

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0



SIMULACIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA DE LA TIERRA: ESCENARIOS FUTUROS E IMPACTOS EN EL MUNICIPIO DE TONA

Modalidad: Proyecto de Investigación

MIGUEL ÁNGEL PICO VELANDIA
CC. 1002300812

MARÍA DEYSI VILLAMIZAR RUEDA
CC. 1095799199

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA EN TOPOGRAFÍA
BUCARAMANGA

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0



SIMULACIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA DE LA TIERRA: ESCENARIOS FUTUROS E IMPACTOS EN EL MUNICIPIO DE TONA

Modalidad: Proyecto de Investigación

MIGUEL ÁNGEL PICO VELANDIA
CC. 1002300812

MARÍA DEYSI VILLAMIZAR RUEDA
CC. 1095799199

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero en Topografía

DIRECTOR
JOSÉ LUIS GÓMEZ DÍAZ

Grupo de investigación – GRIMAT

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA EN TOPOGRAFÍA
BUCARAMANGA, SEPTIEMBRE 10 DE 2025

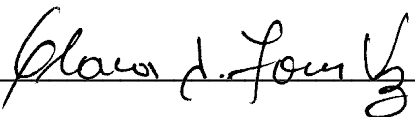
F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

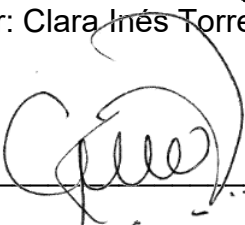
VERSIÓN: 2.0

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por
las Unidades Tecnológicas de Santander para optar
el título de Ingeniero Topógrafo según acta No. 23
del 12-09-2025 del Comité de Proyectos de Grado.



Firma del Evaluador: Clara Inés Torres Vásquez



Firma del Director: José Luis Gómez Díaz

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme permitido alcanzar este logro tan importante en mi vida, brindarme salud y las fuerzas necesarias para afrontar con valentía todos los problemas presentados y que de una u otra forma se pudieron lograr.

A mis padres Francisco (Q.E.P.D) y Rosa y hermanos, por su apoyo motivacional, económico, por todas sus enseñanzas y persistencia que nos caracteriza por salir siempre adelante afrontando todos los problemas y lograr esta etapa tan importante en mi vida.

A mis amigos incondicionales que conocí a lo largo de mi estancia por la universidad, porque sin ellos y su buen compañerismo y sabiduría, se pudieron superarlas adversidades y problemáticas vividas en los momentos más críticos de la vida como estudiantes universitarios y que sin ellos nada de esto sería posible.

A la Facultad Ciencias Naturales e Ingeniería y a todo su claustro administrativo, docentes, y especialmente al ingeniero José Luis Gómez Díaz por todo su conocimiento brindado y darnos la oportunidad de aprender de su vasta experiencia que servirá como base para afrontar cualquier problema en el ámbito profesional.

Miguel Ángel Pico Velandia

DEDICATORIA

Agradezco, en primer lugar, a Dios por concederme la fortaleza, la salud y la determinación necesarias para alcanzar este logro tan significativo para mi vida, sin su guía constante, no habría sido posible superar los retos que surgieron en el camino.

A mis padres, Saúl (Q.E.P.D) y Irma, mis hermanas y familia en general por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas y por impulsarme siempre a avanzar con firmeza, incluso en los momentos más difíciles para completar esta meta.

A los amigos que la universidad me permitió conocer, quienes se convirtieron en pilares fundamentales durante esta etapa, su compañía, sabiduría y solidaridad fueron clave para sortear los desafíos que la vida académica nos presentó.

A la Facultad Ciencias Naturales e Ingeniería, así como al personal administrativo y docente, por su compromiso con la formación integral. En especial, al ingeniero José Luis Gómez Díaz, por compartir su experiencia y conocimientos con generosidad, brindándonos herramientas valiosas para enfrentar con criterio y responsabilidad el ejercicio profesional.

María Deysi Villamizar Rueda

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Al Ingeniero José Luis Gómez Díaz, por la disposición, por los consejos, ayuda y amabilidad brindada desde el inicio del proceso de elaboración del proyecto.

De igual forma, se expresan agradecimientos a los docentes y directivos de la Facultad Ciencias Naturales e Ingeniería, que aportaron a nuestra formación profesional y personal durante nuestro ciclo universitario.

A las Unidades Tecnológicas de Santander, por convertirse en nuestro segundo hogar y brindarnos las herramientas necesarias para ser unos profesionales competentes en el mundo profesional, además de permitirnos ser parte de esta gran institución.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	12
INTRODUCCIÓN	14
1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4. ESTADO DEL ARTE	18
2 MARCO REFERENCIAL	21
ORDENAMIENTO TERRITORIAL	24
COBERTURA DE LA TIERRA.....	25
PENDIENTE.....	25
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN.....	25
MODELADO 3D:	26
MODELO CARTOGRÁFICO:.....	26
CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS	27
DINÁMICA EGO.....	28
SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.....	30
ANÁLISIS MULTITEMPORAL	31
GOBERNANZA Y CALIDAD DE LOS DATOS	31

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

PROCESAMIENTO DE DATOS	32
ALGEBRA DE MAPAS	32
3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.1 ZONA DE ESTUDIO.....	34
3.2 METODOLOGÍA	36
4 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	38
4.1 IDENTIFICAR INFORMACIÓN CLAVE	38
4.1.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	38
4.1.2 DESCARGA DE BASES DE DATOS.....	38
4.1.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	39
4.1.4 ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS DE CAMBIO DEL TERRITORIO:	40
4.1.5 PREPARACIÓN DE DATOS (CUBO RÁSTER).	40
4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	43
4.2.1 MATRIZ DE TRANSICIÓN	43
4.2.2 PESOS DE EVIDENCIA	45
4.2.3 CORRELACIÓN DE PESOS DE EVIDENCIA	48
4.2.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.	50
4.2.5 VALIDACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO.	51
4.2.6 REGIONALIZACIÓN.	51
4.3 SIMULACIÓN DE CAMBIOS.....	52
5 RESULTADOS.....	54
5.1 IDENTIFICACIÓN DE INFORMACIÓN INICIAL.....	54
5.2 DEFINICIÓN DE CAMBIOS.	55

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

5.3	GENERACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS.	55
5.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	57
5.5	ESCENARIO 1: RESTAURACIÓN ECOLÓGICA Y POLÍTICAS DE CONSERVACIÓN	57
5.6	SIMULACIÓN FUTURA AL AÑO 2032.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5.7	ESCENARIO 2: EXPANSIÓN AGRÍCOLA Y GANADERA SIN RESTRICCIONES.	67
6	CONCLUSIONES.....	73
7	RECOMENDACIONES	75
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figure 1. Frecuencia de pasos utilizados por Dinámica EGO	29
Figure 2. Ejemplo grafico del algebra de mapas.....	33
Figure 3. Localización Geográfica de la Zona de estudio.	35
Figure 4. Fases de la investigación.	37
Figure 5. Preparación cubo ráster.	41
Figure 6. Construcción cubo ráster.....	42
Figure 7. Resultado cubo ráster.	42
Figure 8. Definición de la matriz de transición.	44
Figure 9. Variables explicativas.	46
Figure 10. Identificación de transiciones relevante	47
Figure 11. Calculo pesos de evidencia.....	47
Figure 12. Cálculo de correlación.	49
Figure 13. Análisis matriz de correlación.	49
Figure 14. Calibración modelo de simulación.	50
Figure 15. Plano de Regionalización según resultados.	52
Figure 16. Simulación a largo plazo.	56
Figure 17. Zonas de cobertura de buen uso de suelo proyectado al año 2032.....	59
Figure 18. Mapa topográfico proyectado a las Zonas de mayor afectación.	60
Figure 19. Simulación de zonas de Cobertura de restauración ecológica.....	65
Figure 20. Mapa topográfico de análisis de cobertura conservación forestal.....	66
Figure 21. Zonas de Cobertura escenario 2 expansión agrícola y ganadera	71
Figure 22. Mapa topográfico de mayor afectación de expansión agrícola	71

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

LISTA DE TABLAS

Table 1. Matrices de transición.	45
Table 2. Fuentes de información utilizadas para la elaboración del modelo.	54
Table 3. Escenarios futuros proyectados.	56
Table 4. Simbología leyenda de proyección de las Zonas de Cobertura.	60
Table 5. Tasas cambio de cobertura a 2032.	61
Table 6. Razón de cambio de zonas de cobertura de restauración ecológica.	63
Table 7. Escenario 2 Expansión agrícola y ganadera sin restricciones.	69

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto tuvo como objetivo desarrollar un modelo de cambio de coberturas de tierra para el municipio de Tona, por medio de un análisis multitemporal y utilizando variables biofísicas; lo anterior permitió generar escenarios de transformación territorial y entregar información clave para la gestión ambiental y planificación sostenible; la metodología empleó un enfoque longitudinal y mixto, combinando el análisis de datos geoespaciales históricos de los años 2002-2009-2012 y 2018 por medio de la técnica de autómatas celulares, lo que facilitó la identificación de patrones de cambio y la simulación de escenarios futuros al año 2032; los resultados de esta simulación para 2032 revelan tendencias críticas como la expansión significativa de pastos limpios y enmalezados, lo que indica intensificación ganadera, paralelamente se proyectó una reducción preocupante de coberturas importantes como arbustal, bosque denso y herbazal, lo que estaría comprometiendo servicios ecosistémicos vitales, el bosque fragmentado mostró una notable expansión que representa una regeneración secundaria, además las proyecciones indicaron un crecimiento del tejido urbano discontinuo o cambio de uso del suelo.

Estas proyecciones entregan un insumo esencial para el ordenamiento territorial, las recomendaciones finales incluyen fortalecer la protección de coberturas de tierras estratégicas, regular la expansión agropecuaria, estudiar a fondo la dinámica del bosque fragmentado, precisar la planificación urbana y fundamentalmente integrar este modelo a las futuras revisiones y actualizaciones del EOT de Tona, esto permitirá al municipio anticipar y gestionar los impactos territoriales, asegurando un desarrollo más sostenible.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

PALABRAS CLAVE.

Simulación, cobertura de la tierra, Dinámica EGO, autómatas celulares, ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

El municipio de Tona ubicado en el departamento de Santander, Colombia, ha experimentado transformaciones significativas en la cobertura de la tierra en las últimas décadas, impulsadas por factores tanto naturales como antrópicos. Estas dinámicas representan un desafío para la gestión ambiental y la planificación territorial, por lo tanto, requieren de un análisis riguroso que permita comprender sus causas, consecuencias y posibles trayectorias futuras.

En este contexto, el presente proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación de cambio en las coberturas de la tierra en el municipio de Tona, mediante un enfoque metodológico que articula el análisis multitemporal de coberturas con la modelación espacial basada en variables biofísicas. Para ello se emplea el software Dinámica EGO, una herramienta de modelado geoespacial ampliamente reconocida por su capacidad para simular procesos complejos de transformación territorial.

La combinación de estas dos aproximaciones, el análisis multitemporal y la modelación con Dinámica EGO, permitirá cuantificar los cambios históricos, determinar las tasas y patrones de cambio en la cobertura de la tierra en Tona, identificar los factores impulsores evaluando la influencia de variables biofísicas y actividades humanas en estos cambios, generar escenarios futuros proyectando posibles trayectorias de cambio en la cobertura de la tierra bajo diferentes supuestos, proporcionar información para la toma de decisiones dotando a los actores locales y regionales de herramientas para la gestión ambiental y la planificación sostenible. Este proyecto, por lo tanto, busca generar un modelo robusto y confiable que contribuya a la comprensión de las dinámicas de cambio en Tona y que sirva como base para la formulación de políticas y estrategias que promuevan un desarrollo territorial equilibrado y sostenible

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de Tona, Santander, se evidencia ausencia de datos de cobertura de la tierra actualizados, al igual que insuficiencia de modelos predictivos de cambio de cobertura de la tierra, lo que dificulta la planificación y gestión ambiental a largo plazo, esta situación surge debido a la falta de datos precisos actualizados sobre las dinámicas de uso de suelo y la cobertura vegetal, así como por la influencia de factores socioeconómicos y ambientales que no se integran de manera adecuada en los modelos existentes.

Entre las principales causas del cambio de cobertura de la tierra se encuentran la expansión urbana no planificada, la intensificación de actividades agrícolas y la falta de políticas sostenibles que anticipen estos cambios. Esta situación genera incertidumbre en la gestión de los recursos naturales, comprometiendo la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas locales.

¿Cómo influye la combinación de factores ambientales y socioeconómicos en los cambios de cobertura de la tierra en el municipio de Tona y que modelo predictivo puede optimizar su gestión futura?

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La propuesta de modelación de cambio de cobertura de la tierra para el municipio de Tona es fundamental para enfrentar los desafíos que surgen de la falta de planificación territorial actualizada. A nivel departamental, el 87% de los municipios de Santander no han actualizado sus planes de ordenamiento territorial (POT), lo que dificulta la gestión adecuada del suelo y la preservación de los ecosistemas. Solo el 7% de los municipios ha cumplido con esta actualización, lo que revela una brecha considerable en la planificación territorial, afectando tanto al desarrollo socioeconómico como a la sostenibilidad ambiental.

Resolver este problema brinda una nueva mirada con información para actualizar el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) ya que permite identificar las tendencias futuras de la cobertura de la tierra y generar políticas que respondan a las dinámicas actuales, esto es clave para el Plan de Desarrollo Departamental, que busca reducir en un 1% los conflictos de uso del suelo y disminuir la deforestación un 10%. A nivel nacional, la deficiencia en los modelos de predicción y planificación agravan estos problemas, fortaleciendo la idea de la creación de herramientas más precisas y contextuales.

La propuesta es relevante ya que contribuye a la línea de investigación en planificación y sostenibilidad, brindando una herramienta que puede ser aplicada en los distintos municipios, áreas naturales y de preservación ambiental en el país. Además, su aplicabilidad es clara, lo que permite vincular conocimientos teóricos con necesidades reales de su entorno, mejorando competencias en herramientas SIG y modelos predictivos. Los efectos de esta solución incluyen una mejora en la toma de decisiones

para la gestión del suelo y conservación ambiental, con impactos en la sociedad y economía.

Finalmente, esta propuesta aporta a la línea de investigación denominada “Modelación de sistemas ambientales” del grupo de investigación en medio ambiente y territorio, GRIMAT.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de cambio de cobertura del suelo para el municipio de Tona, Santander, por medio de un análisis multitemporal de las coberturas de la tierra y variables biofísicas, con el fin de generar escenarios de transformaciones del territorio, y proporcionar información clave para la gestión ambiental y planificación sostenible.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las coberturas de la tierra en los periodos de análisis definidos utilizando bases de datos geoespaciales existentes de las variables socioeconómicas, ambientales y climáticas, para reconocer las áreas y patrones en los que se presentan cambios de coberturas en el territorio.
- Analizar las tendencias históricas de cambio de cobertura de la tierra en el municipio de Tona empleando un modelo de autómatas celulares con la información generada, para identificar las principales dinámicas de transformación del territorio.
- Simular los cambios de cobertura de la tierra por medio del modelo de simulación construido, para proyectar escenarios futuros de uso de la tierra en el municipio de Tona.

1.4. ESTADO DEL ARTE

El estudio del cambio de cobertura de la tierra ha ganado una importancia significativa a nivel mundial debido a su influencia directa en la sostenibilidad ambiental, la planificación territorial y la gestión de recursos. La modelación de estos cambios ha evolucionado notablemente gracias al desarrollo de tecnologías, el uso de sensores remotos, procesamiento de datos y técnicas de Big Data, permitiendo la comprensión de patrones complejos para anticipar futuros escenarios con mayor precisión.

La evolución de los modelos de simulación de cambios de cobertura de la tierra no solo ha estado marcada por el avance tecnológico, sino también por la comprensión de la necesidad de enfoques interdisciplinarios. La combinación de conocimiento proveniente de la geografía, las ciencias informáticas y las políticas públicas ha permitido desarrollar herramientas cada vez más precisas y relevantes para la toma de decisiones. Por lo tanto, el fortalecimiento de capacidades locales y la articulación entre actores institucionales y comunitarios han demostrado ser factores clave para aprovechar el potencial de la modelación espacial y garantizar que las proyecciones generadas contribuyan de manera efectiva la gestión sostenible del territorio y la conservación ambiental.

A nivel global, los enfoques contemporáneos en modelación espacial integran autómatas celulares, aprendizaje automático y redes neuronales para capturar dinámicas espaciales y temporales. De acuerdo con los estudios de Huang et al. (2024) que plantea cuantificar y comparar el impacto del cambio climático y el cambio en la cobertura del suelo, el monitoreo con sensores remotos ha mejorado sustancialmente, facilitando la identificación de los factores impulsores del cambio como la deforestación, expansión agrícola y urbanización, especialmente en áreas rurales y de topografía accidentada.

Estos modelos permiten simular distintos escenarios considerando factores físicos como elevación, pendiente o cercanía a cuerpos de agua, así como variables socioeconómicas, climáticas y políticas.

Los autómatas celulares han sido utilizados en varios estudios a nivel internacional debido a su capacidad para simular interacciones espaciales complejas y dinámicas no lineales. Estas técnicas se han aplicado en países como China, Brasil, India y México, en los cuales se han evidenciado resultados de éxito, también se han modelado escenarios de expansión urbana, degradación de ecosistemas o recuperación forestal. La ventaja de los autómatas celulares es su habilidad para replicar patrones emergentes del cambio territorial haciendo uso de reglas simples basadas en la influencia del entorno. Asimismo, la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático y el procesamiento de datos geoespaciales han aumentado la precisión de las simulaciones.

En Colombia el uso de estas tecnologías aún es emergente sin embargo ya se están aplicando algunos modelos que ayudan a predecir el cambio de cobertura, los cuales incluyen imágenes satelitales de alta resolución y algunos datos socioeconómicos relacionados a la zona de interés, estos modelos han sido pieza fundamental para prever escenarios de degradación de ecosistemas, especialmente en zonas como la región Andina donde debido a la expansión agrícola los cambios en el uso de la tierra resultan ser más intensivos. En cuanto a los cambios en la cobertura a nivel nacional se tiene una reducción de bosques naturales debido a la deforestación, especialmente en zonas como Amazonia, Orinoquia y la región Andina, incremento de las zonas urbanas en las regiones de Cundinamarca, el Valle del Cauca y la Costa Caribe y aumento de áreas agrícolas y pastizales debido a la alta demanda en el sector de la ganadería y la agricultura comercial.

El municipio de Tona, Santander, ha sufrido importantes cambios en la cobertura de su tierra durante las últimas décadas, especialmente en el ecosistema del páramo de Berlín y la cuenca del río Tona. Entre 1987 y 2015 estudios realizados por la Universidad Industrial de Santander empleando la metodología Corine Land Cover evidenciaron un aumento de las áreas agrícolas y una disminución de la vegetación natural como los herbazales paramunos y bosques nativos. En el periodo de 2000 a 2021 el complejo de páramo Santurbán perdió 8,62% de vegetación paramuna y 6,13% de cobertura boscosa al mismo tiempo el porcentaje de tierras cultivadas aumentó a 10,58% sin embargo en este lapso de tiempo el municipio de Tona fue uno de los más afectados debido a la ausencia de conservación estricta en varias zonas del páramo. En enero de 2024 se registró un incendio que afectó entre 150 y 600 hectáreas de frailejones, bosques y pastizales, hecho que dejó daños severos en el ecosistema de alta montaña, en 2025 se observó una recuperación ecológica rápida con monitoreos realizados por la CDMB. Además, el cambio de uso del suelo ha provocado erosión y sedimentación en la cuenca del río Tona comprometiendo de esta manera la sostenibilidad del embalse el cual abastece a Bucaramanga.

2. MARCO REFERENCIAL

El proyecto de investigación se sustenta en un marco teórico robusto que comprende los principios fundamentales de la simulación de los cambios de la cobertura terrestre, la modelación espacial y el uso de autómatas celulares a través del software Dinámica EGO una plataforma especializada en modelado ambiental. Esta herramienta opera mediante un flujo de datos que facilita la elaboración de modelos espacio - temporales complejos. Se abordaron conceptos de álgebra de mapas, algoritmos de autómatas celulares y generación de parches, elementos esenciales para representar las interacciones entre variables responsables de los cambios en la cobertura. Asimismo, se revisaron los fundamentos de la modelación predictiva en el ámbito geográfico y ecológico, junto con los métodos empleados para la calibración y modelación de modelos espaciales.

El marco legal de esta investigación se rige por la normatividad colombiana vigente, esencial para comprender el contexto de la planificación y gestión territorial, se consideran principalmente los siguientes instrumentos.

- Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Tona, formulado en 2002, es el principal instrumento de planeación que regula el uso, manejo y transformación del suelo, conforme a la Ley 388 de 1997, la cual establece los principios de ordenamiento territorial en Colombia. Este esquema se adoptó considerando la constitución política de 1991 (Artículos 286 y 311), el Acuerdo Municipal 09 de 1993 el cual definió la división político – administrativa, y el Acuerdo Municipal 014 de 1996 que delimitó el perímetro urbano y el área rural. En materia de coberturas de la tierra el esquema de ordenamiento territorial define una zonificación detallada basada en el mayor uso potencial de los suelos,

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

considerando variables como clima, pendiente, capacidad agrícola y fragilidad ecosistémica. Esta zonificación clasifica el territorio en áreas de uso agropecuario, agroforestal, forestal productivo, forestal protector, conservación de recursos naturales y uso urbano. Entre las coberturas agrícolas predominantes están los cultivos de cebolla junca, papa y café, así como extensas praderas para la ganadería bovina y ovina. El documento identifica problemáticas ambientales, como el uso inadecuado de tierras de alta pendiente para cultivos intensivos y también contaminación hídrica derivada de agroquímicos, lo que genera problemas entre el uso actual y el uso potencial óptimo. Por ello, se establecen zonas de protección hídrica como en el Páramo de Berlín y diferentes cuencas abastecedoras donde se prohíbe la expansión agrícola y se promueve la restauración de coberturas naturales. El EOT exige que los usos del suelo sean compatibles con la capacidad del territorio y prevé la actualización de los catastros, la educación ambiental comunitaria y la mediación con actores sociales. Así, el esquema busca equilibrar el aprovechamiento productivo con la conservación de ecosistemas estratégicos, bajo un enfoque normativo y participativo.

- El plan de desarrollo municipal de Tona 2020 – 2023 se formula conforme a los lineamientos de la Ley 152 de 1994 (Ley orgánica del plan de desarrollo) y en conjunto con el esquema de ordenamiento territorial (EOT) vigente, adoptado en el marco de la ley 388 de 1997. Esta normativa orienta el ordenamiento del territorio, el uso del suelo y la sostenibilidad de los recursos naturales, lo cual tiene implicaciones directas sobre las coberturas de la tierra. El plan incorpora una visión territorial que reconoce el papel estratégico de las coberturas agropecuarias, forestales y ecosistémicas. Se busca consolidar un desarrollo rural agropecuario sostenible mediante programas que fomenten el uso nacional del

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

suelo, respetando su vocación natural y priorizando prácticas ambientalmente responsables. En este sentido, se promueve la protección de coberturas naturales en áreas de recarga hídrica y zonas de alta pendiente, especialmente dentro de ecosistemas clave como el páramo de Berlín. La línea “Conservación verde y desarrollo sostenible” implementa acciones para preservar coberturas vegetales nativas, prevenir la deforestación y recuperar áreas degradadas en cumplimiento con políticas ambientales de orden nacional y regional. Además, se proyecta la implementación de sistemas productivos agroecológicos y silvopastoriles como alternativa sostenible en zonas rurales. El plan también establece la necesidad de actualizar el catastro multipropósito y los inventarios de cobertura de la tierra y uso del suelo, como herramientas para la toma de decisiones en la planificación territorial. De esta manera se promueve una gobernanza del suelo basada en la equidad, la eficiencia y la conservación, respaldada por principios constitucionales como el código nacional de recursos ambientales (Decreto 2811 de 1974) y la Ley 99 de 1993 que crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

- El plan de manejo del páramo de Santurbán el cual está formulado por los Parques Nacionales Naturales de Colombia, constituye una herramienta de planificación ambiental conforme al marco normativo establecido por la Ley 99 de 1993 que crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y la Ley 1450 de 2011 (Plan Nacional de Desarrollo), que ordena la delimitación de los páramos y su protección. Este plan se apoya en el Decreto 622 de 1977 que reglamenta las áreas del sistema de Parques Nacionales Naturales y en la sentencia T-361 de 2017 que refuerza la protección jurídica de los ecosistemas de páramo. En lo que respecta a las coberturas de la tierra el plan establece un diagnóstico detallado que incluye coberturas vegetales nativas como frailejones, pajonales, matorrales bajos, bosques, bosques altoandinos, y zonas de humedales, todos estos considerados

estratégicos para la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad, También identifica áreas transformadas por actividades humanas, como la agricultura, ganadería, minería y expansión urbana, clasificándolas como coberturas de alto impacto y necesidad de restauración. El plan define zonas de manejo que restringen o permiten ciertos usos del suelo, conforme a lo dispuesto en la Ley 1930 de 2018, que establece la gestión integral de los páramos. Se prioriza la restauración ecológica en áreas donde las coberturas originales han sido degradadas y se promueve la exclusión de actividades incompatibles con la minería a gran escala, conforme al principio de precaución ambiental del Artículo 1 del Decreto 1076 de 2015.

En el marco conceptual se mencionan las definiciones más importantes que fueron abordadas a lo largo del proyecto.

- **Ordenamiento territorial:** De conformidad con la Ley 1454 de 2011, se define: “El ordenamiento territorial es un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político administrativa del estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial, entendido este como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia”.

- Cobertura de la tierra: Describe el estado natural de la superficie terrestre como los tipos de vegetación, el agua, el suelo, las montañas, los bosques, los glaciares, los ríos, los lagos, la biodiversidad y otras construcciones hechas por el humano como carreteras, ciudades, presas, entre otras características físicas. El estudio de la cobertura terrestre es esencial para entender los procesos ecológicos, la planificación territorial, la conservación de la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos naturales, además de ser un insumo fundamental en los análisis de cambio global y estudios de impacto ambiental.
- Pendiente: Dentro del ámbito de la topografía, la pendiente refleja la variación máxima de la elevación en un punto dado. Esta se presenta como una función del gradiente donde su valor representa el ángulo que se forma entre el plano horizontal y tangencial en el punto de interés. Sus unidades de medida están expresadas en radianes o grados, y en porcentaje. También influyen directamente en el escurrimiento del agua, la erosión del suelo, la estabilidad de las infraestructuras y la planificación urbanística y agrícola. Por ejemplo, terrenos muy inclinados presentan mayor riesgo de deslizamientos, mientras que áreas con pendiente nula pueden tener problemas de drenaje. La representación y análisis de pendientes es clave en sistemas de información geográfica (SIG), pues permite clasificar el terreno y establecer zonas de riesgo o potencial de uso.
- Modelamiento y simulación: Es el proceso de plasmar un sistema real o hipotético mediante abstracto, con el fin de analizar su comportamiento bajo distintas condiciones y predecir su comportamiento en el tiempo continuo. La modelación implica la construcción del modelo, mientras la simulación consiste en efectuar ese modelo para analizar y observar cómo responde ante distintos escenarios en el tiempo. La simulación permite experimentar de manera virtual con el modelo bajo diversas condiciones, observando cómo cambia el sistema a lo largo del

tiempo y bajo diferentes escenarios; por ejemplo, cambio climático y modificación del uso de suelo. Entre las ventajas de estas técnicas se destacan la reducción de costos y riesgos (al ensayar anteriormente reformas o intervenciones), la posibilidad de pronosticar situaciones futuras y la ayuda en la toma de decisiones para la gestión ambiental, la planeación urbana entre otros ámbitos.

- **Modelado 3D:** Es un proceso que permite llevar a cabo la representación tridimensional de un objeto o grupo de objetos en un espacio virtual, gracias a esta técnica es posible obtener representaciones tridimensionales de terrenos, estructuras y objetos, lo que sirve de gran ayuda para el análisis y la visualización de datos geoespaciales. Además, el modelado 3D permite simular escenarios y realizar mediciones más exactas, lo que resulta punto clave en la planificación de proyectos de construcción, el estudio de impacto ambiental y la gestión del territorio. También está estrechamente vinculado al uso de datos obtenidos mediante tecnologías como LIDAR, drones, sistemas de información geográfica y sensores remotos, que proporcionan información precisa sobre la morfología del terreno y los objetos sobre él. Consecuentemente, facilita la simulación de distintos escenarios, como el impacto de desastres naturales, el crecimiento de ciudades o el desarrollo de infraestructuras.
- **Modelo cartográfico:** Hace referencia a una representación gráfica de los datos y procedimientos analíticos que se usan en un estudio con el propósito de auxiliar en la organización del análisis y estructurar los procedimientos necesarios, así como identificar los datos necesarios para el estudio; sirve como fuente de consulta y referencia para el análisis. Consiste en diagramas, mapas o flujogramas que representan la estructura lógica de un análisis espacial, detallando los datos de entrada, procesos intermedios y resultados esperados. Estos modelos se emplean para organizar el desarrollo de proyectos en SIG,

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

análisis multicriterio, gestión ambiental, ordenamiento territorial, y sirven como referencia para actualizar, mejorar o comunicar procesos analíticos complejos dentro de equipos interdisciplinarios.

Clasificación de los modelos Cartográficos:

- **Modelo descriptivo:** Es un enfoque estadístico cuyo propósito principal es sintetizar y caracterizar la información contenida en un conjunto de datos, sin enfocarse en predecir comportamientos futuros ni en realizar inferencias. Su función central es mostrar patrones, distribuciones o características espaciales de manera directa. Dado su carácter meramente descriptivo, este tipo de modelo no está orientado a emitir recomendaciones, sino únicamente a organizar y exponer la información disponible. Generalmente, se aplica en la elaboración de mapas o representaciones espaciales, apoyándose en la observación, la recolección de datos y el análisis exploratorio. Puede emplear tanto un razonamiento inductivo, al identificar regularidades a partir de datos particulares, como deductivo, al contrastar hipótesis previamente planteadas sobre los patrones observados. Sin embargo, no permite anticipar cambios futuros ni realizar recomendaciones directas, por lo que su función es esencialmente informativa y de punto de partida para otros tipos de análisis.
- **Modelos de simulación:** Los modelos de simulación buscan reproducir de manera artificial fenómenos naturales complejos, generando escenarios hipotéticos o que podrían ocurrir en la realidad. Este tipo de modelamiento exige un nivel considerable de conocimiento técnico y su grado de integración con los sistemas de información geográfica (SIG) puede variar. Una vez construido, el modelo permite analizar y valorar diferentes propiedades de los datos, adaptándose a

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

distintos niveles de detalle: desde simulaciones básicas hasta sistemas computacionales avanzados vinculados a plataformas SIG. Estas herramientas resultan fundamentales en procesos como la planificación del territorio, la gestión de riesgos, la evaluación de impactos y el diagnóstico ambiental, ya que posibilitan ensayar alternativas sin necesidad de intervenir directamente en el entorno real.

- **Modelo de Simulación:** Es una técnica SIG de gran potencial, que trata de generar escenarios futuros de acuerdo a tendencias o modelamiento estadístico a partir de datos de ocurrencia histórica, es decir, de datos reales. El modelo predictivo analiza cómo afectan e intervienen los factores en el tiempo, como están asociados e identifica cuales factores tienen mayor relevancia de decisión en el proceso de la solución de un problema. Este modelo hace uso de técnicas estadísticas, algoritmos de aprendizaje automático y análisis de series temporales para anticipar el comportamiento futuro de un fenómeno espacial a partir de datos históricos y actuales. Su objetivo es establecer tendencias y hacer proyecciones con base en el análisis de factores que han influido en el pasado, identificando cuales son las variables clave en la evolución y dinámica del fenómeno estudiado.
- **Dinámica EGO:** Es una plataforma avanzada, gratuita y de carácter no comercial, diseñada para el modelado ambiental. Ofrece amplias capacidades que van desde la construcción de modelos espaciales estáticos sencillos hasta simulaciones dinámicas de alta complejidad. Entre sus funcionalidades destacan la posibilidad de trabajar con iteraciones anidadas, transiciones múltiples, retroalimentación dinámica, enfoques multirregionales y multi-escala, así como la incorporación de procesos de decisión que permiten ramificar o integrar flujos de ejecución. Además, integra diversos algoritmos espaciales especializados para el análisis y la simulación de fenómenos espacio-temporales. (UFMG, 2020). Dinámica EGO

permite realizar iteraciones anidadas, manejar transiciones múltiples, implementar retroalimentación dinámica, y utilizar un enfoque multirregional y multi-escala. Además, incorpora procesos de decisión para bifurcaciones y uniones en las cadenas de ejecución, lo que favorece la simulación de fenómenos espacio-temporales complejos. También, integra variables biofísicas y socioeconómicas en modelos multicriterio para abordar problemas ambientales y territoriales complejos. Su manejo, aunque inicialmente puede parecer difícil debido a la cantidad de funciones parámetros, permite representar modelos grandes y detallados con buena precisión y velocidad.

Figure 1. Frecuencia de pasos utilizados por Dinámica EGO



Nota: Representación gráfica de flujo de trabajo dinámica EGO. Fuente: Espinoza, V. (2016)

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

- **Autómata Celular:** Un autómata celular (CA por su sigla en inglés) es un modelo matemático y computacional para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen localmente unos con otros. Este algoritmo permite calibrar cómo los píxeles cambian de clase, distribuyendo los cambios espaciales en función de las probabilidades y las fuerzas de los factores. En este esquema, cada celda del autómata tiene un estado, y las reglas de transición determinan cómo ese estado cambia en función de los estados de las celdas vecinas. Esta propiedad hace que los autómatas celulares sean ideales para modelar fenómenos con interacción espacial y temporal, como la propagación de incendios forestales, la urbanización, la difusión de contaminantes o la evaluación del uso del suelo. El principal aporte de los autómatas celulares en el análisis geoespacial es la capacidad de calibrar cómo los píxeles cambian de clase o estado, distribuyendo los cambios en el espacio según probabilidades influenciadas por diversos factores ambientales y humanos. Esto permite simular patrones complejos emergentes de procesos locales simples, facilitando la predicción y la planificación territorial basada en tendencias reales y escenarios hipotéticos (Padilla et al., 2015).
- **Sostenibilidad ambiental:** Es un concepto que hace énfasis en los esfuerzos orientados a conseguir un equilibrio ecológico extendido y perdurable a través de la preservación y el uso responsable de los recursos naturales. Para cumplir este objetivo es primordial una óptima gestión de los recursos naturales a fin de asegurar su disponibilidad a mediano y largo plazo. Para alcanzar la sostenibilidad del medio ambiente, es primordial implementar estrategias de gestión eficiente y sostenible de los recursos. Esto implica minimizar impactos

ambientales negativos relacionados con la contaminación, deforestación, sobreexplotación y cambio climático, promoviendo actividades que regeneren el entorno y mantengan su capacidad funcional. En un amplio contexto, la sostenibilidad también obliga a integrar aspectos sociales y económicos, es decir, procurar justicia ambiental, desarrollo equitativo y políticas que integren la conservación del entorno con el bienestar humano a largo plazo.

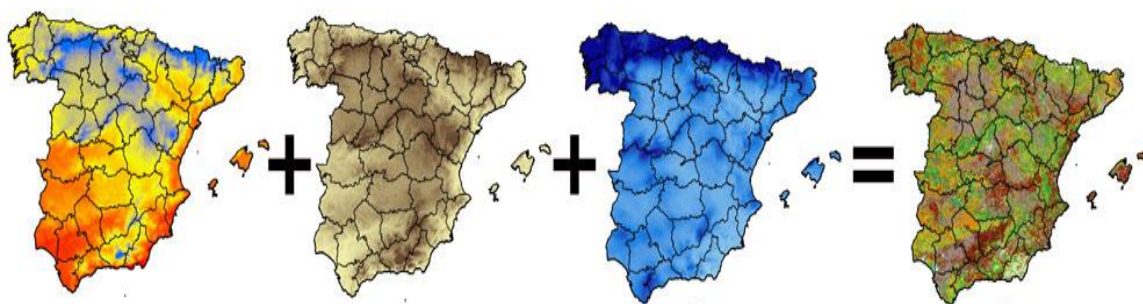
- **Análisis multitemporal:** Hace referencia a una técnica que se utiliza en la interpretación de imágenes satelitales para estudiar los cambios que se puedan llegar a presentar en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Se utilizan imágenes captadas en diferentes fechas para comparar y analizar los cambios en la vegetación, la urbanización, la degradación del suelo, entre otros aspectos. Por medio de procesamiento digital, se extraen índices y métricas que evidencian transformaciones, permitiendo detectar tendencias, eventos puntuales (como incendios o inundaciones), y procesos graduales de cambio. Esta técnica es fundamental para el monitoreo ambiental, la evaluación de políticas públicas, la gestión de recursos naturales, y la planificación territorial.
- **Gobernanza y calidad de los datos:** Es el conjunto de procesos, políticas, roles, estándares, y métricas que aseguran el uso eficaz y eficiente de la información en una organización, va más allá de la simple gestión de datos lo que implica establecer un marco integral para controlar, proteger y mejorar el valor de los activos del dato. Es esencial ya que garantiza la calidad, consistencia, trazabilidad e Inter operatividad de los datos utilizados en el modelo. Permite integrar información que proviene de diversas fuentes de manera confiable, facilita la toma de decisiones informadas en planificación y gestión ambiental, asegura la

protección de los datos sensibles y promueve la sostenibilidad del modelo, mediante actualizaciones eficientes.

- **Procesamiento de datos:** Hace referencia a todo el conjunto de operaciones sistemáticas que transforman datos sin procesar en información útil mediante técnicas como la recolección, limpieza, integración, análisis y visualización. En el contexto geoespacial cobra relevancia al aplicarlo al estudio de coberturas terrestres ya que permite analizar, modelar y predecir los cambios en el uso y ocupación del suelo a lo largo del tiempo. Este proceso es importante para analizar cambios en la cobertura y uso de la tierra, detectar patrones, modelar escenarios futuros y apoyar la toma de decisiones específicas. Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y técnicas estadísticas se combinan para realizar este procesamiento, permitiendo mejorar la precisión y profundidad del análisis ambiental y territorial. En resumen, el procesamiento adecuado de datos garantiza la calidad, coherencia y aplicabilidad de la información para proyectos ambientales, urbanísticos y de investigación científica.
- **Álgebra de mapas:** El álgebra de mapas dentro de los sistemas de información geográfica (SIG) se refiere al conjunto de operaciones y procedimientos analíticos que permiten trabajar con varias capas de información para generar datos derivados. A partir de la combinación y explotación de las capas originales, es posible producir cartografía secundaria que ofrezca nuevas perspectivas sobre el territorio. Aunque tradicionalmente se relaciona con el análisis ráster, también puede aplicarse a entornos vectoriales. Su principal utilidad radica en integrar distintas variables espaciales —como pendientes, cobertura vegetal, áreas de protección o densidad poblacional— para construir mapas temáticos alternativos. De esta manera, el álgebra de mapas facilita la identificación de zonas con

características específicas, por ejemplo, aquellas más adecuadas para determinado uso o planificación territorial.

Figure 2. Ejemplo grafico del algebra de mapas



Nota: Representación gráfica algebra de mapas. Fuente: Ferreras, R. M. (2016).

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

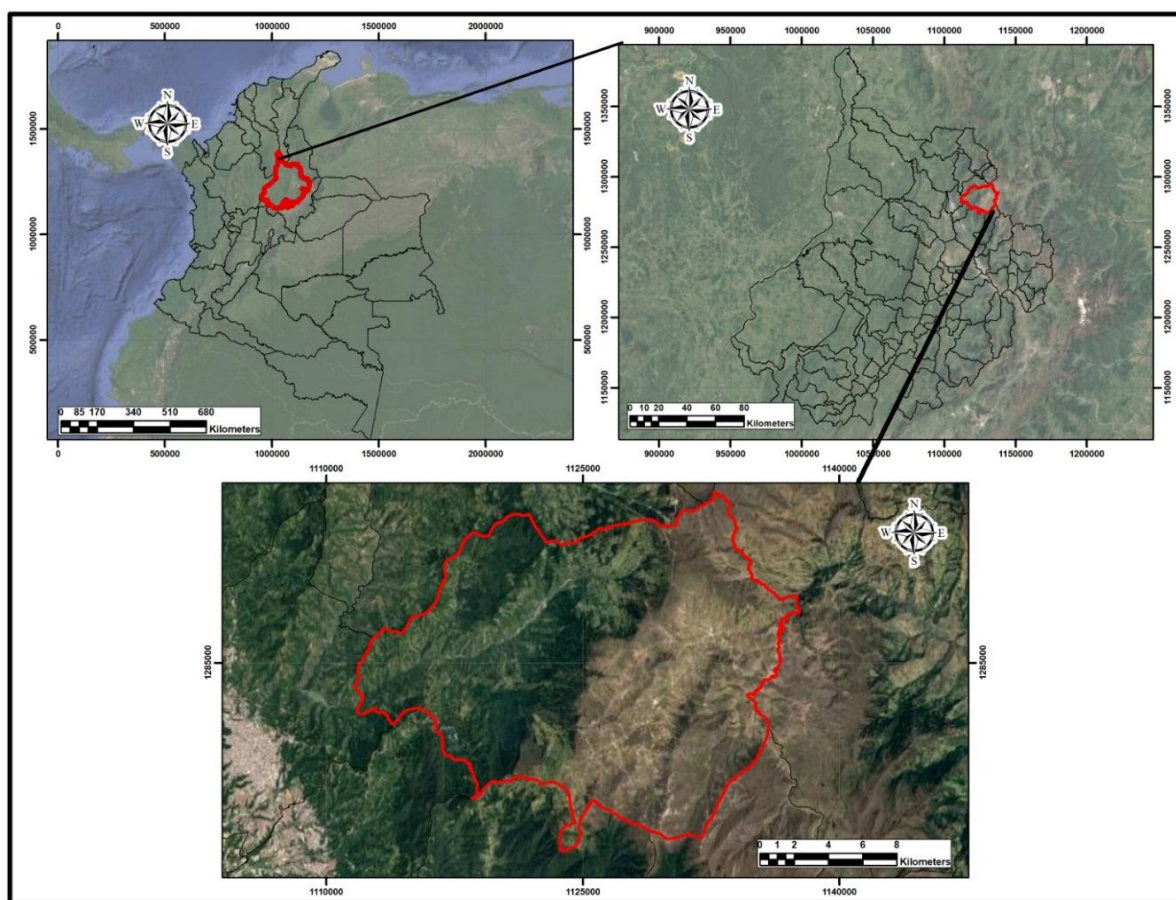
En este proyecto de investigación de modelamiento y simulación de los cambios en la cobertura de la tierra en el municipio de Tona se aborda con una metodología longitudinal, la cual permite el estudio de la evolución de las coberturas a lo largo de diferentes periodos de tiempo. Se empleó un enfoque mixto, de esta forma se combinan elementos cualitativos para comprender las variables involucradas con mediciones cuantitativas que permitan establecer los cambios en las coberturas de la tierra. El método de análisis se enfocó en la interpretación de los cambios observados, y como técnica principal se utilizaron factores de cambio mediante autómatas celulares, una herramienta que facilita la modelización de los escenarios futuros y sus principales impactos.

3.1. Zona de estudio

El proyecto tuvo en cuenta como caso de estudio el municipio de Tona, localizado en el departamento de Santander, Colombia, destaca por su ubicación estratégica en la Cordillera Oriental, en la provincia de Soto y dentro de la cuenca superior del río Lebrija, una parte significativa de su territorio forma parte del Páramo de Santurbán, lo que le confiere una riqueza hídrica y ecosistémica invaluable, sobresale el río Tona que nace en el Páramo de Berlín como arteria principal para el abastecimiento del Embalse de Bucaramanga, garantizando el recurso hídrico para toda el área metropolitana. Con alturas que van desde los 2.200 hasta los 4.100 metros sobre el nivel del mar, Tona limita al norte con los municipios de Charta y Vetás, al sur con Santa Bárbara, Piedecuesta y Floridablanca, al occidente con Bucaramanga y al oriente con el departamento de Norte de Santander, está ubicado en las coordenadas planas 1.125.000 m - 1.140.000 metros Este y 1.285.000 – 1.300.000 metros Norte, según la proyección cartográfica Magna-

Sirgas Colombia Bogotá, tiene una extensión aproximada de 342 km², con una población de 7.718 habitantes al año 2025, su economía se basa principalmente en la agricultura, su cultivo principal es la cebolla junca, zanahoria, apio y variedades de papa, en la ganadería destacan las actividades bovina, ovina, equina, avicultura y acuicultura, además su cercanía a Bucaramanga a unos 37 km lo convierte en un destino accesible para quienes buscan un clima agradable y paisajes de montaña.

Figure 3. Localización Geográfica de la Zona de estudio.

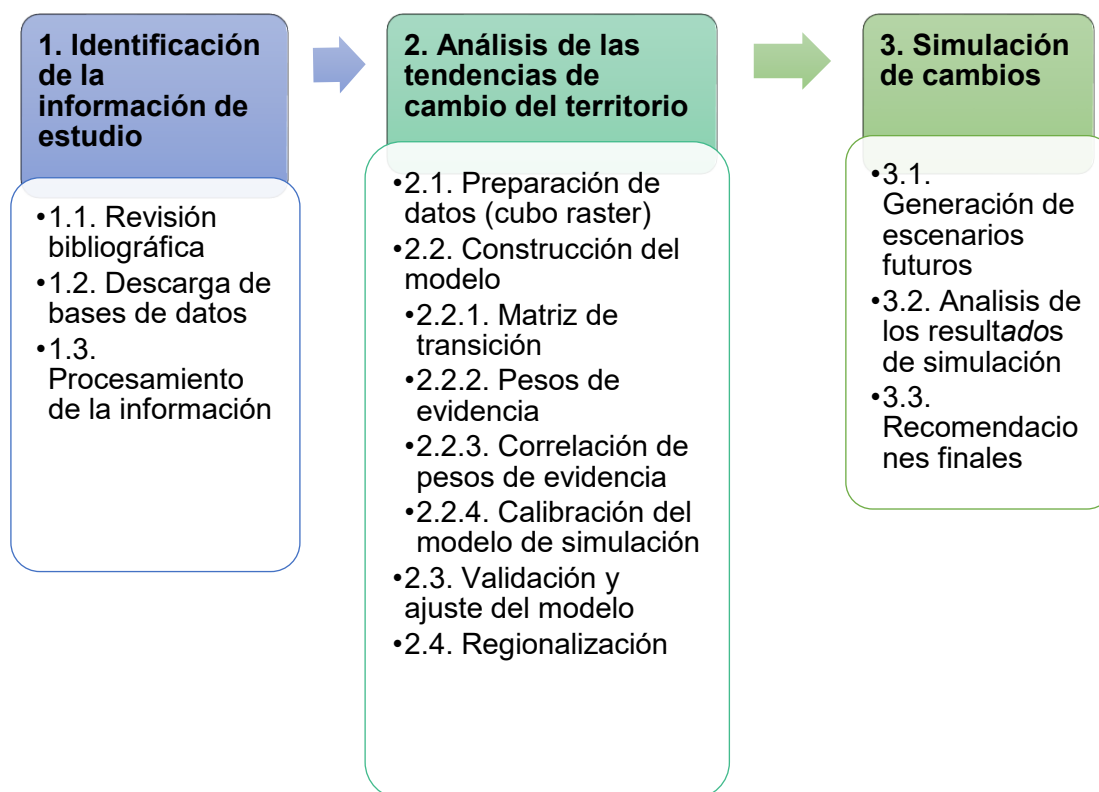


Nota. Georreferenciación nacional, departamental y municipal de la zona de estudios sin esca - Fuente: Autores.

3.2. Metodología

La metodología propuesta para desarrollar la investigación se fundamenta en modelos de simulación basados en Dinámica EGO, que proporciona herramientas de análisis, tratamiento y visualización de coberturas que permitan estandarizar y normalizar el trabajo desarrollado con base a datos históricos de manera análoga de cómo se realizan los modelos de evaluación de coberturas. Para dar inicio a la simulación de patrones y escenarios de predicción al año 2032 como soporte de sistema de información geográfica clave para la evaluación y mitigación de zonas de riesgo geológico, biológico y ecológico con base a una estructura de fases necesarias sujetas a un rango de flexibilidad y precisión que son consecuentes y lleven un orden cronológico que le den solución al problema, como se muestra en la Figura 4, que presenta las fases empleadas para el desarrollo del proyecto.

Figure 4. Fases de la investigación.



Nota. Diagrama de flujo de investigación Mixta- Fuente: Autores

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

A continuación, se expone la estructuración detallada de las actividades realizadas en función de los objetivos planteados. Cada sección aborda los elementos clave, desde la identificación y recopilación de información relevante, pasando por el procesamiento y análisis de datos geoespaciales, hasta la aplicación del modelo de simulación Dinámica EGO para la generación de escenarios futuros del territorio. Este orden lógico permite evidenciar el proceso metodológico integral que sustenta la investigación y asegura la coherencia y rigurosidad en el cumplimiento de las metas propuestas.

4.1. Identificar información clave

4.1.1. Revisión bibliográfica: Es un proceso crítico en el cual se recupera información publicada sobre un tema en específico, con el objetivo de identificar el estado actual del conocimiento, metodología y hallazgos en el área de estudio. Esta actividad es empleada para comprender los escenarios futuros con Dinámica EGO se realizó una amplia revisión bibliográfica de publicaciones recientes, destacando la inteligencia artificial, el Big Data y como los sensores remotos han revolucionado el monitoreo y modelado del cambio en cobertura terrestre, permitiendo análisis más precisos de factores como la deforestación y la expansión agrícola. Hay especial énfasis en el uso de autómatas celulares para modelar patrones complejos en regiones montañosas como el municipio de Tona y se reconoció la importancia de integrar datos socioeconómicos y ambientales para optimizar las predicciones.

4.1.2. Descarga de bases de datos: Es el proceso de construcción de los escenarios futuros inició recolectando y estandarizando insumos cartográficos y temáticos procedentes de fuentes oficiales colombianas como el Sistema de Información

Ambiental de Colombia (SIAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Las variables que se recopilaron son las siguientes:

- Coberturas de la tierra (años 2002, 2009, 2012, 2018)
- Capas temáticas: pendientes, fuentes hídricas, centros poblados y uso del suelo.

Estas coberturas de tierra en formato CORINE Land Cover (CLC), nivel 3, a escala 1:100.000, son adecuadas para el análisis regional. (Para este proyecto no se tuvieron en cuenta las coberturas de nivel 4 y 5, dado que no se encontraban en la zona). Además de estas coberturas temporales se incorporaron variables estáticas como pendiente (derivada del modelo de elevación), centros poblados y uso del suelo actual, los cuales brindan un contexto geográfico fijo. Como complemento se descargaron bases de datos geoespaciales que capturan variables dinámicas como precipitación y temperatura, cruciales para entender las dinámicas socioeconómicas y su impacto en municipio de Tona.

4.1.3. Procesamiento de la información: Es un conjunto de operaciones técnicas y metodológicas destinadas a preparar y transformar datos espaciales para su análisis y modelación. El procesamiento en ArcMap fue un paso fundamental para preparar la información geográfica que alimenta el modelo de simulación, utilizando una serie de herramientas geoespaciales como técnicas de clasificación supervisada que garantizan la compatibilidad de la información con el entorno de Dinámica EGO, las capas de información fueron estandarizadas y convertidas a formato ráster para su posterior uso en el modelo. Inicialmente el modelo fue configurado con un tamaño de píxel de 1 metro, lo que ofrecía un nivel de detalle alto, pero generaba tiempos de procesamiento excesivos debido a la alta

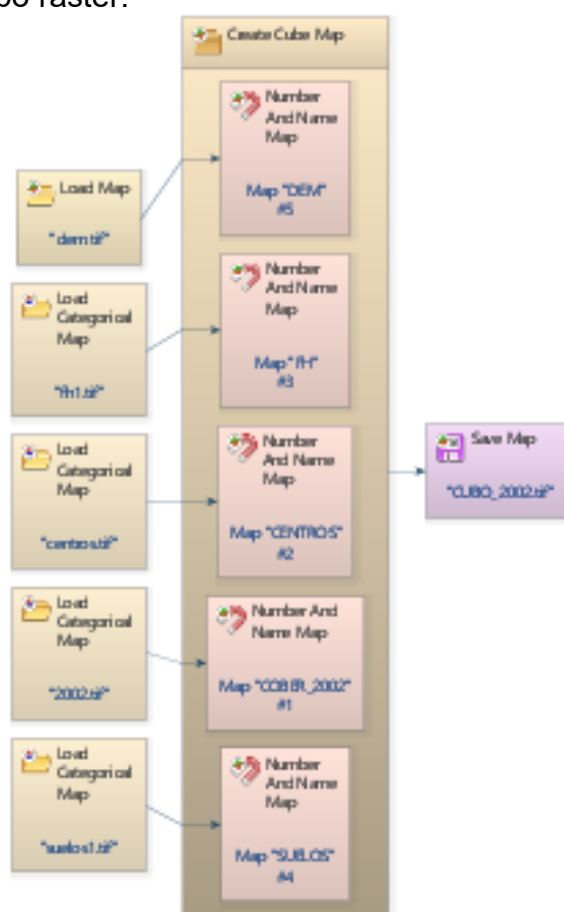
resolución espacial. Se evaluó técnicamente y se ajustó el tamaño de celda a 10 metros, mejorando significativamente la eficacia del procesamiento sin comprometer la representatividad espacial, dado el tamaño del área de estudio y la escala de los datos disponibles. Esta decisión se fundamentó en las recomendaciones de la Resolución 197 de 2022 del IGAC, la cual orienta la escala y resolución apropiada para trabajos de planificación y análisis territorial.

4.1.4. Análisis de las tendencias de cambio del territorio: Es el estudio sistemático y continuo de las transformaciones que ocurren en el espacio geográfico a lo largo del tiempo, utilizando herramientas y técnicas que permiten identificar patrones, dinámicas y procesos de evolución espacial y temporal. Este análisis integra múltiples fuentes de información y distintos formatos de datos como mapas, tablas y matrices. Dinámica EGO como herramienta central se presenta como un entorno para el geoprocésamiento de objetos, diseñada específicamente para el modelado ambiental opera como una combinación algebraica de datos en varios formatos como mapas, tablas, matrices y procesos de decisión, utiliza una serie de algoritmos o funciones para el análisis y simulación de fenómenos espacio-temporales.

4.1.5. Preparación de datos (Cubo Ráster): El cubo ráster es una estructura de datos geoespaciales que permite almacenar y organizar múltiples variables espacialmente explícitas en un único archivo estructurado, facilitando su manejo y análisis conjunto en procesos de modelado territorial. Se emplea como base de datos para el modelado, el cubo ráster almacenó valores de múltiples variables espacialmente explícitas las cuales influyeron en el proceso de estudio, el cubo permitió centralizar y organizar todas las variables geográficas de entrada en un único archivo estructurado, todos los datos estaban en formato ráster con la misma proyección y sistema de coordenadas, el mismo número de filas y

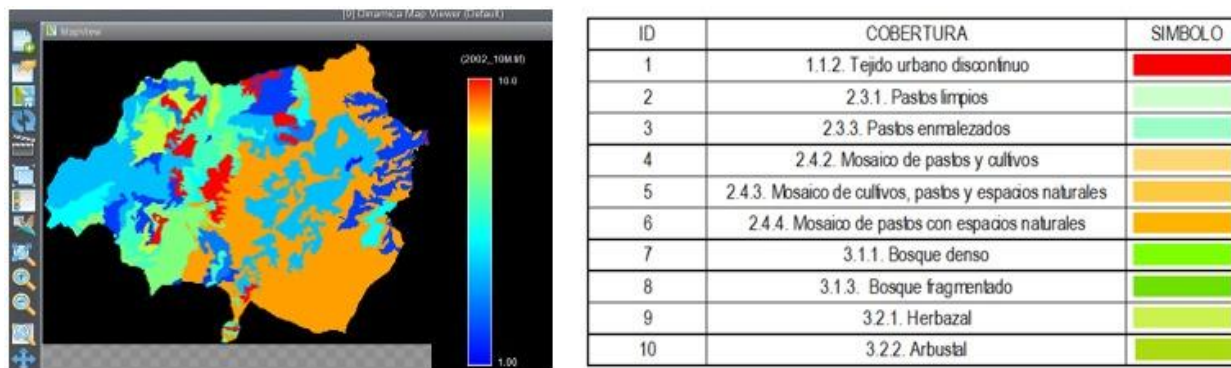
columnas y las categorías correctamente identificadas; lo que facilitó las etapas posteriores del modelado al presentar datos de manera coherente y accesible, ayudó a detectar patrones de cambio, alimentó las matrices de transición y entrenó al modelo, garantizando la calidad y precisión de las simulaciones y proyecciones de los escenarios futuros.

Figure 5. Preparación cubo ráster.



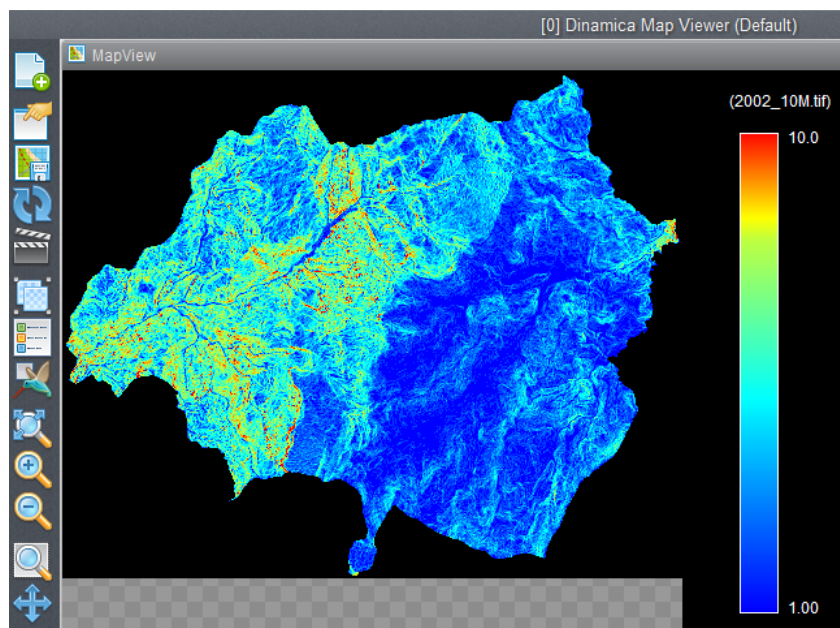
Nota. Librería del software para la preparación de datos del modelado -
Fuente: Autores

Figure 6. Construcción cubo ráster



Nota. Mapa de calor de cobertura del modelado del cubo - Fuente: Autores

Figure 7. Resultado cubo ráster.



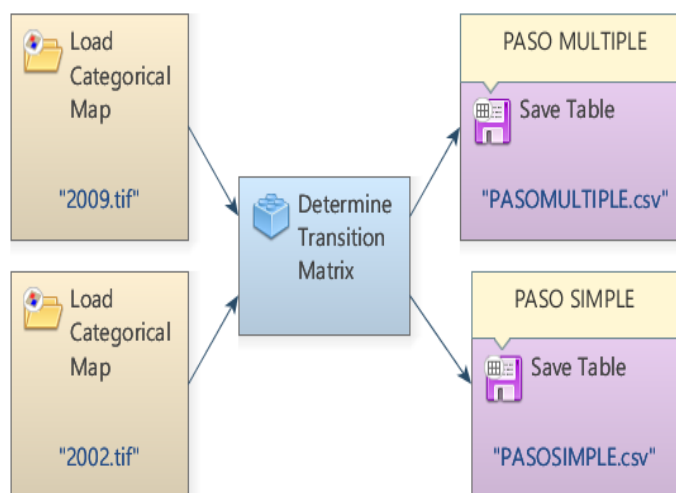
Nota. Resultado de altimetría modelado presentando la verticalidad del terreno en mapa de calor - Fuente: Autores

4.2. Construcción del modelo

4.2.1 Matriz de transición: Es una herramienta esencial en el modelamiento territorial que permite cuantificar la magnitud y dirección de los cambios en el uso y cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Esta matriz representa las probabilidades o tasas de transformación de una categoría de uso del suelo hacia otra, y es fundamental para alimentar los algoritmos que asignan dichos cambios durante la simulación de escenarios futuros. Se desarrolló como un elemento fundamental para entender la magnitud y dirección de los cambios de uso y coberturas de tierra, esta información fue esencial para alimentar el algoritmo de asignación de cambios y sus tasas de transformación en la fase de simulación de escenarios futuros. Con base en los cambios observados en el cubo ráster se definió la matriz

de transición, se excluyeron aquellas categorías con cambios irrelevantes mejorando la eficiencia del modelo.

Figure 8. Definición de la matriz de transición.



Nota. Librería del software para determinar los usos de suelos - Fuente:

Autores

En la Tabla 1 se presentan la proporción de cambios que tuvo cada categoría respecto a la superficie original de esa categoría en el tiempo inicial (T1), las filas representan la categoría del mapa de cobertura en el tiempo T1, las columnas representan las categorías del mapa de cobertura en el tiempo final (T2), los valores internos son la proporción de transición ocurrida entre las categorías, la diagonal principal muestra la proporción de persistencias o áreas que no cambiaron de categoría:

Table 1. Matrices de transición.

Cells per transition:		2018										
	Frpm/To		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2002	1		XXXX	65	--	2924	--	--	22	--	--	--
	2		--	XXXX	8006	64637	14121	37617	882	8483	37964	4976
	3		--	28642	XXXX	4485	1175	6697	3155	25902	9198	12122
	4		166	198471	14334	XXXX	65956	80999	1434	44049	49647	926
	5		--	12248	3478	17510	XXXX	17160	1436	21056	14943	439
	6		479	64592	35535	10658	25350	XXXX	17442	62959	2326	4209
	7		--	1257	2149	--	299	5450	XXXX	49688	1525	8764
	8		--	3850	5122	269	--	10434	55689	XXXX	--	--
	9		1393	97302	5715	169623	4216	40573	2619	20796	XXXX	56003
	10		--	11391	7631	4396	1565	22489	15911	59260	11390	XXXX

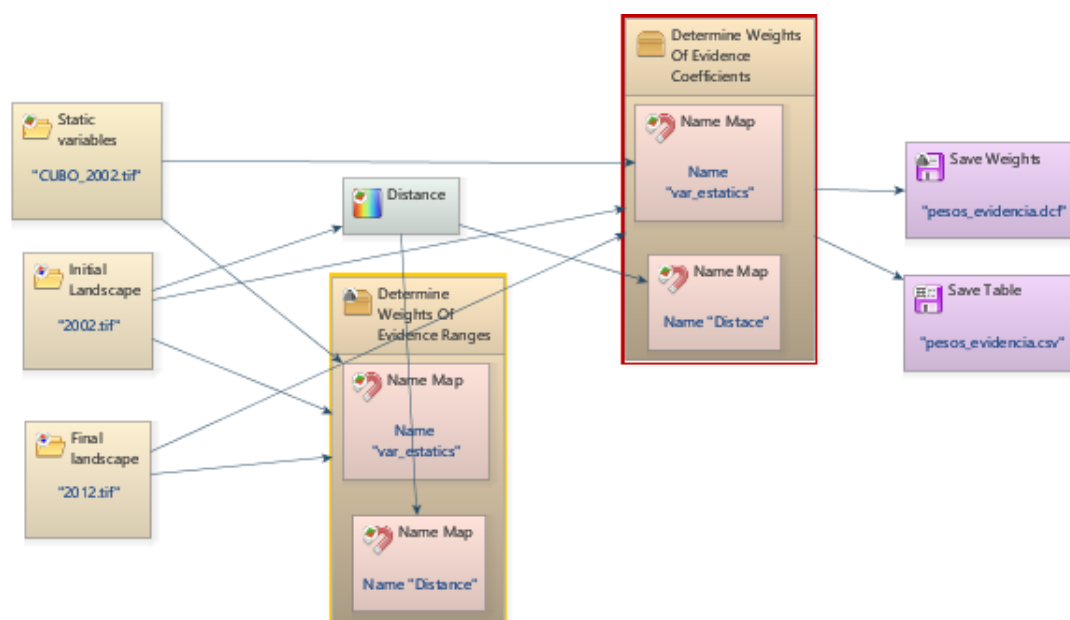
Nota. Determinación de la cobertura con células por transición con respecto al tiempo - Fuente: Autores

4.2.2 Pesos de evidencia: Constituyen un método estadístico fundamental empleado por la plataforma Dinámica GEO para generar proyecciones espaciales precisas del cambio en la cobertura del suelo. Las matrices de transición permiten proyecciones analíticas a largo plazo, pero no permiten conocer donde se producen esos cambios, los pesos de evidencia como método estadístico fundamental que usa Dinámica EGO para la generación de proyecciones espaciales de cambio de cobertura de tierra, determinaron dónde y cuales cambios se produjeron, con los controles de localización y basado en los mapas de susceptibilidad al cambio que se crearon a partir de todas las variables incluidas en el cubo ráster, se calcularon pesos de evidencia para cada transición usando variables estáticas como: proximidad a centros poblados, pendientes y uso del suelo. Estos pesos reflejaron la influencia de cada una de las variables en la probabilidad de cambio de una clase de cobertura a otra y se interpretan así:

- Positivos (+WOE): Alta presencia de eventos de cambio indicó que, la categoría favorece la transición.

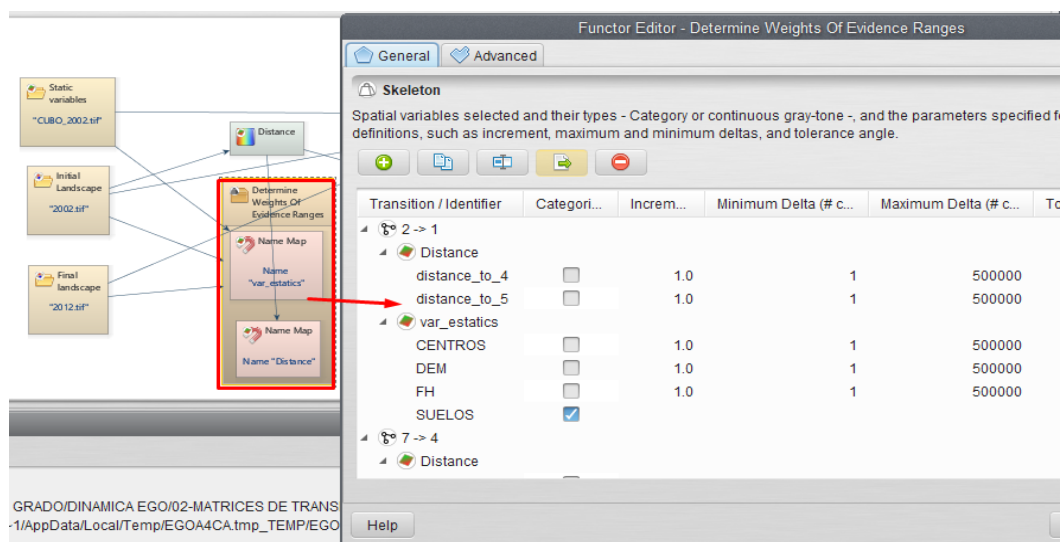
- Negativos (-WOE): Baja presencia de eventos de cambio indicó que, la categoría inhibe la transición.
- Cercanos a Cero (≈ 0 WOE): La categoría no tiene un efecto aparente en el cambio.

Figure 9. Variables explicativas.



Nota. identificación de variables con comportamiento lineal o propio al uso del suelo que no sufren modificaciones con respecto al tiempo - Fuente: Autores

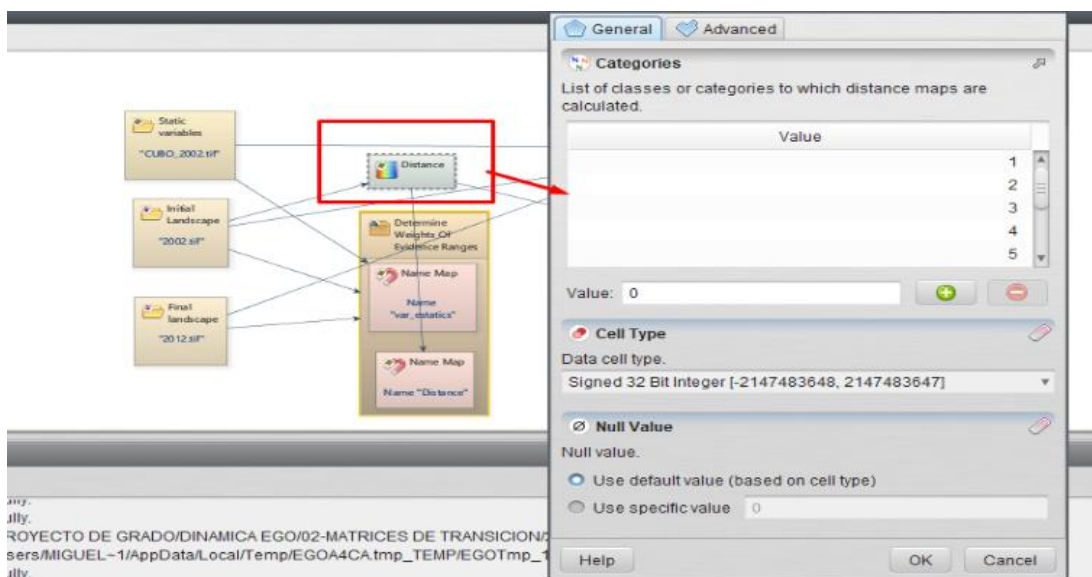
Figure 10. Identificación de transiciones relevante



Nota. Cálculo de variables fuertes dentro del marco de cambios en el uso de suelo -

Fuente: Autores

Figure 11. Calculo pesos de evidencia



Nota. Evaluación correlativa de variables con respecto al uso del suelo - Fuente:

Autores

4.2.3 Correlación de pesos de evidencia: Es un proceso estadístico clave en el modelado territorial mediante Dinámica EGO, que evalúa la independencia entre las variables explicativas que influyen en la probabilidad de transición de uso y cobertura del suelo. Este análisis se realiza para evitar la redundancia, pues las variables correlacionadas pueden distorsionar la simulación. Se estimó la probabilidad de transición para cada pixel basándose en el conjunto de variables explicativas del cubo ráster, el comportamiento entre pares de variables no debe estar correlacionado, en esta fase se evaluó la correlación entre todas las posibles combinaciones de pares de variables para cada transición definida, si hubo variables correlacionadas se tuvo que elegir una y se descartó la otra. Se utilizó el Índice de Cramer V, medida estadística que evaluó la fuerza de asociación entre variables categóricas. Se aplicaron los siguientes criterios:

- Valores de Cramer V < 0.5 : Aceptables, sin correlación significativa.
- Valores entre 0.5 a 0.7: Correlación moderada, requiere revisión.
- Valores > 0.7 : Alta correlación, se considera exclusión de una variable para evitar sesgo.

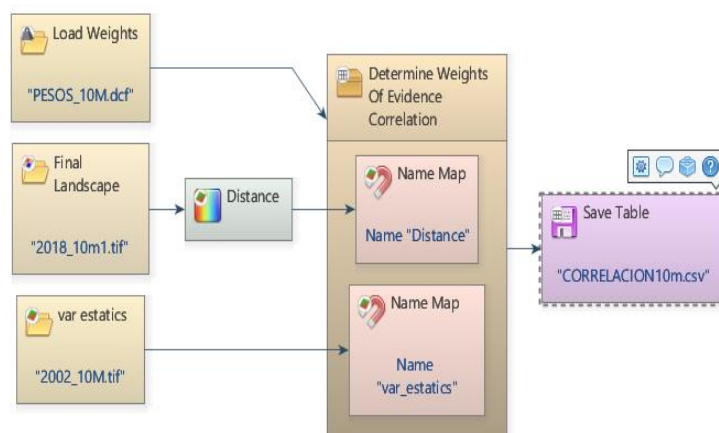
Como resultado se observó que la mayoría de las variables presentaron índice de Cramer V < 0.5 siendo conservadas en el modelo, en los pocos casos donde los valores estaban entre 0.5 y 0.7 se evaluó la importancia individual de la variable en el comportamiento espacial de la cobertura y se ajustaron los pesos manualmente, no se identificaron variables con Cramer V > 0.7 que obligaran a eliminar una variable.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

Figure 12. Cálculo de correlación.



Nota. análisis de resultado de la correlación valorando el índice de Cramer - Fuente:
Autores

Figure 13. Análisis matriz de correlación.

Table [String] *	Chi_2 [Real]	Cramer [Real]	Contingency [Real]
tance_to_5	224405.5766003	0.0236411902047406	0.252653725551008
tance_to_6	140119.287047621	0.0212822461784752	0.202081971462868
tance_to_7	465217.473463866	0.265855372561085	0.351924470079457
CENTROS	0	0	0
DEM	431821.529610111	0.137134148924776	0.341067556078301
FH	162.800877232619	0.00497338413568578	0.0070332533337488
SUELOS	894611.27666043	0.213230404273208	0.462960694457265
tance_to_6	629329.147155509	0.0451032073526777	0.400658730871469
tance_to_7	46849.7275183088	0.0843666814819635	0.118472230848148
CENTROS	0	0	0
DEM	547347.950490552	0.154392151035613	0.378150893431691
FH	107.144522922423	0.00403467560153603	0.00570580007374585
SUELOS	1076776.22839177	0.233934715874383	0.497179940837292
tance_to_7	55043.4574976575	0.0914471731523352	0.128257714012667
CENTROS	0	0	0
DEM	327249.5662034	0.119380394472696	0.301184573811272
FH	1640.58524759261	0.0157878515926835	0.0223218306803617
SUELOS	281652.994073279	0.119643506378721	0.281236936334689
CENTROS	0	0	0

Nota. Determinación de los resultados de la matriz de transición - Fuente:

Autores

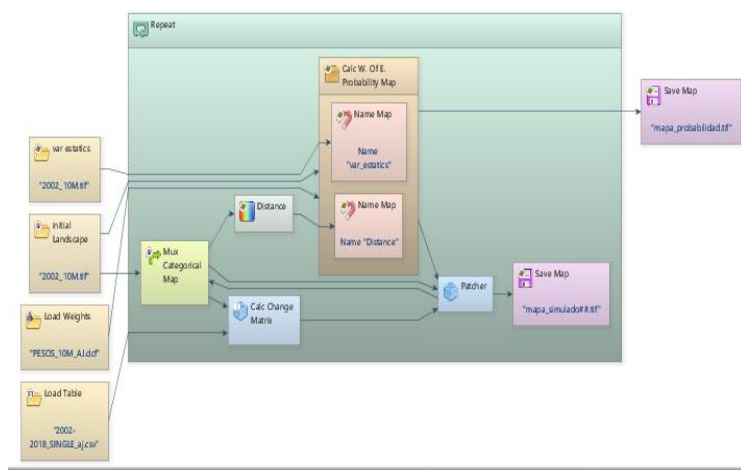
ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR: Sistema
Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

4.2.4 Calibración del modelo de simulación: Consiste en el ajuste sistemático de los parámetros del modelo para generar con mayor precisión los cambios históricos en la cobertura del suelo. Es esencial para poder garantizar la validez de las proyecciones futuras generadas por el modelo. Se ajustaron los parámetros del modelo para que su comportamiento simulara de la manera más precisa los posible los cambios las coberturas que han ocurrido históricamente, este paso aseguró la fiabilidad de proyecciones futuras. Los Autómatas Celulares (CA) fueron el motor que permitió que las coberturas se distribuyeran espacialmente de una forma realista, utilizando el algoritmo Patcher, el cual buscó generar agrupaciones de celdas que cambian juntas, asignó cambios basados en las probabilidades de los pesos de evidencia y las cantidades de cambio de las matrices de transición.

Figure 14. Calibración modelo de simulación.



Nota. Generador del modelo calibrado según probabilidad de pesos y cambio

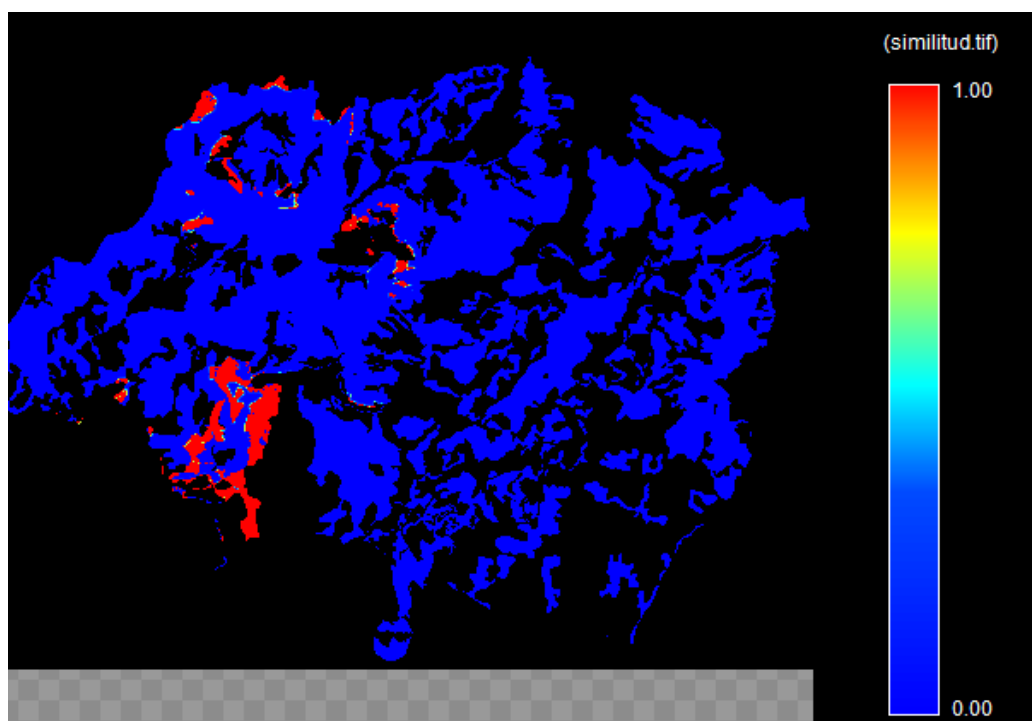
de en la matriz - Fuente: Autores

4.2.5 Validación y ajuste del modelo: Es un proceso fundamental en el desarrollo de modelos de simulación que consiste en verificar y mejorar la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de sus resultados con datos reales conocidos de un periodo específico. Consecuentemente, en esta etapa se evalúa la precisión con la que el modelo reproduce cambios históricos, lo que brinda confianza en su capacidad para proyectar futuros escenarios. Este proceso permitió verificar la capacidad predictiva del modelo utilizando un periodo de tiempo para el cual se tiene datos reales (2012-2018) y así dar confianza en que el modelo puede pronosticar cambios en el futuro. La simulación proyectó los cambios de cobertura de tierra desde el 2012 al 2018 y el resultado fue un mapa simulado a 2018, posteriormente se compara con el mapa real del 2018, esta técnica de análisis espacial permitió visualizar donde el modelo acertó y donde hubo errores, al calcular el índice de eficacia del modelo el resultado fue un 90%, indicando que el modelo fue extremadamente preciso tanto en la ubicación como en la cantidad de los cambios de coberturas. El éxito de Patcher fue evidente, permitió identificar claramente zonas de expansión urbana, crecimiento de pastos limpios y pérdida progresiva de coberturas naturales con distribución espacial coherente, esto valida que el algoritmo Autómata celular capturó adecuadamente los patrones espaciales de los cambios reales en Tona.

4.2.6 Regionalización: Es un proceso metodológico mediante el cual se divide un territorio en subáreas o regiones homogéneas que reflejan la diversidad espacial de los procesos de cambio. También permite que las reglas de transición y los parámetros del modelo varíen según las características específicas de cada subárea, reconociendo que fenómenos como la deforestación o la expansión urbana no se manifiestan de manera uniforme en todas las zonas. Se optimizó el modelo que reconoce la diversidad espacial de los procesos de cambio dentro del

municipio de Tona, implicando que las reglas de transición pueden variar en las diferentes sub-áreas del territorio; es decir, no todos los procesos de deforestación o expansión urbana ocurren de la misma manera en un valle o en una zona de alta montaña o cerca la cabecera municipal. A pesar de que el modelo mostró una eficacia del 90% podrían existir pequeñas áreas con errores sistemáticos a corregir.

Figure 15. Plano de Regionalización según resultados.



Nota. *Proyección de optimización de la diversidad espacial según los resultados del estudio - Fuente: Autores.*

4.3. Simulación de cambios: Es un proceso computacional que reproduce y proyecta la dinámica espacial y temporal de las transformaciones en el uso y cobertura del suelo. Este proceso hace uso de modelos matemáticos y estadísticos para replicar

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

patrones históricos de cambio y así generar futuros escenarios, logrando anticipar cómo se distribuirán y evolucionarán las coberturas terrestres bajo distintas condiciones y políticas. También facilita la evaluación del impacto potencial de intervenciones en el territorio, ofreciendo una herramienta importante para la planificación territorial, la gestión ambiental y la toma de decisiones que resulten estratégicas. Esta fase final tradujo todo el trabajo previo, con el modelo ya validado se realizó la proyección de cambio de cobertura para el año 2032, permitiendo visualizar escenarios futuros y a partir de ellos generar recomendaciones estratégicas para el municipio de Tona. El detalle de los resultados de esta fase se muestra en el siguiente capítulo.

5. RESULTADOS

A partir de la metodología antes propuesta, se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo de simulación desarrollado con el software Dinámica EGO para analizar los cambios en la cobertura de la tierra en el municipio de Tona. Tras una rigurosa etapa de recolección, procesamiento y análisis de datos geoespaciales, así como la calibración y validación del modelo, se generaron distintos escenarios que permiten visualizar la evolución territorial proyectada al año 2032. A través de un enfoque multitemporal y la implementación de variables biofísicas y socioeconómicas, se logró identificar las dinámicas espaciales más significativas presentes en el territorio como la expansión urbana, la pérdida de coberturas naturales y el crecimiento de áreas agrícolas y restauración ecológica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación, se describen los escenarios evaluados, y analiza los patrones proyectados en cuanto al cambio de las coberturas a futuro.

5.1. Identificación de información inicial: Para analizar de una manera eficiente la información recolectada es de suma importancia identificar los cambios que han presentado las coberturas de la tierra a lo largo del tiempo, como el tejido urbano discontinuo, los pastos limpios, la cantidad de bosques secos, entre otros. De esta manera en la tabla 2. Se presentan las distintas fuentes de información de las cuales fueron recolectados los datos para su respectiva interpretación, simulación y proyección.

Table 2. Fuentes de información utilizadas para la elaboración del modelo.

Capa	Fuente	Escala
Cobertura_tierra_2002	http://www.siac.gov.co/coberturas-de-la-tierra1	1:100000
Cobertura_tierra_2009	http://www.siac.gov.co/coberturas-de-la-tierra2	1:100000
Cobertura_tierra_2012	http://www.siac.gov.co/coberturas-de-la-tierra3	1:100000
Cobertura_tierra_2018	http://www.siac.gov.co/coberturas-de-la-tierra4	1:100000
DEM	https://search.asf.alaska.edu/#/	1:100000

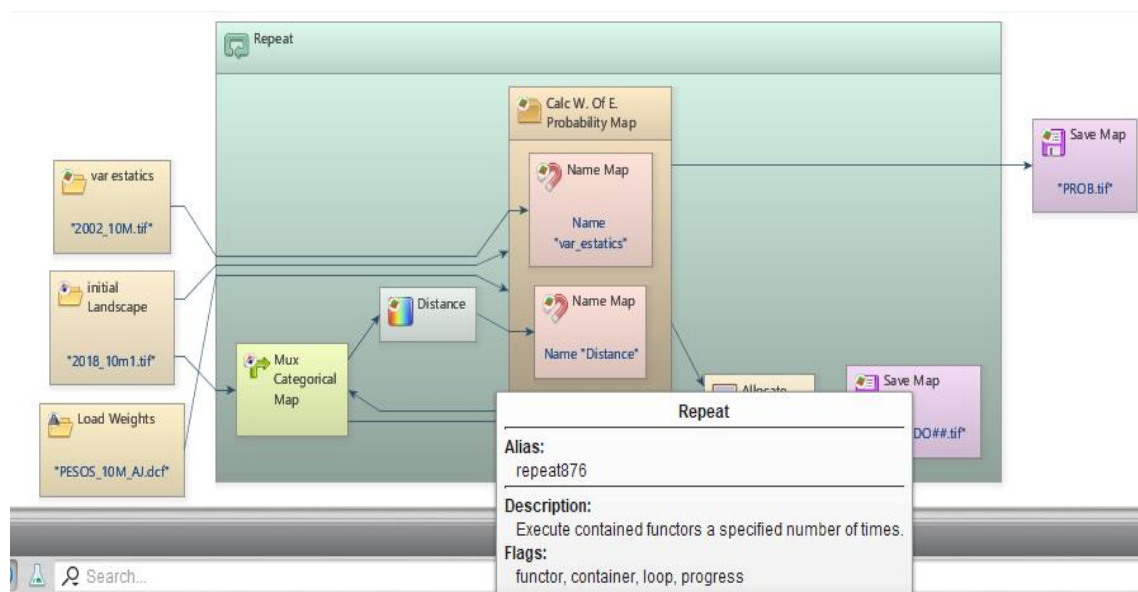
CENTROS POBLADOS	https://geoportal.igac.gov.co/datos-abiertos-igac	1:100000
USO ACTUAL SUELO	https://geoportal.igac.gov.co/datos-abiertos-igac	1:100000

Nota. *Tabla de coberturas de suelo en el municipio de Tona en la base de datos del estado colombiano - Fuente: Autores*

- 5.2. Definición de cambios:** Esta fase definió tres momentos de simulación que son clave para la comprensión del proyecto en cuanto a la variabilidad de las coberturas. En el primer momento se ejecutó el modelo que fue calibrado y validado previamente. En el segundo momento se simuló un escenario de crecimiento forestal, asumiendo una política que comprende un componente ambiental el cual busca la recuperación de los bosques del municipio, estableciendo un porcentaje de crecimiento del 46%. En un tercer momento se simuló un escenario de expansión agrícola, asumiendo una rigurosa política de desarrollo agrario del municipio, en la cual se ajustaron dos variables: mosaico de pastos con cultivos, y mosaico de cultivos con pastos naturales. Para cada una de estas variables se estableció un porcentaje de crecimiento del 28%.
- 5.3. Generación de escenarios futuros:** El modelo validado se utilizó para proyectar escenarios de tendencia histórica, evaluando cómo evolucionará el municipio de Tona en el caso de que las dinámicas de cambio observadas en el pasado siguieran el mismo comportamiento en ocasiones futuras, como resultado se obtuvo un mapa que visualiza la configuración espacial de las coberturas. En el proyecto se identificaron las posibles áreas con mayor probabilidad de transformación, expansión urbana, pérdida de coberturas naturales y ganancia de vegetación secundaria de igual forma se desarrollaron tres escenarios

prospectivos con base en diferentes supuestos de cambio, los cuales permiten anticipar posibles impactos ambientales y territoriales:

Figure 16. Simulación a largo plazo.



Nota. Simulación en software del uso de suelo proyectado a 2032 - Fuente: Autores

Table 3. Escenarios futuros proyectados.

Escenario	Supuesto principal	Objetivo del análisis
1. Tendencia actual	Continuación del patrón observado entre 2012–2018	Validar comportamiento inercial
2. Aumento de bosque	Restauración ecológica, políticas de conservación	Analizar beneficios ecológicos

3. Aumento de cultivos	Expansión agrícola y ganadera sin restricciones	Evaluar impactos en recursos naturales
------------------------	---	--

Nota. *proyección de beneficios al suelo del municipio según la intervención propuesta por la investigación - Fuente: Autores*

5.4. Análisis de los resultados de la simulación: Con el modelo ya calibrado se generó el mapa para el año 2032, esta simulación se basó en la tendencia histórica y la influencia de variables espaciales, se identificó información clave sobre las dinámicas espaciales y cuantitativas que se esperan para el municipio de Tona, localizando las áreas con mayor probabilidad de transformación como la expansión urbana, la pérdida de coberturas naturales y la ganancia de vegetación secundaria.

Se promedia la tasa entre:

- 2002–2009 (7 años)
- 2009–2012 (3 años)
- 2012–2018 (6 años)

En la Figura 17 se presenta el resultado de la simulación para el mapa que representa la proyección de cambio de cobertura de la tierra al año 2032.

5.5. Simulación futura al año 2032

En el contexto del análisis de las zonas de restauración ecológica y el cuidado de las zonas verdes, el propósito principal de este escenario es satisfacer las necesidades de fuentes de agua y proteger ecosistemas sensibles al cambio climático, como los bosques

altoandinos, zonas de transición y páramos. Esto contribuye al cumplimiento de la normativa ambiental, impulsando la reforestación y la generación de bosques densos.

La simulación realizada, basada en una proyección lineal de 14 años (de 2018 a 2032), muestra un incremento en la restauración ecológica con un crecimiento anual aproximado del 3%. Este aumento de la cobertura vegetal contribuye a reducir la degradación de pastos limpios y mosaicos agrícolas, aunque con una disminución gradual en estos últimos.

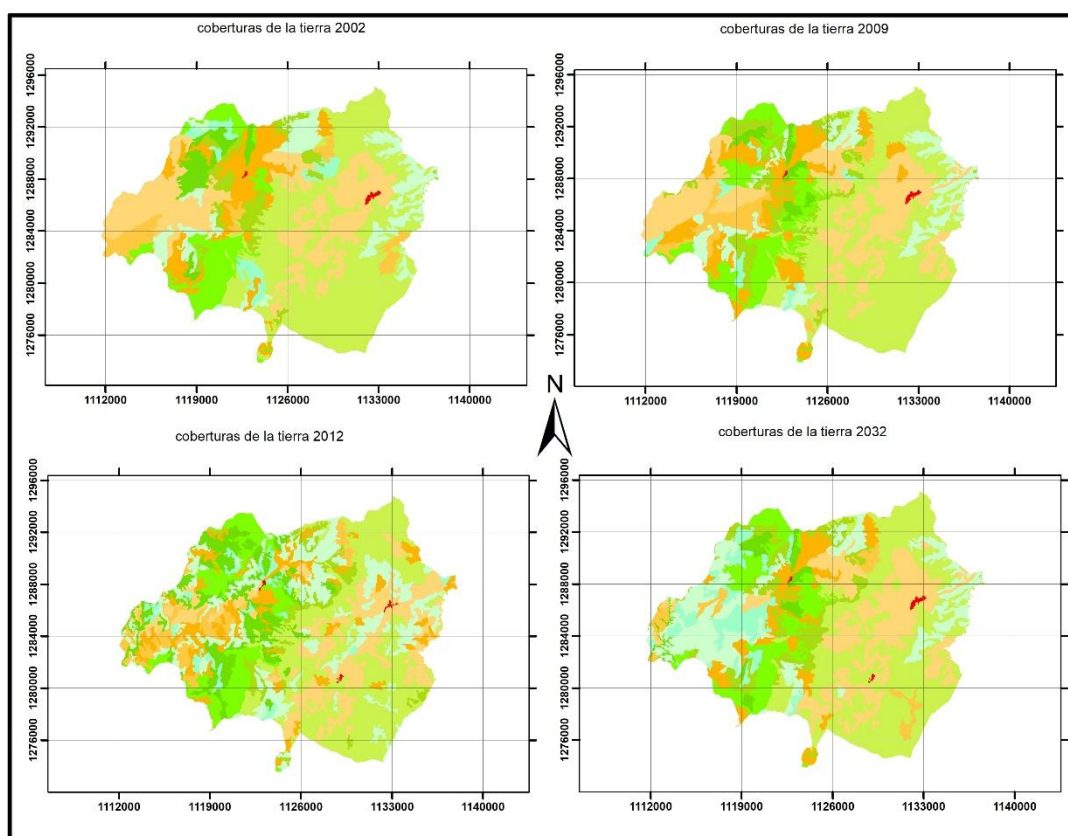
Para garantizar el éxito de esta restauración ecológica, es esencial el seguimiento y cumplimiento de políticas públicas activas en conservación, especialmente aquellas que priorizan las fuentes de recursos hídricos y los ecosistemas más vulnerables a los efectos del cambio climático. Estas políticas deben atender no solo los cambios climáticos, sino también los gases de efecto invernadero generados por otros factores presentes en el área de estudio.

La simulación de la dinámica ecológica, realizada a través de la metodología de seguimiento, indica que para 2032 las zonas de restauración ecológica continuarán creciendo de manera lineal, alcanzando un incremento del 46% en áreas con mayor vegetación. En contraposición, las zonas de pastos y mosaicos agrícolas disminuirán a una tasa anual promedio del 3.9%. Este escenario resalta la importancia de las zonas de restauración ecológica, mientras que otras áreas de interés experimentan una reducción negativa respecto a la situación actual y a los datos base de la zona.

Dentro del análisis de los cambios en la restauración ecológica y las políticas de conservación, se observa que el bosque altoandino denso incrementa en un 2.5% anual hasta 2032. Paralelamente, las zonas de pastos y mosaicos agrícolas disminuyen

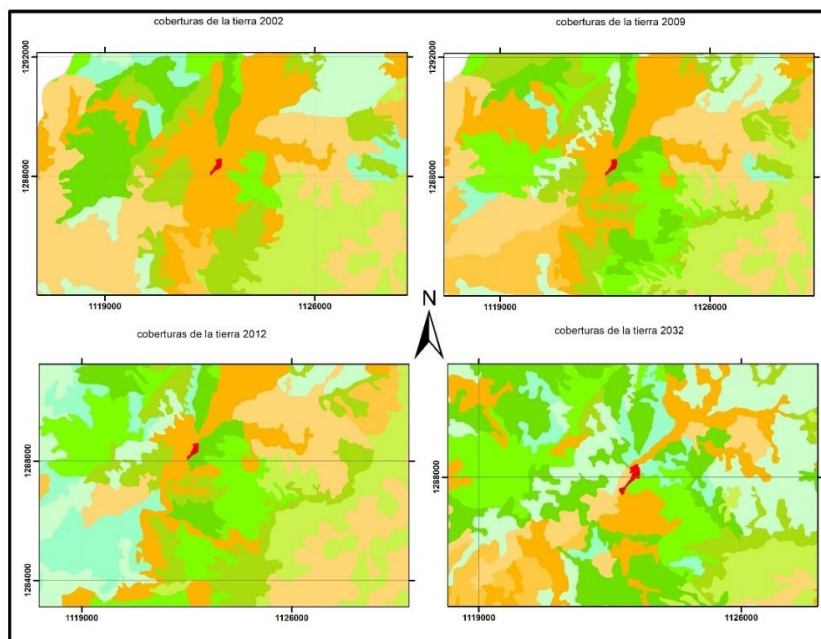
significativamente, con una reducción acumulada del 27%. A nivel individual, cada tipo de cobertura disminuye de forma lineal a una tasa promedio anual del 3.9%.

Figure 17. Zonas de cobertura de buen uso de suelo proyectado al año 2032.



Nota. Mapa de cobertura de suelo con la intervención propuesta según el desarrollo de la investigación a 2032 - Fuente: Autores

Figure 18. Mapa topográfico proyectado a las Zonas de mayor afectación.



Nota. Mapa topográfico 2Dn proyectado las zonas de mayor afectación - Fuente: Autores

Table 4. Simbología leyenda de proyección de las Zonas de Cobertura.

ID	COBERTURA	SÍMBOLO
1	1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
2	2.3.1. Pastos limpios	
3	2.3.3. Pastos enmalezados	
4	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	
5	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	
6	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	
7	3.1.1. Bosque denso	
8	3.1.3. Bosque fragmentado	
9	3.2.1. Herbazal	
10	3.2.2. Arbustal	

Nota. Zonas de delimitación de cobertura de colores para representación de zonas con mayor afectación dentro del mapa de uso de suelo del municipio de Tona - Fuente: Autores.

En la Tabla 5 se presenta la tasa de crecimiento promedio para las transformaciones evidenciadas en el mapa de la simulación al año 2032.

Table 5. Tasas cambio de cobertura a 2032.

LEYENDA	AREA 2018 (HA)	AREA 2032 (HA)	PORCENTAJE (%)
1.1.2 Tejido urbano discontinuo	46,744	57,235	22,4
2.3.1 Pastos limpios	5,663,893	5,126,787	-9,5
2.3.3 Pastos enmalezados	882,139	1,979,965	124,5
2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos	5,466,896	6221,14	13,8
2.4.3 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1,566,957	912,145	-41,8
2.4.4 Mosaico de pastos con espacios naturales	2,938,871	2,263,549	-23
3.1.1 Bosque denso	2,751,464	2,998,146	9
3.1.3 Bosque fragmentado	3,329,006	914,193	-72,5
3.2.1 Herbazal	9,258,778	10,146,066	9,6
3.2.2 Arbustal	1,173,115	2459,32	109,6

Nota. Tabla de variabilidad de suelos por aprovechamiento medida en hectáreas según la propuesta de investigación. - Fuente: Autores

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada cobertura y su cambio según la tasa anual promedio:

1. Tejido urbano discontinuo presentó un crecimiento que refleja la presión antrópica ascendente.
2. Pastos limpios creció a un ritmo muy alto reflejando intensificación ganadera o expansión de la frontera agrícola.
3. Pastos enmalezados tuvo una expansión fuerte, indica posible abandono de tierras productivas o degradación de pastizales.

4. Mosaico pastos y cultivos presentaron reducción indicando una simplificación del paisaje hacia pastos limpio o un cambio hacia monocultivos.
5. Mosaico cultivos pastos naturales tuvo una ganancia moderada, puede representar zonas donde la mezcla de usos se mantiene o se expande lentamente.
6. Mosaico pastos naturales tuvo una reducción que sugiere presión sobre la zona de pastizal con elementos naturales que podrían convertirse en pastos limpios o sufrir degradación
7. Bosque denso tuvo una reducción indicando perdida continua de ecosistemas conllevando a graves implicaciones ecológicas como degradación, fragmentación o cambio de uso del suelo.
8. Bosque fragmentado tuvo la tasa más alta de expansión, que puede representar regeneración de áreas degradadas o avance de vegetación intermedia.
9. Herbazal presentó pérdida de ecosistemas de pastizales los cuales podrían ser reemplazados por pastos limpio o cultivos.
10. Arbustal tuvo una disminución muy fuerte que sugiere alta presión por la expansión agropecuaria o incendios.

5.6. Escenario 1: Restauración Ecológica y Políticas de Conservación

Este primer escenario plantea una política de conservación de bosques en el área de estudio. Para impulsar la reforestación y regeneración de bosques densos, se modificó la tasa de crecimiento anual de esta cobertura estableciendo un crecimiento del 46%, y teniendo como resultado el decrecimiento de pastos limpios y mosaicos agrícolas.

Para lograr esto, se establece una política de conservación activa, donde se desarrollan una restauración ecológica, protección de áreas naturales y reconversión de tierras degradadas. Así mismo, se impulsa la reforestación y regeneración natural asistida.

En la Tabla 6 se presenta el resultado obtenido de la simulación del modelo con proyección a 2032 para cada cobertura de la tierra en el Escenario 1: Restauración ecológica, políticas de conservación.

Table 6. Razón de cambio de zonas de cobertura de restauración ecológica.

ID	LEYENDA	AREA 2018 (HA)	AREA 2032 (HA)	PORCENTAJE (%)
1	1.1.2. Tejido urbano discontinuo	46,744	57,235	22,4
2	2.3.1. Pastos limpios	5663,893	4827,65	-14,8
3	2.3.3. Pastos enmalezados	882,139	773,36	-12,3
4	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5466,896	4737,55	-13,3
5	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1566,957	1197,81	-23,6
6	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	2938,871	2823,97	-3,9
7	3.1.1. Bosque denso	2751,464	4017,138	46,0
8	3.1.3. Bosque fragmentado	3329,006	7711,4	131,6
9	3.2.1. Herbazal	9258,778	5996,08	-35,2
10	3.2.2. Arbustal	1173,115	935,67	-20,2

Nota. Escenario de propuesta en restauración vegetal según aprovechamiento de suelos para el municipio de Tona - Fuente: Autores

Cambios obtenidos en la modelación del Escenario 1 Restauración ecológica, políticas de conservación.

- Bosque denso aumenta al 2.5 % anual hasta 2032.
- Disminuyen áreas de pastos limpios y mosaicos agrícolas.

Impactos del Escenario 1:

- Clima:
 - ✓ Mayor regulación del microclima local más sombra humedad y regulación térmica.
 - ✓ Reducción del efecto isla de calor

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

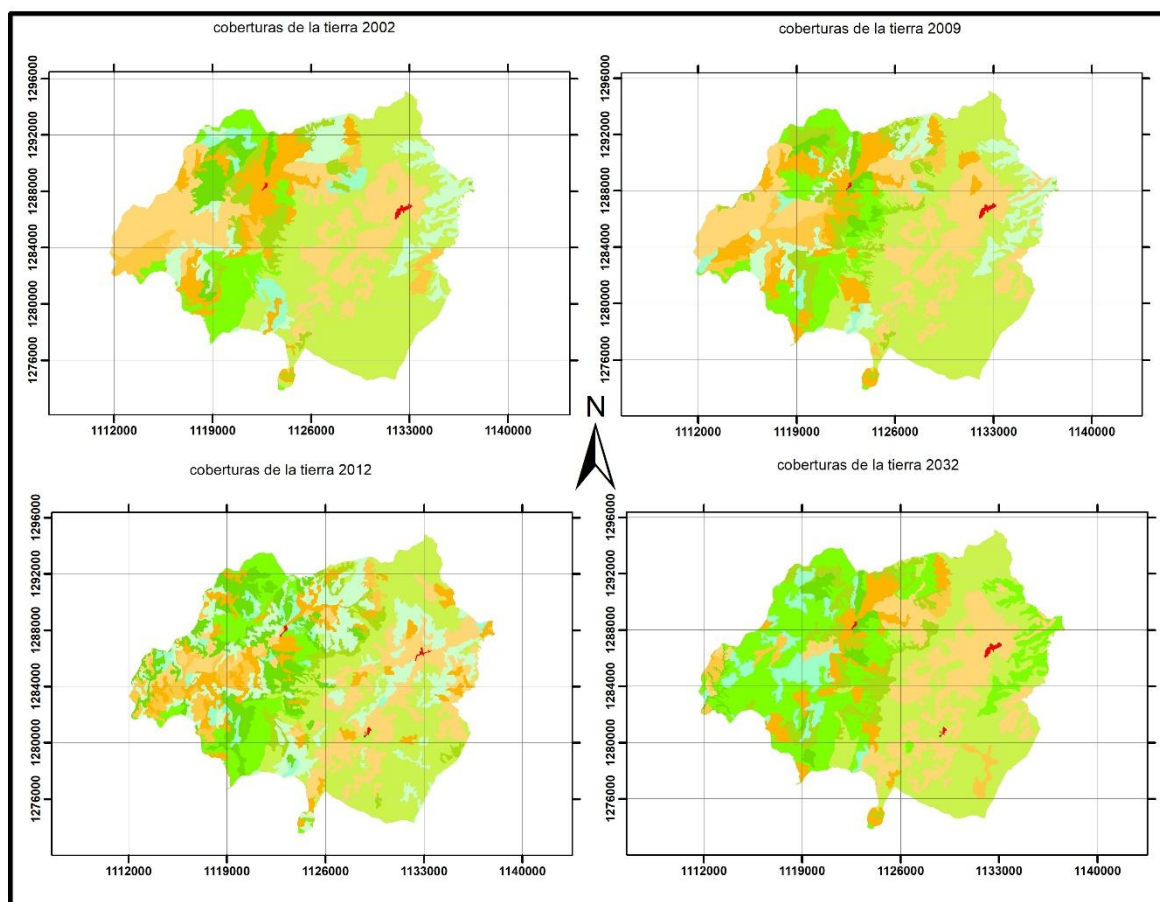
- ✓ Incremento de la captura de carbono y mitigación del cambio climático
- Fauna:
 - ✓ Mejores corredores biológicos y hábitats para especies sensibles.
 - ✓ Aumento en la población de mamíferos, aves y polinizadores.
 - ✓ Reducción del estrés ecológico para especies endémicas.
- Flora:
 - ✓ Recolonización de especies forestales nativas
 - ✓ Disminución de especies invasoras
 - ✓ Mayor diversidad de estratos vegetales (herbáceo, arbustivo y arbóreo)
- Riesgos o desafíos:
 - ✓ Requiere alto compromiso institucional y comunitario.
 - ✓ Puede presentarse resistencia de sectores productivos por restricción del uso del suelo.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

Figure 19. Simulación de zonas de Cobertura de restauración ecológica.



Nota. Mapa del Escenario1 desarrollando la propuesta del Escenario 1 en el municipio de Tona aplicando la conservación. - Fuente: Autores

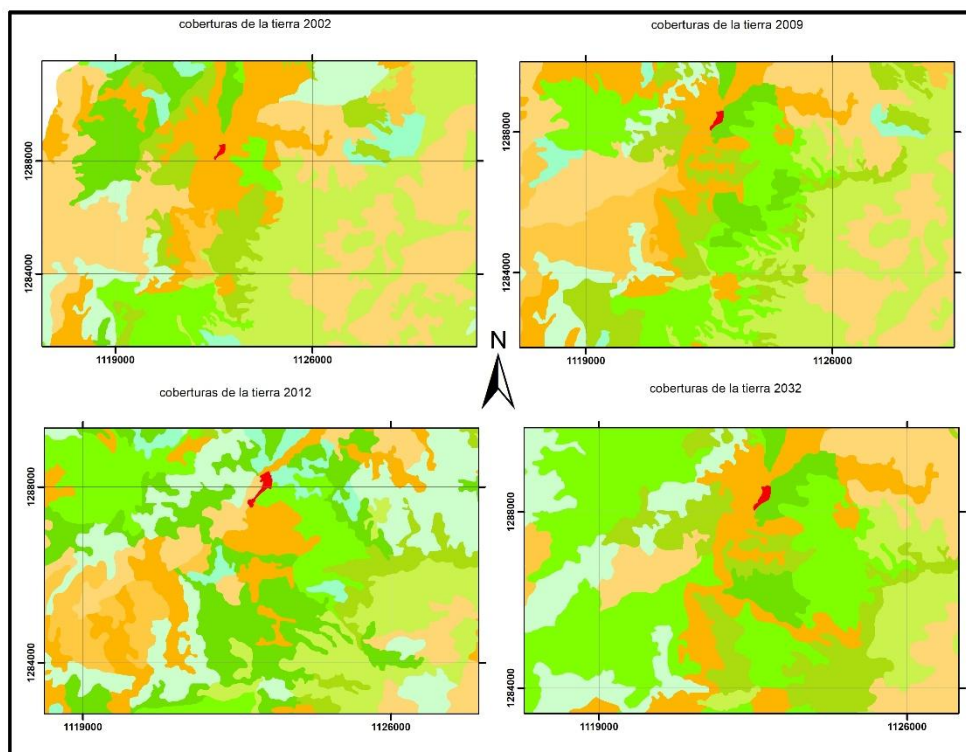
ELABORADO POR:
Docencia

REVISADO POR:
Integrado de Gestión

Sistema

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023

Figure 20. Mapa topográfico de análisis de cobertura conservación forestal.



Nota. Mapa de análisis de afectación en el municipio de Tona al aplicar el desarrollo del Escenario 1 - Fuente: Autores

Análisis de Biodiversidad

En cuanto a la biodiversidad, la climatología y el medio ambiente en este escenario, se observa que la reforestación de las zonas de restauración favorece la regulación de microclimas y ecosistemas de transición, mejorando las condiciones de humedad, regulación térmica y captura de carbono. Esto ayuda a mitigar los efectos de las olas de calor y los gases de efecto invernadero, mejorando la calidad del aire en las zonas más sensibles.

Además, la restauración de los ecosistemas, especialmente en las zonas de bosque altoandino, protege especies endémicas como el guatle, la mapora, los pinos y el corno africano, que son esenciales para la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad. Este enfoque también contribuye a la protección de especies vulnerables ante las olas de calor y la deforestación.

El escenario propuesto también busca mejorar los corredores biológicos, creando hábitats más seguros para especies sensibles, como mamíferos, aves y polinizadores endémicos. De igual manera, se promueve la recolonización de especies forestales nativas y la disminución de especies invasoras, como bacterias y virus que pueden afectar la biodiversidad de las zonas de mayor diversidad vegetal.

Para implementar estas estrategias, es fundamental contar con el compromiso de los gobiernos, las instituciones y las comunidades locales. Sin embargo, es probable que algunos sectores productivos muestren resistencia debido a las restricciones sobre el uso del suelo que podrían derivarse de las políticas de conservación.

5.6. Escenario 2: Expansión agrícola y ganadera sin restricciones.

Este escenario proyecta un contexto en el cual se implementa una política municipal de desarrollo agrario agresivo, donde se prioriza el crecimiento económico del sector agropecuario por encima de los criterios ambientales. Para simular este escenario se ajustaron dos variables clave: mosaico de pastos con cultivos y mosaico de cultivos con pastos naturales para las cuales se espera un incremento proyectado de 28% en cada una.

Como resultados de esta expansión se proyecta una transformación significativa al año 2032 la cual se caracteriza por la situación acelerada de coberturas naturales donde se encuentran arbustales, herbazales y bosques densos, una disminución preocupante en

cuanto a las coberturas de conservación donde especialmente se detallan áreas cercanas al paramo de Berlín y otras zonas de pendiente pronunciada las cuales son ecológicamente sensibles, una notable fragmentación del paisaje donde se debilitan corredores ecológicos afectando en gran medida la conectividad biológica y los servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad, por último se evidencio un posible aumento en el riesgo de erosión y perdida de la fertilidad del suelo especialmente en aquellas zonas de alta pendiente que no cuentan con manejo de prácticas agroecológicas sostenibles.

La simulación de este escenario muestra que sin tener en cuenta las restricciones de expansión, los usos agropecuarios se imponen incluso sobre territorios clasificados con uso forestal protector y de conservación, lo que representa a futuro un conflicto entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental a largo plazo. En consecuencia, este escenario revela la necesidad urgente de establecer límites y regulaciones claras sobre el crecimiento de la frontera agrícola, implementar practicas agropecuarias sostenibles y proteger esas zonas de alto impacto que tienen un mayor valor ecosistémico.

En la Tabla 7 se presenta el resultado obtenido de la simulación del modelo con proyección a 2032 para cada cobertura de la tierra, en el Escenario 2 Expansión agrícola y ganadera sin restricciones.

Table 7. Escenario 2 Expansión agrícola y ganadera sin restricciones.

ID	LEYENDA	AREA 2018 (HA)	AREA 2032 (HA)	PORCENTAJE (%)
1	1.1.2. Tejido urbano discontinuo	46,744	57,235	22,4
2	2.3.1. Pastos limpios	5663,893	6827,65	20,5
3	2.3.3. Pastos enmalezados	882,139	973,36	10,3
4	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5466,896	6737,55	23,2
5	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1566,957	1397,81	-10,8
6	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	2938,871	3123,97	6,3
7	3.1.1. Bosque denso	2751,464	1812,912	-34,1
8	3.1.3. Bosque fragmentado	3329,006	2015,6262	-39,5
9	3.2.1. Herbazal	9258,778	9996,08	8,0
10	3.2.2. Arbustal	1173,115	135,67	-88,4

***Nota.** Cálculo de aprovechamiento de suelos con un Escenario de expansión agrícola y ganadera - Fuente: Autores*

Cambios obtenidos en la modelación del Escenario 2: Expansión agrícola y ganadera sin restricciones.

- Se favorece la expansión de cultivos y ganadería, con baja regulación ambiental.
Se intensifica la conversión de bosque y arbustal a mosaicos agrícolas y pastos.
- Pastos limpios crecen a +5% anual.
- Bosque denso decrece a -3% anual hasta 2032.
- Pérdida neta: -1011 ha de bosque

Impactos del Escenario 2:

- Clima
 - ✓ Reducción de cobertura vegetal alta, lo que implica menor evapotranspiración.
 - ✓ Mayor temperatura superficial local.
 - ✓ Reducción del almacenamiento de carbono.
- Fauna
 - ✓ Fragmentación del hábitat, migración forzada de fauna silvestre.

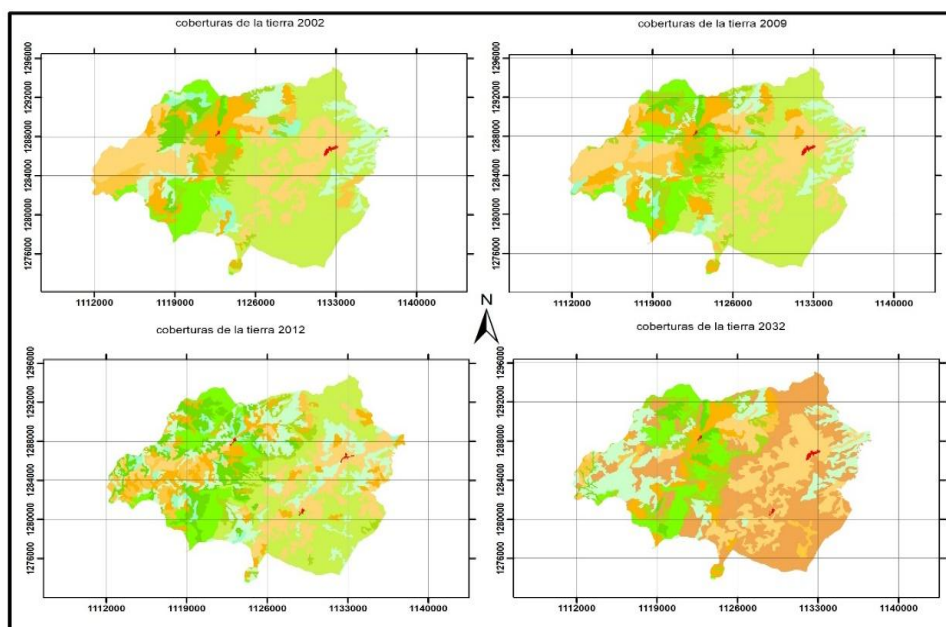
F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

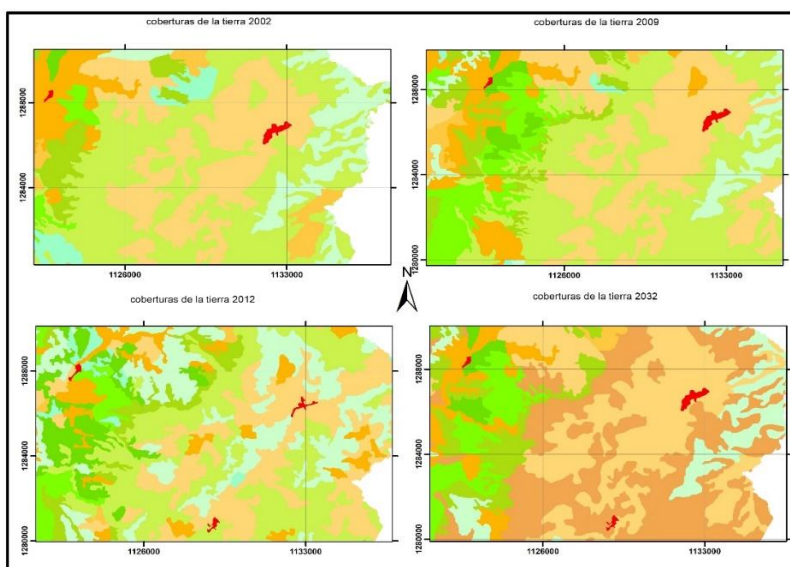
- ✓ Disminución de especies sensibles al disturbio.
- ✓ Aumento de especies oportunistas o asociadas a hábitats alterados.
- Flora
 - ✓ Pérdida de biodiversidad vegetal.
 - ✓ Mayor presencia de especies pioneras o introducidas.
 - ✓ Reducción de especies con valor ecológico y cultural.
- Riesgos o desafíos:
 - ✓ Mayor presión sobre recursos hídricos por expansión agrícola.
 - ✓ Aumento de erosión del suelo, compactación y escorrentía.
 - ✓ Disminución en los servicios ecosistémicos clave como regulación hídrica y control natural de plagas.

Figure 21 . Zonas de Cobertura escenario 2 expansión agrícola y ganadera



Nota. proyección de afectación en el suelo después de aplicar el Escenario 2 en expansión agrícola y financiera. - Fuente: Autores

Figure 22. Mapa topográfico de mayor afectación de expansión agrícola



Nota. Mapa de análisis de afectación en el municipio de Tona al aplicar el desarrollo del escenario 1 - Fuente: Autores.

Table 8. Especies vulnerables, en peligro y extintas en las zonas de expansión agrícola y ganadera.

ESPECIES AMENAZADAS			
AVES			
NOMBRE	NOMBRE CIENTIFICO	CATEGORIA	CRITERIO
Papamoscas Boreal	Contopus cooperi	NT	Casi amenazado
Tangara Corniblanca	Sericossypha albocristata	VU	Vulnerable
Reinita Gorjigris	Myiothlypis cinereicollis	NT	Casi amenazado
Chipe alas Amarillas	Vermivora chrysoptera	NT	Casi amenazado
Aguila elegante	Spizaetus ornatus	NT	Casi amenazado
Tordo Montañero	Macroagelaius subalaris	EN	En Peligro
Loro de los andes	Amazona mercenarius	EN	En Peligro
PLANTAS			
Espeletia Funckii		VU	Vulnerable
Espeletia Conglomerada		EN	En Peligro
Floripondio trompeta de ángel	Brugmansia sanguínea	EW	Extinto en estado silvestre
Puya Santanderinsis		CR	En peligro Critico
Gualte mapora	Wettinia microcarpa	VU	Vulnerable
Roble Andino	Quercus humboltii	VU	Vulnerable

Nota. Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN - Fuente: Autores.

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados presentados en el proyecto sobre la simulación de cambios de cobertura de la tierra en el municipio de Tona, se puede concluir respecto a los escenarios de expansión agrícola, ganadera y la expansión forestal.

La expansión agrícola y ganadera supone una política de desarrollo agrario fuerte, la cual promueve la expansión de las actividades agrícolas y ganaderas, traduciéndose en crecimiento del mosaico de pastos y cultivos en un 28%. Teniendo en cuenta lo anterior, se identifican impactos negativos directos sobre los recursos naturales, ya que el avance de la frontera agrícola y ganadera tiende a transformar las coberturas naturales y aumentar la presión sobre ecosistemas estratégicos, como fuentes hídricas y remanentes de bosques. Esto puede contribuir a procesos de pérdida de biodiversidad, degradación del suelo y disminución de la resiliencia ecológica de la zona, agravando los conflictos de uso del suelo y la deforestación.

La expansión forestal contrata el escenario de restauración ecológica y políticas de conservación, apunta a la recuperación de los bosques del municipio, con un crecimiento estimado del 48% en la cobertura forestal. Este enfoque promueve beneficios ecológicos claros, tales como la mejora de la calidad del agua, la protección de la biodiversidad, la estabilización de suelos especialmente en áreas de alta pendiente y la mitigación de riesgos ecológicos. Además, favorece la regulación del clima y la provisión de servicios ecosistémicos, esenciales para el bienestar humano y el desarrollo sostenible de la región.

La expansión agrícola y ganadera, si no es gestionada de manera sostenible, representa riesgos significativos para el ambiente y los recursos naturales; Mientras que la expansión forestal, producto de políticas de conservación, contribuye a la resiliencia

ambiental del municipio y genera beneficios importantes para la gestión del territorio y la calidad de vida de sus habitantes.

Se evidencia la necesidad de orientar las decisiones futuras hacia un equilibrio entre el desarrollo productivo y la conservación ambiental, la expansión agrícola y ganadera, si bien implica un crecimiento económico local también implica riesgos ambientales significativos como la pérdida de coberturas naturales, la degradación del suelo y la afectación de ecosistemas estratégicos. En este contexto, los proyectos a desarrollarse a futuro podrían enfocarse a en el desarrollo de sistemas productivos agroecológicos y silvopastoriles, programas de reforestación comunitaria, ecosistemas por servicios ecosistémicos y la integración de este modelo de simulación en los instrumentos de simulación territorial. Estas estrategias permitirán gestionar de manera más inteligente los cambios en la cobertura de la tierra, anticipar impactos y promover un desarrollo sostenible para las generaciones presentes y futuras en el municipio.

7. RECOMENDACIONES

Adoptar políticas de desarrollo sostenible: Es fundamental implementar políticas que equilibren la expansión agrícola y ganadera con la conservación ambiental. Se recomienda priorizar el uso sostenible del suelo, fomentando prácticas agropecuarias amigables con el ambiente para evitar la degradación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad.

Potenciar programas de restauración ecológica: Fortalecer y aumentar los esfuerzos en restauración de coberturas boscosas, especialmente en áreas de importancia estratégica como zonas de recarga hídrica y suelos de alta pendiente. Esto contribuirá a proteger los servicios ecosistémicos y mitigar el cambio climático.

Restringir la expansión agrícola en zonas de protección: Evitar la ampliación de la frontera agrícola y ganadera en áreas vulnerables, tales como el páramo de Berlín y las cuencas abastecedoras, donde la actividad productiva puede afectar negativamente la oferta hídrica y la estabilidad del terreno.

Integrar información socioeconómica y ambiental en la planificación: Utilizar modelos de simulación robustos que incorporan tanto variables ambientales como socioeconómicas, permitiendo una mejor proyección de tendencias y la definición de escenarios de manejo territorial más adecuados.

Fortalecer la educación y la participación comunitaria: Promover la sensibilización de la población local sobre la importancia de la conservación de los recursos naturales, incentivando su participación activa en la toma de decisiones y en proyectos de conservación y restauración.

Actualizar el Esquema de Ordenamiento Territorial EOT): Incorporar los resultados de las simulaciones y análisis de futuros escenarios de cambio de cobertura como insumo clave para la actualización del EOT, permitiendo una gestión territorial basada en evidencia y orientada a la reducción de conflictos de uso del suelo y la mitigación de la deforestación.

Monitoreo y control permanente: Implementar sistemas de monitoreo continuo para evaluar el cumplimiento de las políticas y la eficiencia de las intervenciones, ajustando estrategias según los nuevos datos y escenarios identificados a lo largo del tiempo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrés, R. M. I. (2021). Análisis de cambios de uso y cobertura del suelo en el páramo de Santurbán durante un periodo de 20 años. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/790d8c1f-e788-425a-8721-31cda14c0aca>
- Antoniolidia. (2023, 18 marzo). Técnicas y herramientas para modelado 3D en topografía. Recuperado de <https://todoingenierias.com/tecnicas-y-herramientas-para-modelado-3d-en-topografia/>
- Camilo. (s. f.-b). EOT TONA. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/527909318/EOT-TONA>
- Chang, X., Zhang, F., Cong, K., & Liu, X. (2021). Scenario simulation of land use and land cover change in mining area. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92299-5>
- Chen, M., Samat, N., Tilaki, M. J. M., & Duan, L. (2024). Land use/cover change simulation research: A system literature review based on bibliometric analyses. *Ecological Indicators*, 170, 112991. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112991>
- Choyossuarez. (2021, 7 octubre). Modelado 3D. Características, tipos y más. Recuperado de <https://grupokefren.com/disenio/modelado-3d/>

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

- DIRECTOR GENERAL. (s/f). PLAN DE MANEJO PARQUE REGIONAL PÁRAMO DE SANTURBÁN. Gov.co. Recuperado el 3 de agosto de 2025, de https://www.cdm.gov.co/images/documentos/institucional/areas_protegidas/DOCUMENTO TECNICO PM PNR 25 10 19.pdf?utm_source
- (S/f-b). Edu.uy. Recuperado el 3 de agosto de 2025, de https://eva.fcs.udelar.edu.uy/pluginfile.php/151724/mod_resource/content/3/6.c_Modelo%20Cartografico_Diploma_EUIT_2023.pdf
- Ferreras, R. M. (2016, 28 enero). ¿Qué es el álgebra de mapas? Recuperado de <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-el-algebra-de-mapas/>
- Gudiña, V. (2024, 18 diciembre). Sostenibilidad ambiental - Qué es, importancia, características y ejemplos. Recuperado de <https://definicion.de/sostenibilidad-ambiental/>
- Krantz, T., & Jonker, A. (2025, abril 23). ¿Qué es el procesamiento de datos? Ibm.com. <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/data-processing>
- Learn Statistics Easily. (2024, 6 agosto). Qué es: Modelo Descriptivo - APRENDA ESTADÍSTICAS FÁCILMENTE. Recuperado de [https://es.statisticseasily.com/glosario/%C2%BFQu%C3%A9-es-el-modelo-descriptivo-en-el-an%C3%A1lisis-de-datos%3F#:~:text=Un%20modelo%20descriptivo%20es%20un%20tipo%20de%](https://es.statisticseasily.com/glosario/%C2%BFQu%C3%A9-es-el-modelo-descriptivo-en-el-an%C3%A1lisis-de-datos%3F#:~:text=Un%20modelo%20descriptivo%20es%20un%20tipo%20de%20)

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

[20modelo,predicciones%20ni%20inferencias%20sobre%20puntos%20de%20datos%20futuros](#)

- Ley 1454 de 2011 – Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial (LOOT) (2011). Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1681347>
- Muñoz, D. A. H., & Villamizar, S. (2024). Identificación de escenarios de uso del suelo y cobertura para evaluar la dinámica de sedimentos en una cuenca abastecedora con la herramienta de modelación SWAT. Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería, 1-12. <https://doi.org/10.26507/paper.4085>
- Ochoa, F. (2023, 17 enero). ¿Qué es un análisis multitemporal? Recuperado de <https://acolita.com/que-es-un-analisis-multitemporal/>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica* (Versión 1.0). <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S., & Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2055>
- PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL. (s. f.). Recuperado de <https://www.tona-santander.gov.co/noticias/plan-de-desarrollo-municipal>

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

- Rcn, N. (2024, 25 enero). Incendio en Santander: más de 150 hectáreas del páramo de Berlín quedaron reducidas a cenizas. Noticias RCN. Recuperado de <https://www.noticiasrcn.com>
- TecnoDigital. (2024, 20 octubre). 10 Aspectos Clave: ¿Qué es la Gobernanza de Datos y Por Qué es Crucial? Recuperado de <https://informatecdigital.com/que-es-la-gobernanza-de-datos/>
- Yesenia, M. A., & Mauricio, O. J. H. (2018). Validación de la metodología corine land cover para generación de mapa de cobertura del suelo: caso cuenca del río Jordan (Tona, Santander). Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co/items/e7b023f0-14e3-428b-914c-a405adf0b94d>
- IUNC RedList (2021). Especies Amenazadas Municipio de Tona. Recuperado de <https://www.iucnredlist.org/es/search?query=Tona&searchType=species>