaplan *et al.*, 2014) para con ello reducir el potencial de invasión. Esta clase de modelos los describe Brimicombe, (2009) como lógicos, al incorporar en el modelo conceptual estructuras de datos que permiten la interpretación de la realidad del espacio, y que al unirse con los software GIS se vuelven modelos computacionales.

Son varios los usos que se ha dado a estos modelos computacionales generados a partir del uso de ModelBuilder de ArcGIS: en Hungría, por ejemplo, se modeló la erosión del suelo para una cuenca con el fin de estandarizar los resultados generados en el modelo y así hacerlos comparativamente iguales (Csáfordi *et al.*, 2012); en Francia se combinó la herramienta con el uso de fotografías aéreas para observar los cambios en la línea de costa, *erosión costera marítima* (Chaaban *et al.*, 2012): Otro uso recurrente es en el levantamiento geológico para la observación de datos en tres dimensiones (Renbo *et al.*, 2017; Zhu, 2010).

ModelBuilder de ArcGIS también ha sido de gran utilidad para diagnósticos o estudios de invasiones biológicas: en los Estados Unidos se ha utilizado para la predicción de la distribución de malezas invasoras (Magarey *et al.*, 2018); también ha servido tanto para establecer relaciones ecológicas entre especies invasoras y nativas en el mar Caribe (Valdivia *et al.*, 2014), como procesos y patrones de invasión a escala subcontinental (Clark, 2015).

4. Metodología

4.1 Materiales e insumos

Los recursos geográficos utilizados corresponden a información espacial generada en formato Shapefile (SHP) por el Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. para los Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA) del proyecto embalse de Tominé, los cuales se nombran a continuación:

1. Formato vectorial poligonal del manejo integral aleatorio de la regeneración natural de *A. decurrens* para los años 2015 a 2022.
2. Formato vectorial lineal de la red vial actual ubicada dentro del área de manejo ambiental del embalse.
3. Formato vectorial puntual de viviendas ubicadas dentro del área de manejo ambiental del embalse.
4. Formato vectorial poligonal (buffer) de la densidad de viviendas.
5. Formato vectorial lineal de drenajes ubicados en la cuenca del embalse.
6. Formato vectorial poligonal de la cobertura de la tierra en suelos degradados/erosionados o sin vegetación arbórea/arbustiva.

El software utilizado para el análisis espacial corresponde a ArcGIS Desktop 10.8.1 (ESRI, 2020), con licencia de uso académica generada por la Universidad Nacional de Colombia. De igual manera se utilizó la plataforma Google Earth Engine para la obtención y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8. Las imágenes de sensores remotos utilizados se citan a continuación.

Fotografías aéreas

Las fotografías aéreas se obtienen del Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con los siguientes metadatos principales:

1. Nombres - Fecha:

C-2183-0101 - 25/01/1985.

C-2183-0102 - 25/01/1985.

C-2183-0216 - 25/01/1985.

C-2183-0043 - 25/01/1985.

C-2183-0044 - 25/01/1985.

C-2183-0045 - 25/01/1985.

Sensor: RMK-A-15/23.

Espectro: Pancromática.

Resolución espectral: 1.

Bandas: Pancromática.

Resolución radiométrica (bits): 8.

Nivel de procesamiento: Primario.

Porcentaje de sombras: 0.00%.

Porcentaje de nubes: 0.00%.

2. Nombres - Fecha:

C-2471-0054 - 24/02/1992.

Sensor: RMK-A-15/23.

Espectro: Pancromática.

Resolución espectral: 1.

Bandas: Pancromática.

Resolución radiométrica (bits): 8.

Nivel de procesamiento: Primario.

Porcentaje de sombras: 0.00%.

Porcentaje de nubes: 0.00%.

Imágenes Satelitales Landsat 4-5

Las imágenes satelitales se obtienen del portal Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con los siguientes metadatos principales:

1. Nombre - Fecha:

LT05_L1TP_008057_19850322_20200918_02_T1 – 22/03/1985.
LT05_L1TP_008057_19860205_20200918_02_T1 – 05/02/1986.
LT05_L1TP_008057_19870328_20201014_02_T1 – 28/03/1987.
LT04_L1TP_008057_19880322_20200917_02_T1 – 22/03/1988.
LT04_L1TP_008057_19891222_20200916_02_T1 – 22/12/1989.
LT04_L1TP_008056_19910110_20200915_02_T1 – 10/01/1991.

Sensor: Landsat 4-5 TM C2 L1

Resolución espectral: 7 bandas

Combinación Usada: RGB321,

Resolución espacial: 30 m.

Nivel de procesamiento: No aplica

Imágenes Satelitales Landsat 8

Las imágenes satelitales se obtienen del portal Google Earth Engine de Google, con los siguientes metadatos principales:

1. Nombre - Fecha:

LC08_L1TP_008057_20200322_20200822_02_T1 - 22/03/2020

Sensor: Landsat 8 Colección 1 Tier 1 Composición reflectancia: TOA 32 días - OLI_TIRS_L1TP

Resolución espectral: 12 bandas

Combinaciones Usadas: RGB432

Resolución espacial: 30 m.

Nivel de procesamiento: No aplica.

4.2 Procedimiento

4.2.1 Identificación del periodo de establecimiento de núcleos de plantaciones forestales de *A. decurrens* en el embalse de Tominé

Para poder identificar el periodo exacto de establecimiento de las plantaciones forestales de *A. decurrens* en el embalse de Tominé, se realizó un análisis multitemporal de la zona centro del embalse mediante el cual se pudieron identificar cambios en la cobertura de suelo dentro del área operativa, a razón del establecimiento de los núcleos de plantaciones forestales de Acacia en áreas con suelos degradados o sin vegetación arbórea/arbustiva. Este análisis se realizó con la metodología propuesta por Melo Wilches *et al.* (2005), con el uso de fotografías aéreas del sensor RMK-A-15/23 para los años 1985 y 1992, e imágenes satelitales del sensor Landsat 4-5 desde 1985 a 1991.

4.2.2 Cobertura de la tierra inicial y actual en plantaciones maduras de *A. decurrens* en el embalse de Tominé

A partir de la identificación exacta del periodo de establecimiento de los núcleos de plantaciones forestales de *A. decurrens* en el embalse de Tominé, se procedió a identificar la cobertura natural de la tierra en plantaciones forestales maduras de esta especie para el total del área operativa para los años 1985 y 2020, con el propósito de comparar las áreas iniciales de establecimiento y las áreas actuales, en este tipo de cobertura.

Para la interpretación de coberturas en *A. decurrens* en 1985 se usó la metodología descrita por Melo Wilches *et al.* (2005). Para la identificación de coberturas en 2020 se usó la metodología de clasificación supervisada mediante el análisis Random Forest – Machine Learning descrita por Breiman (2001) y Solórzano Villegas *et al.*, (2022), y el

geoprocesamiento en la plataforma Google Earth Engine descrita por Solórzano Villegas *et al.* (2022).

4.2.3 Mapa factores potencializadores de la invasión de *A. decurrens* en el embalse de Tominé

Previo a la realización del algoritmo en Model Builder para la priorización del manejo integral de *A. decurrens* en el embalse de Tominé, es necesario analizar espacialmente aquellos factores que son considerados teóricamente como potencializadores de la invasión (Lozano *et al.* 2020), para lo cual se requiere el resultado de la interpretación de la coberturas de suelo actuales en plantaciones forestales maduras de *A. decurrens* del año 2020.

Como objetos de entrada obtenidos en la información espacial base entregada por el GEB S.A. E.S.P, se sobreponen las capas de red vial, viviendas, densidad de viviendas, drenajes y suelos degradados/erosionados o sin vegetación arbórea/arbustiva. Del total de información se obtiene el mapa temático de factores potencializadores de invasión de *A. decurrens* en el embalse de Tominé, el cual servirá para la toma de decisiones de priorización.

4.2.4 Mapa y algoritmo Model Builder para las intervenciones de manejo integral aleatorio de *A. decurrens* en el embalse de Tominé - (Periodo 2015 a 2022)

Con el objeto de poder identificar las áreas con mayor número de intervenciones en manejo integral aleatorio ejecutadas por el Plan de Manejo Ambiental dentro del AOI del embalse de Tominé y así contribuir a mejorar la toma de decisión frente a un manejo integral

priorizado, se realiza el procedimiento indicado por Walker (2018), adaptando la metodología para contar polígonos superpuestos en algoritmo Model Builder para el Shapefile de manejo integral aleatorio de la regeneración natural de *A. decurrens* entregado por GEB S.A. E.S.P. relacionado con los trabajos realizados en el área entre los años 2015 a 2022.

Como resultado del geoprocusamiento se obtiene el mapa de manejo integral aleatorio de *A. decurrens* para el embalse de Tominé de los últimos siete años. Este resultado se sobrepone al mapa de factores potencializadores de invasión de *A. decurrens*, base de información espacial que permite la toma de decisiones priorizadas.

4.2.5 Mapa y algoritmo Model Builder para las intervenciones de manejo integral aleatorio de *A. decurrens* en el embalse de Tominé - (Periodo 2015 a 2022)

Con base en el Shapefile de manejo integral aleatorio de la regeneración natural de *A. decurrens* años 2015 a 2022, se adapta el procedimiento indicado por Walker (2018), incluyendo algoritmos de límite de cálculo espacial para las variables predictoras descritas a continuación:

Variables predictoras

Fecha de la última intervención de cada polígono que se encuentra dentro del Shapefile “Manejo integral aleatorio *A. decurrens* años 2015 a 2022”, polígono al que se le establece el número de meses transcurridos desde el último manejo hasta enero de 2023, comparándolo con el valor teórico de madurez sexual de *A. decurrens*.

Variable dependiente

Con base en el número de meses transcurridos desde la última intervención de manejo integral hasta enero de 2023, se define lo siguiente:

- Si el número de meses de la última intervención de cada polígono en el Shapefile “Manejo integral aleatorio *A. decurrens* años 2015 a 2022” es menor o igual (\leq) a 24 meses, su indicador de salida será **NO PRIORIZADO**, es decir, el polígono **no requiere** manejo integral de la regeneración natural.
- Si el número de meses de la última intervención de cada polígono en el Shapefile “Manejo integral aleatorio *A. decurrens* años 2015 a 2022” es mayor ($>$) a 24 meses, su indicador de salida será **PRIORIZADO**, es decir, el polígono **requiere** manejo integral de la regeneración natural.

Para poder generar el algoritmo en Model Builder se tiene dos variables dependientes teóricas relacionadas con la madurez sexual de los individuos de *A. decurrens* emergidos posterior al manejo integral aleatorio. Según Solorza (2012), la característica ecológica más relevante que puede limitar el aumento del potencial de colonización de una especie invasora es evitar la madurez sexual, que para el caso de la *A. decurrens* se obtiene, en promedio, a los 24 meses.

El algoritmo de límite de cálculo espacial usará la variable “fecha de intervención inicial” disponible en la tabla de atributos del Shapefile de manejo integral aleatorio de la regeneración natural de *A. decurrens* años 2015 a 2022. Es a partir del *input* descrito anteriormente que se inicia el algoritmo en Model Builder adaptando lo descrito por Magarey *et al.* (2018) en cuanto al desarrollo de modelos espaciales para plantas invasoras.

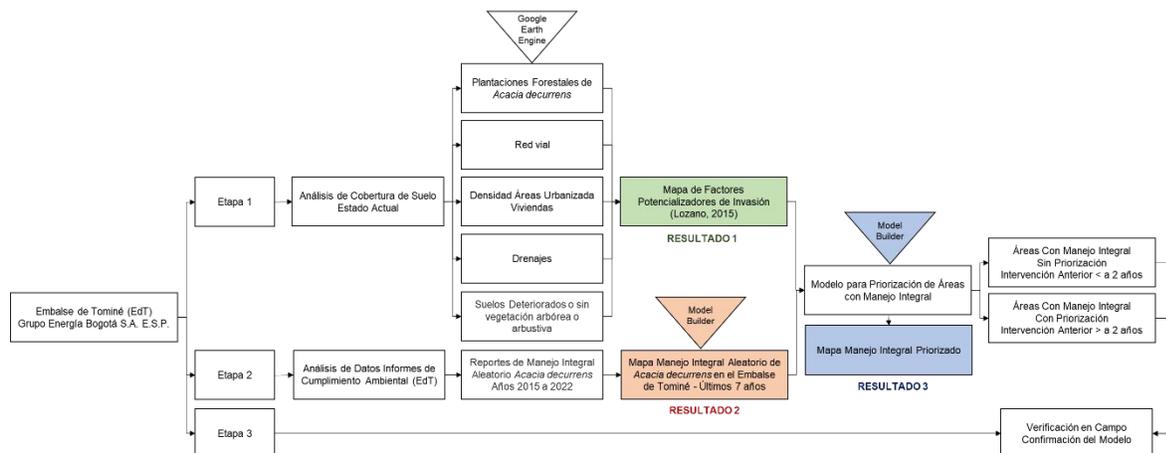
Como resultado de operaciones entre tablas del Model Builder, a partir del *input* de “fecha de intervención inicial” y la variable predictora, se obtiene el total de meses posteriores al

manejo integral de *A. decurrens* por cada polígono disponible en el SHP de entrada, con el cual se puede generar la priorización de manejo.

El resultado del algoritmo permite la visualización gráfica en un mapa del modelo de manejo integral priorizado para *A. decurrens* en el embalse de Tominé, con dos indicadores de salida: **PRIORIZADO** y **NO PRIORIZADO**.

El procedimiento usado para la elaboración de este trabajo se puede resumir en el diagrama de flujo metodológico visible en la *figura 4-1*.

Figura 4-1: Diagrama de flujo metodológico.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor con base en las propuestas de Magarey et al. (2018) y Solorza Bejarano (2012).

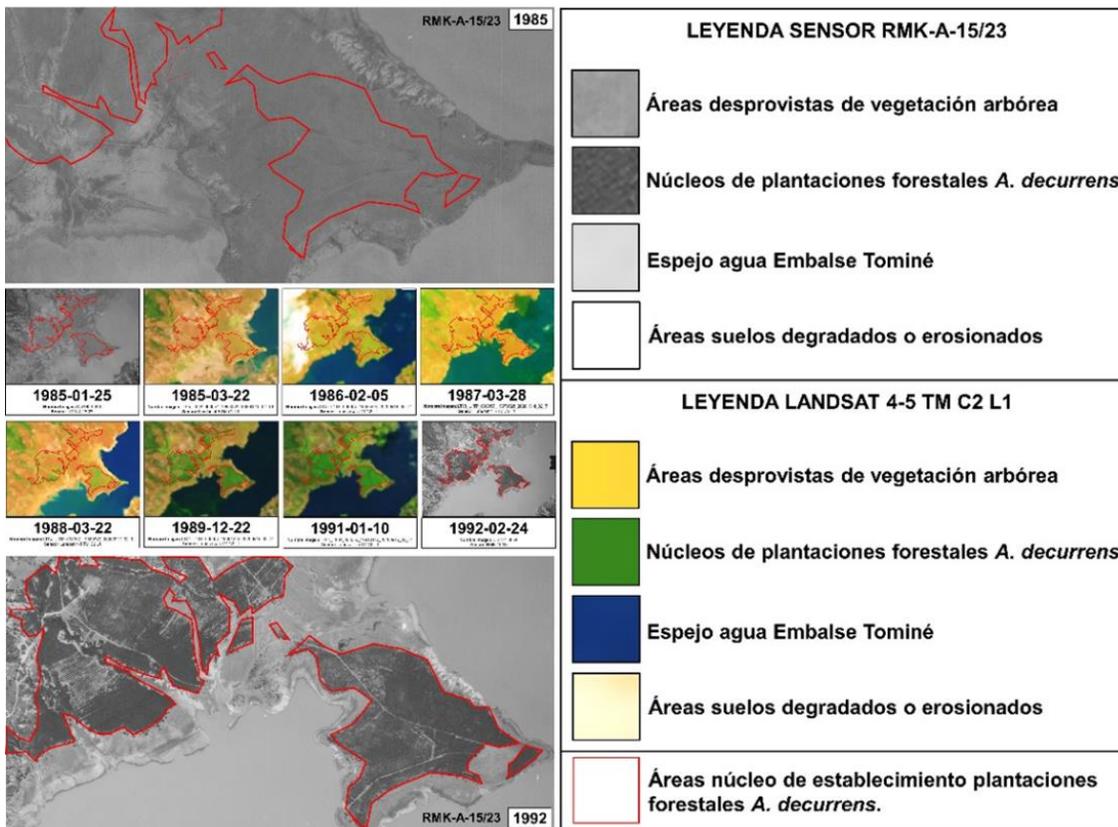
5. Resultados

De acuerdo con la metodología descrita anteriormente, se obtienen los siguientes resultados para cada procedimiento.

5.1 Identificación del periodo de establecimiento de núcleos de plantaciones forestales de *A. decurrens* en el embalse de Tominé

El análisis multitemporal realizado para la zona centro del embalse de Tominé logró identificar que entre 1985 y 1992 se establecieron los núcleos de plantaciones de *Acacia decurrens* y *Acacia melanoxylon* en el área operativa del embalse. La *figura 5-1* muestra el cambio de cobertura generado en la zona, en la cual se evidencia la matriz de plantación forestal generada

Figura 5-1: Identificación del periodo de establecimiento de plantaciones de *A. decurrens* en el embalse de Tominé entre 1985 a 1992.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

5.2 Cobertura de la tierra inicial y actual en plantaciones maduras de *A. decurrens* en el embalse de Tominé

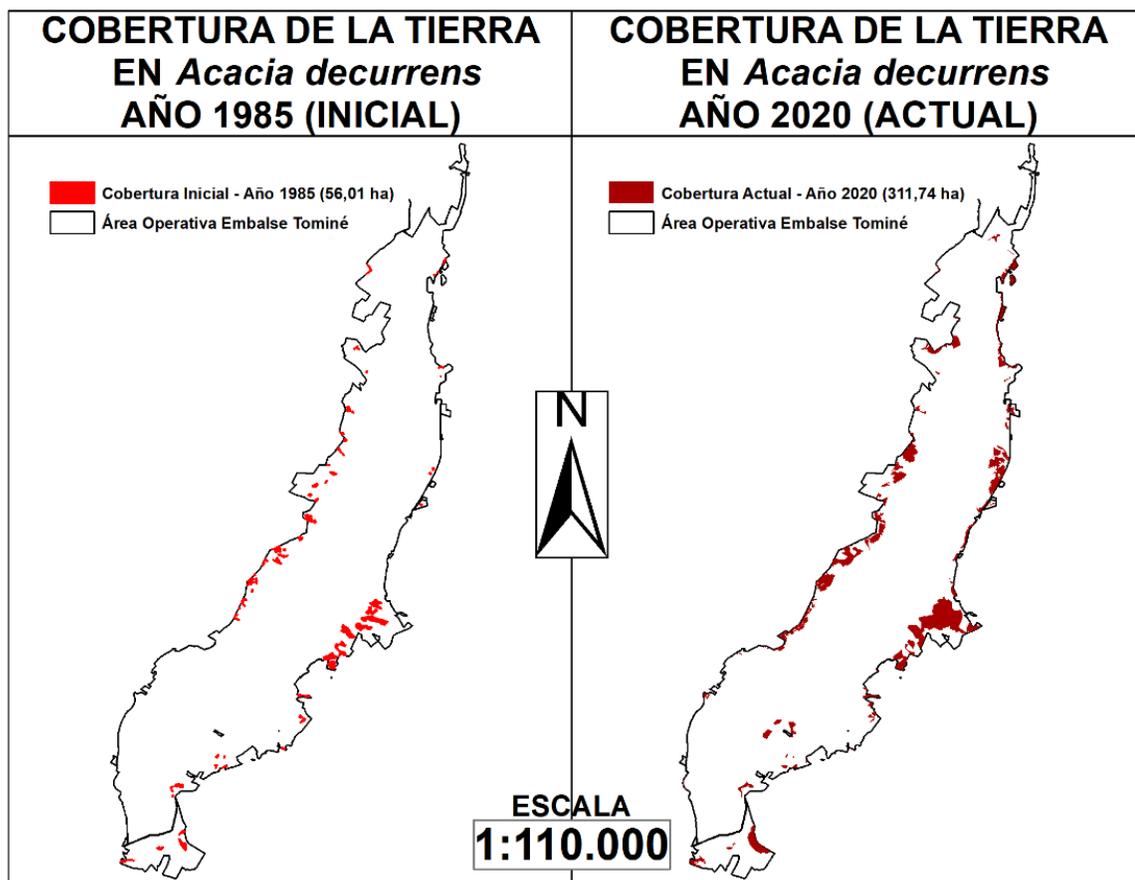
Los resultados de la identificación de coberturas en plantaciones forestales maduras de *A. decurrens* dentro del área operativa del embalse de Tominé arrojaron para 1985 un área total de 56,01 ha, y para 2020 un área de 311,74 ha —ubicadas en el AONI—, lo cual indica que se presentó un incremento de 255,73 ha en un periodo de 35 años.

Se debe tener en cuenta que las áreas de plantaciones maduras de *A. decurrens* es inferior a lo reportado por Velásquez-González y Viancha Rodríguez (2021), los cuales reportaron

un establecimiento de plantaciones cercana a las 500 ha en la cuenca del río Tominé. Lo anterior, debido a las labores de aprovechamiento forestal realizadas por el Plan de Manejo Ambiental del embalse en el periodo 2005 - 2015 dentro del AOI (Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. *et al.*, 2023). Como soporte de la interpretación se puede observar la *figura 5-2*.

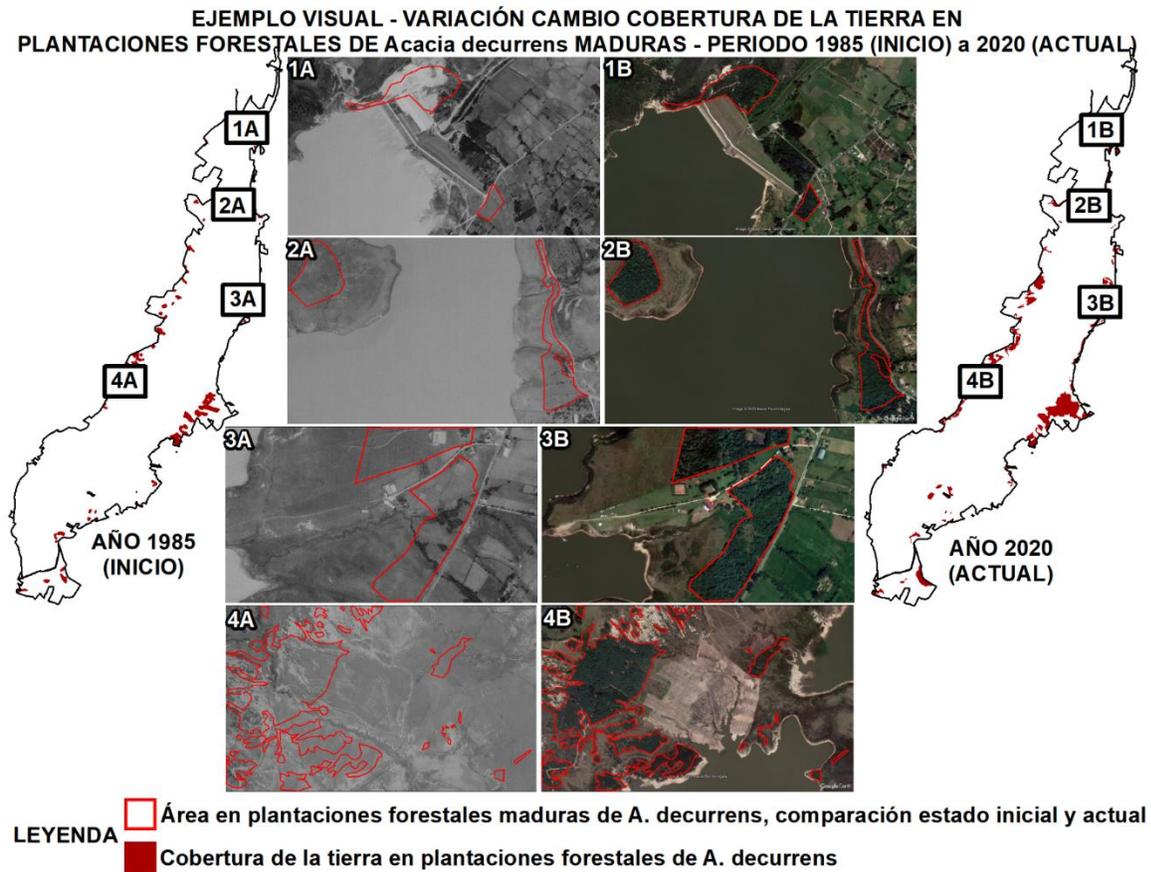
De igual manera, en la *figura 5-3* se presentan ejemplos de la variación de las coberturas de la tierra en plantaciones forestales maduras de *A. decurrens* para 1985 (inicio) y el año 2020 (actual), por medio de una línea roja que sirve de guía para ubicar las coberturas actuales de *A. decurrens* dentro en el área operativa del embalse de Tominé.

Figura 5-2: Cobertura de la tierra inicial (1985) y actual (2020) en plantaciones maduras de *A. decurrens* en el área operativa del embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

Figura 5-3: Ejemplo visual variación de cobertura en *A. decurrens* en el área operativa del embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

5.3 Mapa de factores potencializadores de la invasión de *A. decurrens* en el embalse de Tominé

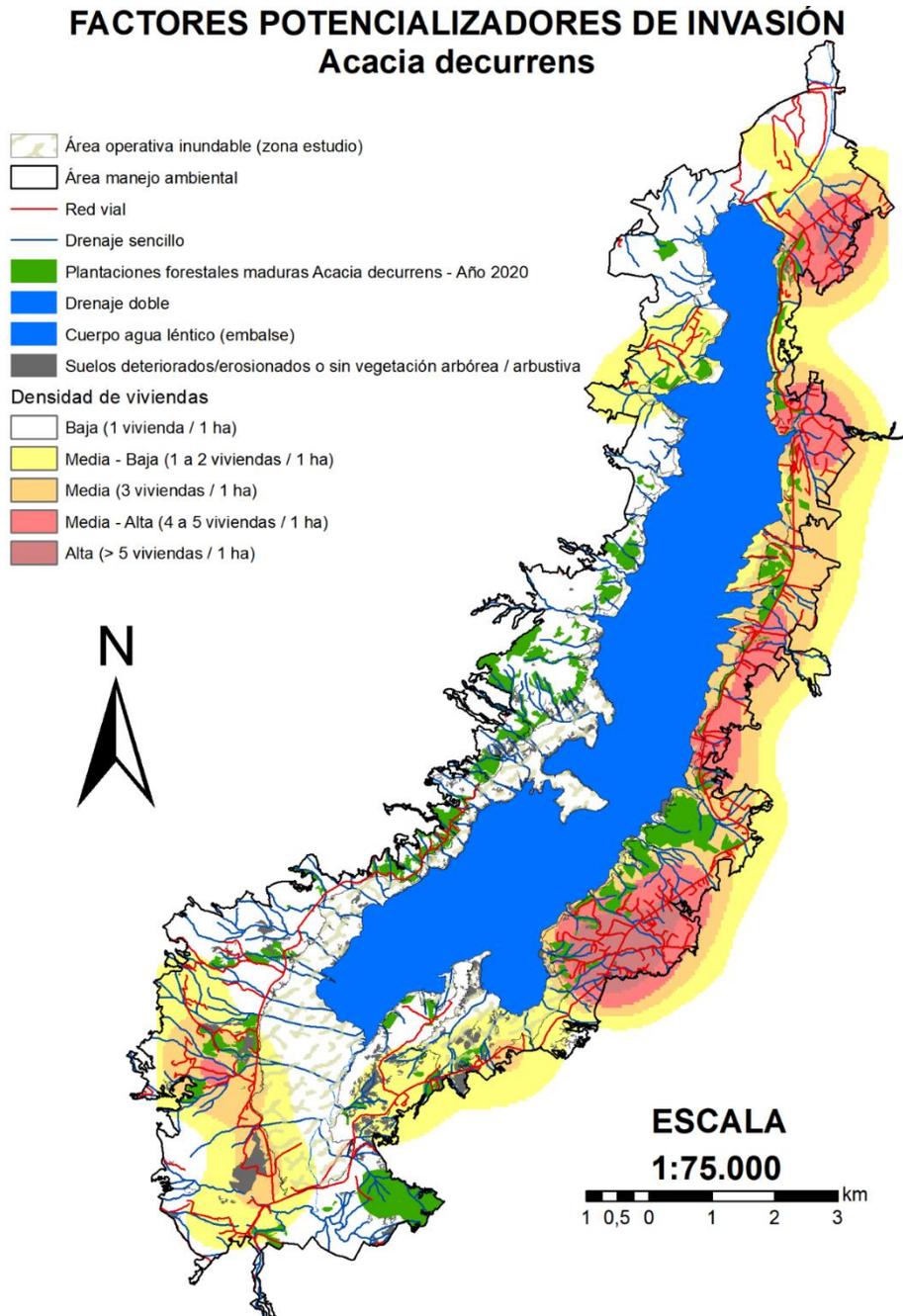
Se realizó la interpretación del estado actual de cinco (05) coberturas de suelo que potencializan la invasión de *A. decurrens* en el embalse de Tominé. En la *figura 5-4* se pueden observar los resultados obtenidos; y a continuación se comentan las principales características de cada cobertura

-
- **Plantaciones forestales de *Acacia decurrens*:** En el año 2000 el embalse de Tominé presenta, dentro de su área operativa, 311,74 ha; y por fuera de ella 266,16 ha —cercanas o contiguas—, para un total de 577,9 ha en plantaciones maduras de *A. decurrens*. Estas plantaciones se encuentran interconectadas por redes viales, drenajes y cuerpos de agua.
 - **Red vial:** El embalse de Tominé cuenta con un total de 1293,8 km de vías interconectadas.
 - **Densidad de viviendas:** La mayor densidad se presenta en las zonas este y sur del embalse, con enfoque a los municipios de Guatavita y Sesquilé, junto a los Club's Náuticos del embalse.
 - **Drenajes:** El área operativa del embalse cuenta con un total de 175,5 km de drenajes sencillos; 14,8 km de drenajes dobles, y 2394,5 ha de cuerpo de agua léntico con volumen variable. El sistema de drenajes y los cuerpos de agua son el principal factor de intercomunicación de las plantaciones forestales maduras de *A. decurrens* con las áreas degradadas o desprovistas de vegetación en el AOI. En total, el embalse cuenta con 81 subcuencas encargadas de distribuir en el área el banco de semillas y fomentar la colonización de *A. decurrens*.
 - **Suelos deteriorados o sin vegetación arbórea / arbustiva:** El embalse de Tominé cuenta con un total de 202,4 ha en suelos deteriorados, degradados o sin vegetación arbórea o arbustiva, que constituyen las zonas donde se establece el banco de semillas de *A. decurrens*.

La sobreposición de la información espacial anteriormente mencionada permite obtener un mapa consolidado de factores que pueden potencializar la colonización de *A. decurrens*

en el embalse de Tominé, que sirve de apoyo visual para mejorar la toma de decisiones del manejo integral priorizado generado por algoritmo Model Builder.

Figura 5-4: Mapa de factores potencializadores de invasión de *A. decurrens* – embalse Tominé.



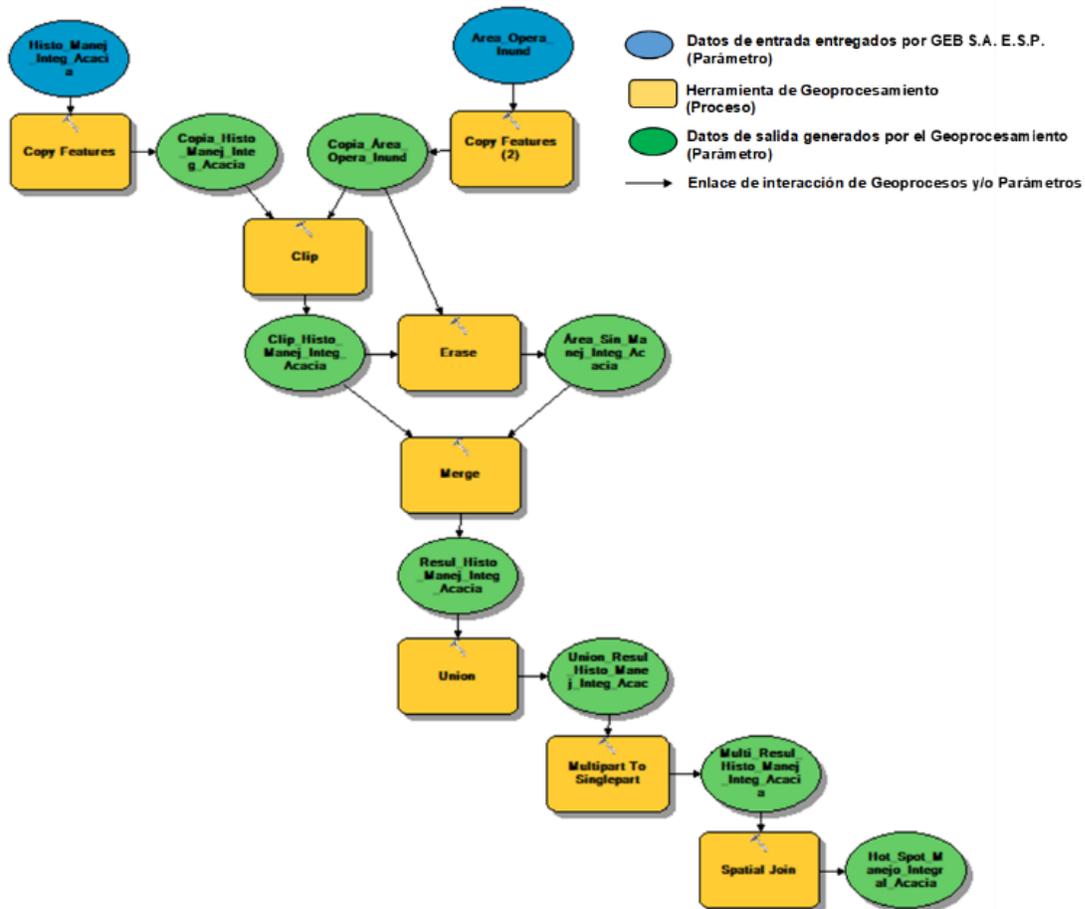
Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

5.4 Mapa y algoritmo Model Builder para las intervenciones de manejo integral aleatorio de *A. decurrens* en el embalse de Tominé - (Periodo 2015 a 2022)

Siguiendo el Model Builder presentado en la *figura 5-5*, se realizó la interpretación de las áreas en manejo integral aleatorio de *A. decurrens* en el embalse de Tominé para el periodo comprendido entre el 01 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2022, donde se determina el número de intervenciones realizadas por unidad de área dentro del AOI del embalse, identificando entre 1 y 8 intervenciones por unidad de área, para este periodo.

La anterior información se puede observar espacialmente en *figura 5-6*, la cual muestra las áreas que han ejecutado mayor número de intervenciones de manejo integral aleatorio dentro del AOI del embalse. El color rojo oscuro muestra las áreas que mayor intervención han tenido, y el amarillo las que menos intervenciones han desarrollado en el mismo periodo (2015 a 2022).

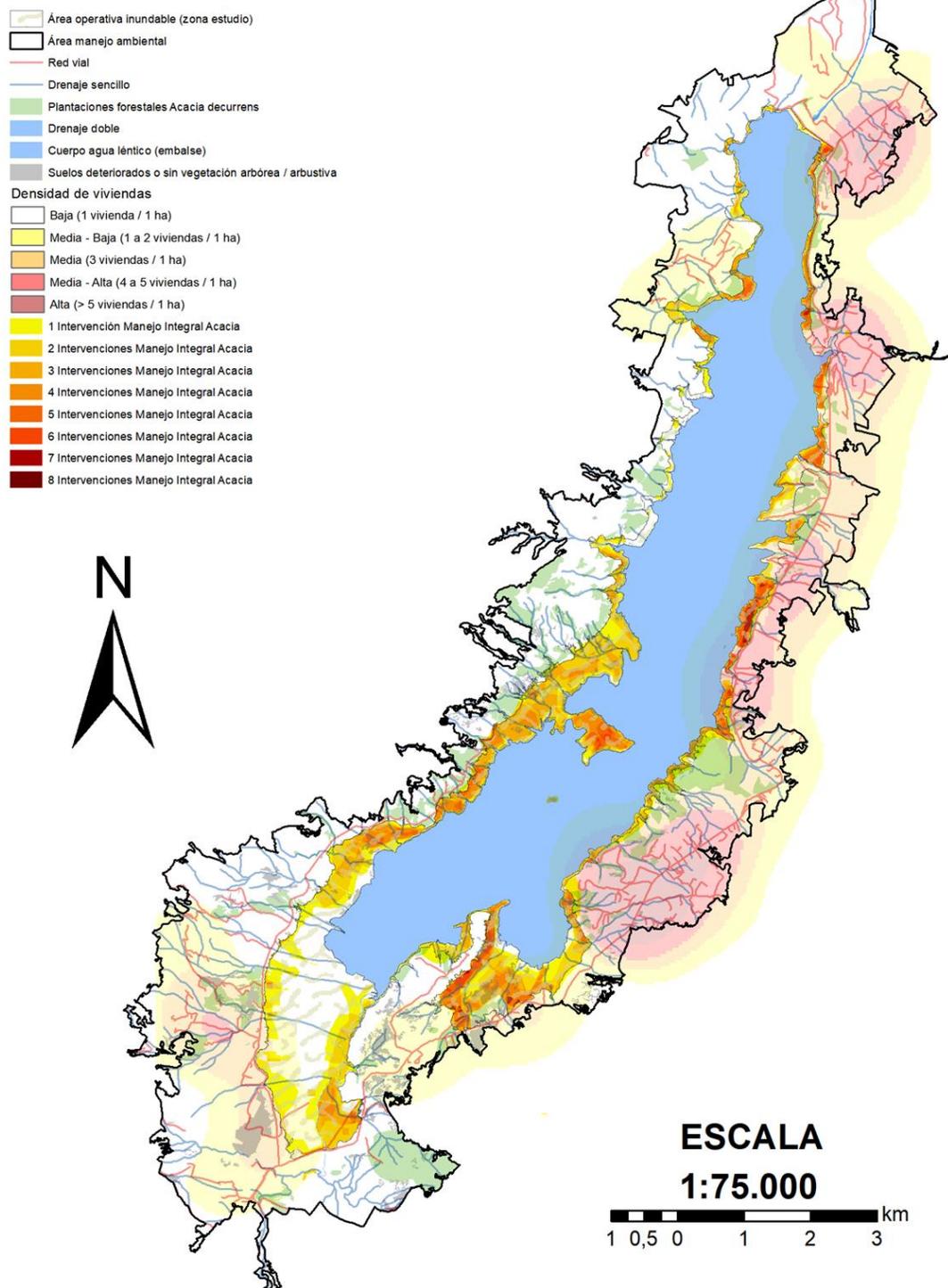
Figura 5-5: Algoritmo Model builder de intervenciones de manejo integral de *A. decurrens* entre 2015 y 2022.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

Figura 5-6: Mapa de intervenciones de manejo integral aleatorio de *A. decurrens* entre 2015 y 2022.

CARACTERIZACIÓN INVASIÓN *Acacia decurrens* PERIODO 2015 a 2022 - EMBALSE DE TOMINÉ



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

5.5 Mapa y algoritmo Model Builder para priorización de áreas de manejo integral de *A. decurrens* en el área operativa inundable (AOI) del embalse de Tominé

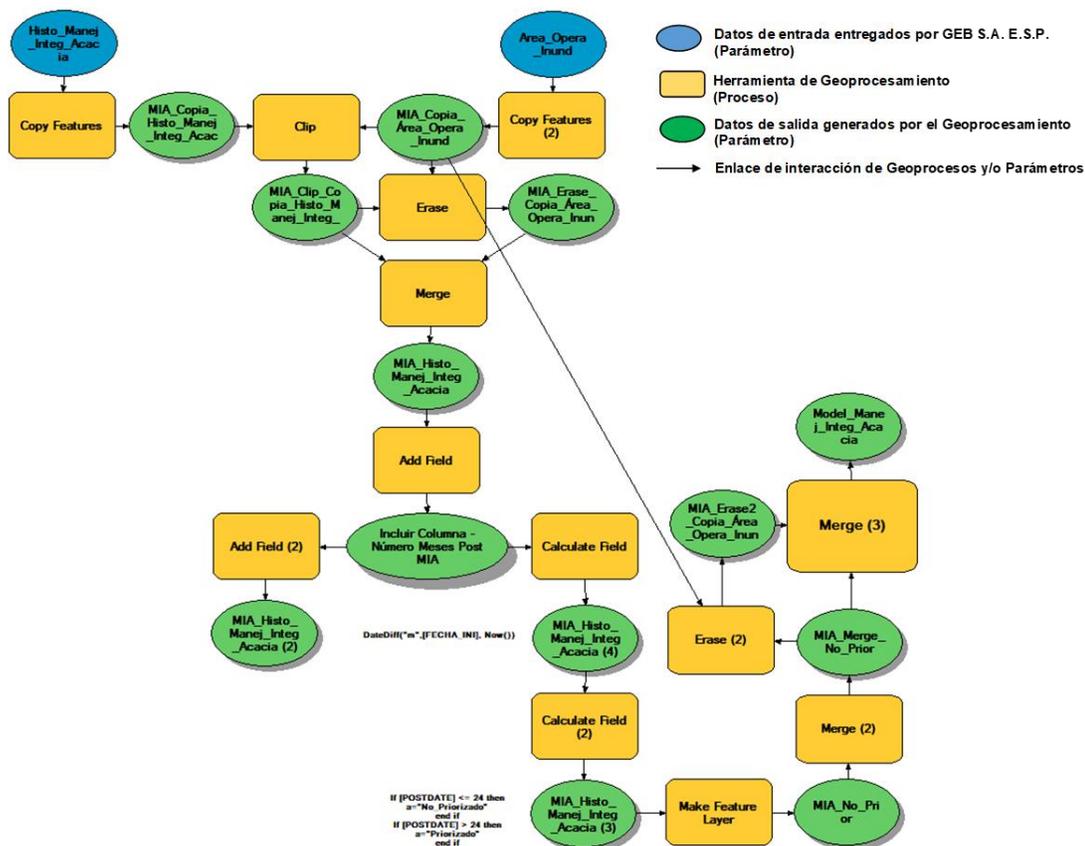
En la *figura 5-7* se presenta el algoritmo construido en formato Model Builder de ArcGIS con las interacciones y parámetros utilizados para determinar la priorización de áreas para el manejo integral de *A. decurrens* en el AOI del embalse de Tominé.

Como resultado automatizado del Model Builder generado para el manejo integral priorizado de *A. decurrens* en AOI, se obtiene una salida gráfica que determina el manejo integral que se debe realizar: en color verde las áreas **no priorizadas**, y en color rojo las áreas que **se deben priorizar** dentro de AOI. En la *figura 5-8* se puede observar el resultado para enero de 2023.

El modelo determina que 672,34 ha (53,1 %) de área operativa inundable debe priorizar el manejo integral de *A. decurrens* al sobrepasar 24 meses desde su última intervención operativa, tiempo máximo teórico para el inicio reproductivo de la especie. Para las 593,77 ha restantes (46,9%) no se requiere manejo integral priorizado de regeneración, ya que corresponde a áreas que han sido trabajadas en menos de 24 meses, presentando una baja probabilidad de entrar en etapa reproductiva.

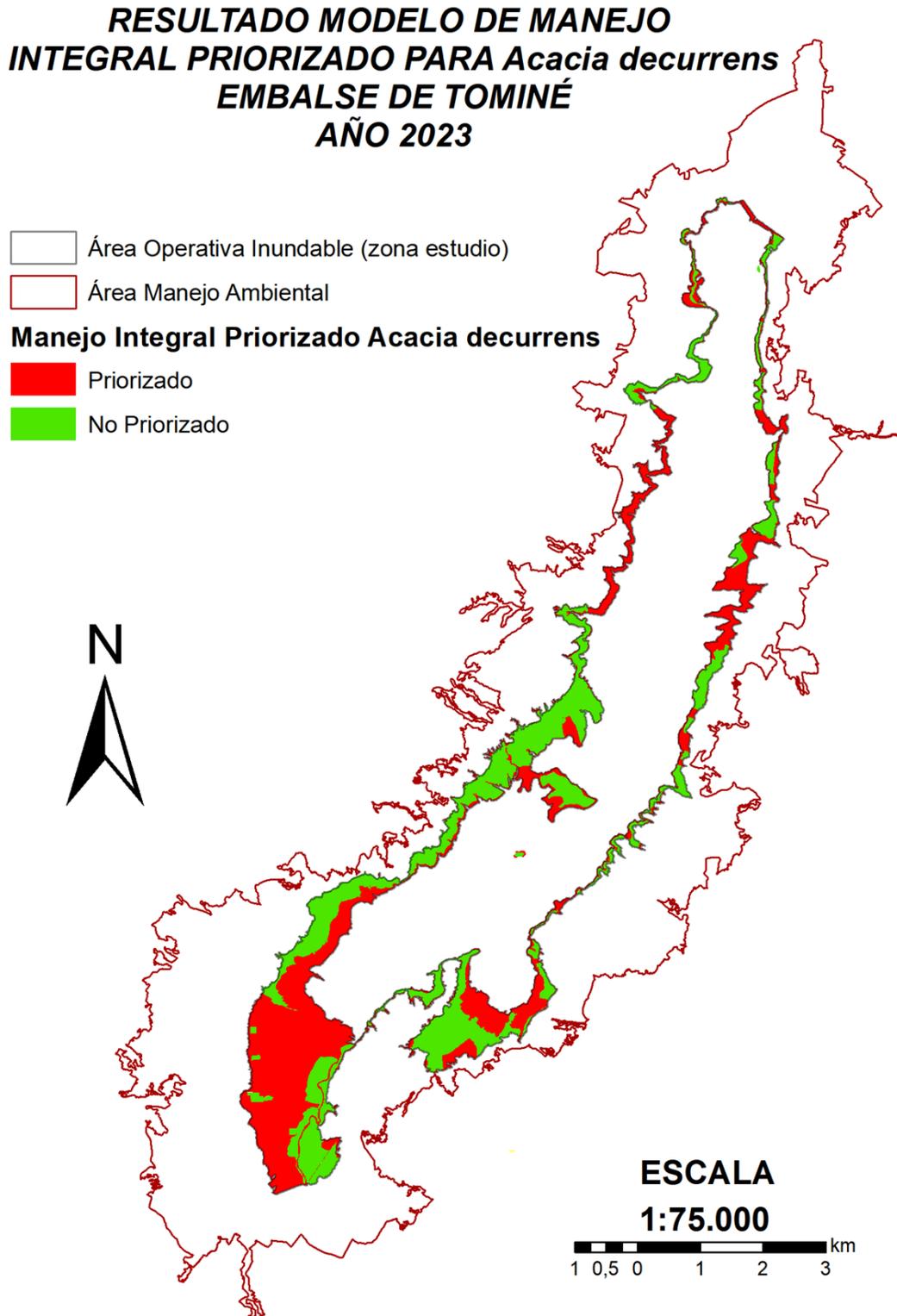
El resultado gráfico de este proceso se debe comparar por sobreposición con el mapa de factores potencializadores de la invasión y con el mapa de intervenciones de manejo integral aleatorio (periodo 2015 a 2022), para mejorar la toma de decisiones frente a la priorización de las áreas que el algoritmo Model Builder está determinando.

Figura 5-7: Model Builder para el manejo integral priorizado de *A. decurrens* en el Área Operativa Inundable del embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

Figura 5-8: Mapa de manejo integral priorizado para regeneración natural de *A. decurrens* en el Área Operativa Inundable de embalse de Tominé.



Nombre de la fuente: Desarrollado por el autor.

6. Discusión y conclusiones

6.1 Discusión

La programación de algoritmos de geoprocésamiento espacial por medio de Model Builder de ArcGIS, permitió identificar áreas que requieren manejo integral priorizado dentro del embalse de Tominé. Mencionan Magarey *et al.* (2018), que los modelos espaciales deben permitir adaptación temporal de acuerdo con las variaciones que se pueden presentar con los parámetros de entrada de los modelos, los cuales se van actualizando a lo largo de su geoprocésamiento.

De acuerdo con lo anterior, el Model Builder generado para la priorización de áreas de manejo integral contempló la modificación del parámetro de entrada relacionado con las intervenciones de manejo integral de *A. decurrens* realizadas previo a la fecha de ejecución del modelo. Este logaritmo permite que la información de estas intervenciones sea modificada e incluidas nuevamente en el proceso.

Los resultados del modelo son revisados en campo; esta verificación es la que determina su viabilidad. Se encuentra que las áreas presentan variabilidad de estados de madurez sexual, lo que evidencia los efectos ambientales y antrópicos sobre la independencia del genotipo de cada individuo, ocasionando un efecto fisiológico en términos reproductivos para cada individuo de la especie (Ríos y Vargas, 2003).

A pesar de la condición variable de los estados sexuales de los individuos, su estado morfológico es el ideal para realizar el manejo integral de la colonización, ya que se

encontraron individuos con alturas de 2 a 3 m y diámetros a la altura pecho menor a 10 cm. Se debe procurar, sin embargo, un estudio que determine los periodos de madurez sexual de la regeneración natural de *A. decurrens* en el embalse, para así ajustar la variable predictora dentro del modelo. De igual manera, es necesario involucrar dentro del logaritmo Model Builder para la priorización de manejo integra *A. decurrens*, la información espacial relacionada con el número de intervenciones de manejo por unidad de área y los factores potencializadores, con el objetivo de volverlas variables predictoras y así mejorar los resultados del logaritmo.

El modelo espacial generado por medio del logaritmo Model Builder para el embalse de Tominé arroja resultados aceptables para ser utilizados por el GEB S.A. E.S.P. dentro de su Plan de Manejo Ambiental, optimizando las labores de manejo.

6.2 Conclusión

Automatizando el proceso de obtención de áreas priorizadas o no priorizadas por medio de un algoritmo computacional con base en el sistema Model Builder de ArcGIS, se generó un Model Builder con el cual se consigue interrelacionar actuaciones de manejo integral aleatorio del espacio, junto a conceptos teóricos de invasiones biológicas, determinando la prioridad de áreas con alto potencial de colonización por *A. decurrens* dentro del AOI del embalse de Tominé.

Para ayudar en la toma de decisión en la priorización detectada por el modelo, se presenta la información de factores potencializadores de la invasión y las áreas con mayor número de intervenciones de manejo integral aleatorio en los últimos siete años (periodo 2015 a 2022), los cuales se pueden superponer y de esta forma optimizar la priorización.

El modelo determinó que el 53,1 % del AOI debe priorizar el manejo integral de *A. decurrens* al sobrepasar 24 meses desde su última intervención operativa. Las áreas priorizadas se validan en terreno, evidenciando que la predicción espacial es acorde a los estados de madurez sexual de la especie, contribuyendo con esto a la reducción del potencial de colonización dentro del AOI del embalse.

Bibliografía

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR (2020). *Plan de Prevención, Manejo y Control de las poblaciones de Acacia decurrens Willd en la jurisdicción CAR.* <https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/37856>

Donaldson, J. E., Richardson, D. M. y Wilson, J. R. U. (2014). The seed ecology of an ornamental wattle in South Africa—Why has *Acacia elata* not invaded a greater area? *South African Journal of Botany*, 94, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.05.004>

Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P., GEB. S. A. E. S. P., (2023). *Modelo de Almacenamiento Geográfico, Informe de Cumplimiento Ambiental (ICA) 20, Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé [Modelo de Almacenamiento Geográfico ANLA].*

Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P., GEB. S. A. E. S. P., Rodríguez Maldonado, C. B., Espinosa Pinzón, B. F. y Moreno Ortiz, N. F. (2021). *Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé—Informe de Cumplimiento Ambiental No. 18—2020* (Informe de Cumplimiento Ambiental ICA 18; p. >200). Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P.

Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P., GEB. S. A. E. S. P., Rodríguez Maldonado, C. B., Espinosa Pinzón, B. F. y Moreno Ortiz, N. F. (2023). *Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé—Informe de Cumplimiento Ambiental No. 20—2022* (Informe de Cumplimiento Ambiental ICA 20; p. >200). Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P.

Gutiérrez-Bonilla, F. de P., Baptiste E., M. P., García L., L. M., Cárdenas T., J., Salgado-Negret, B., Vásquez Valderrama, M., Castellanos-Castro, C., González, R., Aguilar-Garavito, M., Castaño, N., Rodríguez, W., Marín, N. L., Peláez, N., Castaño, A., López Camacho, R., Beltrán-Gutiérrez, H. E., Vargas, W., Estrada Castillo, S. M., Andrade Erazo, V. Y. y Reyes, S. (2017). *Plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia.* <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/32935>

Instituto de Investigaciones Alexander von Humboldt IAvH y Grupo Energía Bogotá S.A. E.S.P. (2021). *Caracterización de la cobertura de Acacia decurrens bajo cota de inundación en el Embalse de Tominé* (Estudio Científico Núm. 12). IAvH.

http://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=caract-acacia_geb_2021

IDEAM, I. de H., Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra—Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia—Escala 1:100000* (Vol. 1). Comité de Comunicaciones y Publicaciones IDEAM.

http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762

INGETEC. (1959). *Informe Técnico de Diseño e Implementación del proyecto Embalse de Tominé*. INGETEC.

Magarey, R., Newton, L., Hong, S. C., Takeuchi, Y., Christie, D., Jarnevich, C. S., Kohl, L., Damus, M., Higgins, S. I., Millar, L., Castro, K., West, A., Hastings, J., Cook, G., Kartesz, J. y Koop, A. L. (2018). Comparison of four modeling tools for the prediction of potential distribution for non-indigenous weeds in the United States. *Biological Invasions*, 20(3), 679–694. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1567-1>

Maldonado, C. E. y Gómez Cruz, N. A. (2010). Modelamiento y simulación de sistemas complejos. En *Instname:Universidad del Rosario* [WorkingPaper]. Editorial Universidad del Rosario. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/3782>

Plan de Manejo Ambiental Embalse de Tominé, Pub. L. No. 776, Resolución 47 (2008). http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_0776_150508.pdf

Mora Goyes, M. F., Rubio, J. A., Ocampo Gutiérrez, R. y Barrera Cataño, J. I. (2016). *Catálogo de Especies Invasoras del Territorio CAR* (1a ed.). Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) - Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). <https://drive.google.com/file/d/0Bxp33xxjFnxzaE02R1EtV2Q0TUU/view>

Morris, T. L., Esler, K. J., Barger, N. N., Jacobs, S. M. y Cramer, M. D. (2011). Ecophysiological traits associated with the competitive ability of invasive Australian acacias. *Diversity and Distributions*, 17(5), 898–910. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00802.x>

Perea Rojas, G. (1992). Clasificación de sitio y factores que influyen en el crecimiento de *Acacia decurrens* en la cuenca del río Checua-Cundinamarca | Colombia forestal. *Revista Colombia Forestal*, 3(5), 20. <https://doi.org/10.14483/2256201X.4353>

Richardson, D., Le Roux, J. y Wilson, J. (2015). Australian acacias as invasive species: Lessons to be learnt from regions with long planting histories. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 77, 1–9. <https://doi.org/10.2989/20702620.2014.999305>

Richardson, D. M. y Rejmánek, M. (2011). Trees and shrubs as invasive alien species – a global review. *Diversity and Distributions*, 17(5), 788–809. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00782.x>

Ríos, H. F. y Vargas, O. (2003). Ecología de las especies invasoras. *Perez Arbelaezia*, 14, 119–148. https://www.researchgate.net/profile/Orlando_Vargas2/publication/260437576_Ecologia_de_las_especies_invasoras/links/0deec5315216ce9246000000.pdf

RTVC - Señal Memoria (Director). (1991, enero 1). *Guatavita 1959—Tele Ayer* [Documental]. RTVC. <https://www.youtube.com/watch?v=7OX0cxvP67s>

Solorza Bejarano, J. H. (2012). Evaluation of regeneration of *Acacia decurrens*, *Acacia melanoxylon* AND *Ulex europaeus* in areas in process of ecological restoration. *Luna Azul*, 34, 66–80. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-24742012000100005&lng=en&nrm=iso&tlng=pt

Solórzano Villegas, J. V., Perilla Suárez, G. A. y Perilla Suárez, L.-D. (2022). *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/36058>

Velásquez-González, D. y Viancha Rodríguez, M. (2021). *Análisis de los impactos ecológicos de cinco especies forestales introducidas (Eucalyptus globulus, Acacia melanoxylon, Pinus patula, Acacia decurrens, Ulex europaeus) sobre los ecosistemas presentes en el parque natural municipal de Nobsa, Boyacá y su propuesta de mitigación* [Tesis de Especialización en Gerencia de Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/26665>

Vieites-Blanco, C. y González-Prieto, S. J. (2020). Invasiveness, ecological impacts and control of acacias in southwestern Europe – a review. *Web Ecology*, 20(2), 33–51. <https://doi.org/10.5194/we-20-33-2020>

Walker, B. (Director). (2018, julio 31). *Count Overlapping Polygons ArcMap* [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=mV3ovRrR1kM>

WFO. (2023). *World Flora Online* [Catálogo Online]. <http://www.worldfloraonline.org/>

Wilson, J. R. U., Gairifo, C., Gibson, M. R., Arianoutsou, M., Bakar, B. B., Baret, S., Celesti-Grapow, L., DiTomaso, J. M., Dufour-Dror, J.-M., Kueffer, C., Kull, C. A., Hoffmann, J. H., Impson, F. A. C., Loope, L. L., Marchante, E., Marchante, H., Moore, J. L., Murphy, D. J., Tassin, J., ... Richardson, D. M. (2011). Risk assessment, eradication, and biological control: Global efforts to limit Australian acacia invasions. *Diversity and Distributions*, 17(5), 1030–1046. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2011.00815.x>