



Zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima a través de un modelo automatizado

Lady Johanna Polania Solano

Sandra Milena Forero Castro

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesor: Omar Castrillón Osorio Especialista (Esp) en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Polania Solano & Forero Castro, 2025)
Referencia	Polania Solano & Forero Castro. (2025). <i>Zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima a través de un modelo automatizado SIG</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXI

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo, en primer lugar,

a Dios, fuente de vida y sabiduría, quien nos ha brindado la fuerza y la oportunidad de recorrer este camino y alcanzar una meta tan significativa.

En segundo lugar, a nuestras familias, por su apoyo incondicional, por acompañarnos con palabras de aliento y gestos de amor, y por estar presentes incluso en los días más exigentes, ofreciéndonos consuelo, ánimo y ese cariño que se traduce, muchas veces, en una buena comida que reconforta el alma.

También nos lo dedicamos a nosotras mismas, por no rendirnos a pesar de las múltiples responsabilidades laborales y personales, por ser constantes, por cumplir con cada uno de los compromisos y por llegar, juntas, a esta meta profesional y académica que representa un logro valioso en nuestras vidas.

Finalmente, a nuestros compañeros de clase, cuya participación activa, sugerencias y observaciones fueron claves en la construcción y mejora de esta propuesta. Gracias por ser parte de este proceso compartido de aprendizaje y crecimiento.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a Dios y al universo por brindarnos la sabiduría, tenacidad, disciplina y claridad para culminar este proceso en los tiempos propuestos.

A nuestras familias, por su amor, paciencia y apoyo incondicional en cada etapa de este camino académico, por recibirnos en sus casas cada vez que lo necesitamos y distraernos cuando lo necesitábamos.

A nuestro orientador, el profesor Omar Castrillón Osorio, por su orientación, compromiso y valiosos aportes técnicos, que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

A CORTOLIMA, por su interés en la aplicación práctica de esta investigación y por motivarnos a generar conocimiento útil para la gestión ambiental del territorio.

A los docentes y compañeros de la Especialización en SIG de la Universidad de Manizales, por sus aportes y enseñanzas.

Y a todos quienes, con un gesto, palabra o aliento, hicieron parte de este logro.

Tabla de contenido

Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	16
1.1. Descripción del área problemática	17
1.2. Pregunta de investigación.....	20
2. Antecedentes	20
2.1. Antecedentes de procesos de automatización	21
2.2. Antecedentes de zonificación de amenazas a incendios forestales	23
2.3. Antecedentes zonificación de amenazas a incendios forestales mediante procesos de automatización.	25
3. Justificación	31
4. Objetivos	33
4.1. Objetivo general	33
4.2. Objetivos específicos.....	33
5. Hipótesis	34
4.1 Hipótesis de trabajo	34
6. Marco teórico	35
6.1. Referente teórico	35
6.1.1. Incendios forestales y su impacto.....	35
6.1.1.1. Definición y clasificación de los incendios forestales.	35
6.1.1.2. Factores que influyen en la ocurrencia y propagación de incendios.....	36
6.1.1.3. Impactos ambientales sociales y económicos en el Tolima y Colombia.	36
6.1.2. Gestión del riesgo de incendios.....	37

6.1.2.1. Zonificación de riesgo a incendios.....	38
6.1.2.2. Metodologías para la zonificación de la amenaza a incendios forestales.	40
6.1.2.3. Normativa nacional en gestión de riesgo.	42
6.1.3. Sistemas de información geográfica y Automatización de procesos en SIG.	44
6.1.3.1. Ventajas del uso de sig.....	44
6.1.3.2. Importancia de la automatización y sus ventajas.....	45
6.1.4. ModelBuilder y su automatización en Arcgis Pro.	45
6.1.4.1. Conceptos básicos de ModelBuilder.....	46
6.1.4.2. Creación de flujos de trabajo automatizado.....	48
6.1.4.3. ArcGIS Pro.....	50
7. Metodología.....	51
7.1. Enfoque metodológico.....	51
7.2. Tipo de estudio.....	51
7.3. Procedimiento metodológico.....	52
7.3.1. Recolección y preparación de datos.....	53
7.3.1.1. Fuente de datos.....	53
7.3.1.2. Preprocesamiento.....	53
7.3.2. Procesamiento y análisis.....	54
7.3.2.1. Normalización de variables y factores.....	54
7.3.2.2. Ponderación de variables y factores.....	55
7.3.3. Factores de amenaza.....	56
7.3.3.1. Susceptibilidad de la vegetación.....	57
7.3.3.2. Factores climáticos.....	58
7.3.3.3. Relieve.....	59
7.3.3.4. Factor histórico.....	59

7.3.3.5. Accesibilidad.....	60
7.3.4. Mapa de amenaza a incendios de la cobertura vegetal.....	60
7.3.5. Desarrollo del modelo de automatización.....	61
8. Resultados.....	63
8.1. Categorización de los componente y variables.....	63
8.1.1. Susceptibilidad de la vegetación a incendios.....	63
8.1.1.1. Tipo de Combustibles.....	64
8.1.1.2. Duración de Combustibles.....	66
8.1.1.3. Carga Total de Combustibles.....	69
8.1.1.4. Susceptibilidad de la vegetación a Incendios.....	71
7.1.2. Factores climáticos.....	72
7.1.2.1. Precipitación media anual.....	72
7.1.2.2. Temperatura media anual.....	73
7.1.2.3. Radiación media anual.....	73
7.1.2.4. Velocidad media multianual del viento.....	73
7.1.3. Factor del relieve.....	74
7.1.4. Factor histórico.....	74
7.1.5. Accesibilidad.....	75
7.1.6. Amenaza Total a incendios de la cobertura vegetal.....	75
7.2. Arquitectura del modelo de automatización geográfica para la zonificación de amenaza.....	76
7.2.1. Automatización de la susceptibilidad de la cobertura vegetal.....	77
7.2.2. Automatización de los factores climáticos.....	78
7.2.3. Automatización del factor de relieve.....	79
7.2.4. Automatización del factor histórico.....	80
7.2.5. Automatización de la accesibilidad.....	80

7.2.6. Automatización del mapa amenaza total a incendios de la cobertura vegetal.....	81
7.3. Mapa de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima.....	82
7.3.1. Susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios.....	82
7.3.1.1. Susceptibilidad por tipo de combustible	82
7.3.1.2. Susceptibilidad por duración del combustible	85
7.3.1.3. Susceptibilidad por carga del combustible	88
7.3.1.4. Susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios	90
7.3.2. Amenaza por factores climáticos	93
7.3.2.3. Amenaza por temperatura	93
7.3.2.4. Amenaza por precipitaciones.....	95
7.3.2.5. Amenaza por radiación solar	97
7.3.2.6. Amenaza por velocidad del viento.....	100
7.3.3. Amenaza por factor histórico o frecuencia	102
7.3.4. Amenaza por factor relieve	105
7.3.5. Amenaza por accesibilidad.....	107
7.3.6. Amenaza Total	110
8.1. Interpretación del mapa de amenaza y su relación con el territorio Tolimense	116
8.2. Modelo automatizado para la zonificación de amenaza.....	119
9. Conclusiones	121
10. Recomendaciones.....	123
Referencias	125
Anexos.....	133

Lista de tablas

Tabla 1 Matriz de normatividad que regula la gestión del riesgo por incendios forestales en Colombia.	42
Tabla 2 Descripción de los elementos de ModelBuilder.....	47
Tabla 3 Ejemplo de la estructura y contenido de los insumos cartográficos para la elaboración del mapa de amenaza.....	53
Tabla 4 Rangos y categorías de clasificación.....	55
Tabla 5 Geoprocesos utilizados en el proceso de automatización de la zonificación de amenazas por incendios forestales.	61
Tabla 6 Calificación y categorización según tipo de combustible	64
Tabla 7 Reclasificación del tipo de combustible, según nivel 3.	65
Tabla 8 Calificación y categorización según la duración del combustible.	67
Tabla 9 Reclasificación según la Duración de Combustibles.	67
Tabla 10 Calificación y categorización según la carga total de combustible.....	69
Tabla 11 Reclasificación según la carga total de combustible.	70
Tabla 12 Clasificación y categorización mediante la distribución de frecuencias para obtener el Mapa de Susceptibilidad	72
Tabla 13 Calificación y categorización por Precipitación Media Anual en milímetros	72
Tabla 14 Calificación y categorización por Temperatura media anual.....	73
Tabla 15 Categorización por Radiación media anual.....	73
Tabla 16 Categorización por velocidad media multianual del viento	73
Tabla 17 Categorización por factor de pendientes	74
Tabla 18 Categorización por densidad Kernel	74
Tabla 19 Categorización por susceptibilidad por accesibilidad	75
Tabla 20 Normalización y categorización de la amenaza total	75
Tabla 21 Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad por tipo de combustible	84
Tabla 22 Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad por duración de combustible..	86

Tabla 23 Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad por carga total de combustible	89
Tabla 24 Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad total	92
Tabla 25 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por temperatura	93
Tabla 26 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por precipitación	96
Tabla 27 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por radiación solar	99
Tabla 28 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por velocidad del viento	101
Tabla 29 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por densidad Kernel de los puntos calientes.	104
Tabla 30 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por grados de pendiente	106
Tabla 31 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por accesibilidad	108
Tabla 32 Área perteneciente a cada categoría de amenaza total	112
Tabla 33 Área y porcentaje de área en categorías Muy alta y Alta para municipios más susceptibles a incendios en el departamento del Tolima.....	113

Lista de figuras

Figura 1 Integración de factores para la zonificación de amenaza por incendios de cobertura vegetal	41
Figura 2 Clasificación de los elementos que componen el modelo	47
Figura 3 Procesamiento metodológico para la automatización y generación del mapa de amenaza a incendios forestales	52
Figura 4. Representación gráfica de los componentes de la amenaza.	56
Figura 5 Estructura del modelo para categorizar el factor de susceptibilidad de la cobertura vegetal	77
Figura 6 Estructura del modelo para categorizar los factores asociados a las variables climáticas	78
Figura 7 Estructura del modelo para categorizar el factor de relieve	79
Figura 8 Estructura del modelo para categorizar el factor histórico	80
Figura 9 Estructura del modelo para categorizar el factor de accesibilidad	81
Figura 10 Estructura del modelo para categorizar el factor de susceptibilidad de la cobertura vegetal	81
Figura 11 Mapa de susceptibilidad por tipo de combustible.....	82
Figura 12 Grado de susceptibilidad por tipo de combustible.....	84
Figura 13 Mapa de susceptibilidad por duración de combustible.....	85
Figura 14 Grado de susceptibilidad por duración del combustible.....	87
Figura 15 Mapa de susceptibilidad por carga total de combustible	88
Figura 16 Grado de susceptibilidad por carga de combustible	90
Figura 17 Mapa de susceptibilidad total de la cobertura vegetal	91
Figura 18 Grado de susceptibilidad total	92
Figura 19 Mapa de amenaza por temperatura media anual.....	94
Figura 20 Grado de amenaza por temperatura	95

Figura 21 Grado de amenaza por precipitación	96
Figura 22 Mapa de amenaza por precipitación media anual	97
Figura 23 Mapa de amenaza por radiación solar	97
Figura 24 Grado de amenaza por radiación solar.....	99
Figura 25 Mapa de amenaza por velocidad de los vientos.....	101
Figura 26 Grado de amenaza por velocidad del viento.....	102
Figura 27 Mapa de amenaza por factor histórico.....	103
Figura 28 Grado de amenaza por densidad Kernel de los puntos calientes	104
Figura 29 Grado de amenaza por grados de pendiente	106
Figura 30 Mapa de amenaza por grados de pendiente	107
Figura 31 Mapa de amenaza por accesibilidad	108
Figura 32 Grado de amenaza por accesibilidad	109
Figura 33 Grado de amenaza total por incendios en la cobertura vegetal	111
Figura 34 Mapa de amenaza total para el departamento del Tolima	111
Figura 35 Porcentaje de amenaza Muy Alta y Alta de los municipios más susceptibles a incendios en el departamento del Tolima.....	114

Siglas, acrónimos y abreviaturas

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

SIG: Sistema de Información Geográfica

PNUA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

GRID: Centro de comunicaciones ambientales

FAO:

UNGRD: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

SIAC: Sistema de Información Ambiental de Colombia

CORTOLIMA: Corporación Autónoma Regional del Tolima

FANP: Proceso de Red Analítica Difusa

FMA: Modelo Montealegre

PNN: Parque Nacional Natural

UAESPNN: Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia.

SNGRD: Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

IPCC: Panel Intergubernamental sobre el cambio climático de las naciones unidas.

DNP: Departamento Nacional de Planeación

CAR: Corporación Autónoma Regional

CEAA: Centro de Estudios Agrarios y Ambientales

SNPAD: Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres

SINA: Sistema Nacional Ambiental

CLC: Corine Land Cover

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

DEM: Modelo Digital de elevación

KDE: Método de densidad de Kernel

Resumen

El aumento de la frecuencia y magnitud de los incendios forestales en los últimos años ha constituido un grave problema ambiental, tanto global como nacionalmente, afectando la resiliencia de los ecosistemas y alterando de manera irreversible los procesos naturales que generan bienes y servicios ambientales. Ante esta situación, las autoridades nacionales han implementado normativas para prevenir estos eventos, como el protocolo de zonificación de riesgos a incendios forestales desarrollado por el IDEAM en 2011.

En este contexto, esta propuesta de grado se enfoca en la automatización de un modelo de Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar la zonificación de amenaza de incendios forestales en el departamento del Tolima, basado en dicho en el protocolo del IDEAM. La implementación del modelo tiene como objetivo optimizar la creación de mapas de amenaza, facilitando la identificación eficiente de áreas vulnerables a estos eventos. Para ello, se desarrollará un flujo de trabajo automatizado utilizando Model Builder de ArcGIS Pro, que integrará parámetros clave como el relieve, la accesibilidad, los antecedentes históricos y los factores climáticos, lo que garantizará resultados actualizados y ajustables a las condiciones cambiantes.

La automatización del proceso no solo reduce el tiempo y los recursos necesarios, sino que también ofrece insumos valiosos para los tomadores de decisiones, apoyando la formulación de políticas preventivas y mejorando la capacidad de respuesta ante incendios. Este enfoque contribuye a la conservación de la biodiversidad y a la gestión sostenible del territorio, proporcionando una base técnica robusta para la reducción de riesgos y la protección de las comunidades.

Palabras clave: Zonificación de incendios, gestión de riesgos, amenaza, susceptibilidad, incendios forestales, automatización, ModelBuilder.

Abstract

The increase in the frequency and magnitude of wildfires in recent years has become a serious environmental issue, both globally and nationally, affecting the resilience of ecosystems and irreversibly altering the natural processes that generate environmental goods and services. In response to this situation, national authorities have implemented regulations to prevent such events, such as the wildfire risk zoning protocol developed by IDEAM in 2011.

In this context, this thesis focuses on the automation of a Geographic Information System (GIS) model to determine wildfire risk zoning in the department of Tolima, based on this protocol. The model's implementation aims to optimize the creation of risk maps, facilitating the efficient identification of areas vulnerable to such events. To achieve this, an automated workflow will be developed using ArcGIS Pro's Model Builder, which will integrate key parameters such as topography, accessibility, historical data, and climatic factors, ensuring results that are updated and adaptable to changing conditions.

The automation of this process not only reduces the time and resources required but also provides valuable input for decision-makers, supporting the development of preventive policies and improving response capacity during fires. This approach contributes to biodiversity conservation and sustainable land management, providing a solid technical foundation for risk reduction and community protection.

Keywords: wildfire zoning, risk management, threat, vulnerability, risk, wildfires, automation, ModelBuilder.

Introducción

El cambio climático es un fenómeno natural que forma parte del proceso de autorregulación climática de la Tierra. Sin embargo, en las últimas décadas, los fenómenos naturales han perdido su equilibrio, volviéndose cada vez más extremos. Esto ha generado variaciones de temperatura más intensas, alterando las condiciones físicas y químicas de la Tierra. La principal causa de esta aceleración es el impacto de las actividades humanas, como los cambios en el uso del suelo. Según un informe de 2022 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUA) y el centro de comunicación ambiental GRID-Arendal¹, se proyecta un incremento global de hasta el 14% en la frecuencia de incendios forestales para el 2030, un 30% para el 2050 y un 50% para el 2100 (United Nations Environment Programme, 2022). Este aumento afectará tanto los patrones históricos de los incendios como las localizaciones en las que se producen. De hecho, en áreas donde anteriormente los incendios eran más frecuentes, su incidencia ha disminuido, mientras que, en regiones menos afectadas, su frecuencia ha aumentado.

En las últimas décadas, los incendios forestales han mostrado una tendencia creciente en magnitud, frecuencia e intensidad, representando una amenaza significativa para la biodiversidad, los ecosistemas, el bienestar humano y los bienes materiales. Esto es particularmente preocupante en zonas geográficas secas, áridas o con vegetación susceptible a incendios, que son más propensas a sufrir estos eventos.

Colombia no ha sido ajena a este aumento de incendios forestales. Debido a su ubicación tropical, el país experimenta fenómenos de variabilidad climática, como el fenómeno de El Niño, cuyos efectos son cada vez más extremos. Un ejemplo claro de esta problemática es el departamento del Tolima, que entre 2017 y 2018 fue el quinto departamento con mayor número de hectáreas afectadas por incendios a nivel nacional, con un total de 6.213 hectáreas de cobertura vegetal quemadas (IDEAM, IAvH, Invemar, IIAP, & Sinchi, 2019). Durante el periodo comprendido entre 2001 y 2022, se registraron 283.610,86 hectáreas afectadas por incendios, lo que evidencia una alarmante tendencia de degradación de los ecosistemas (Perea-Ardila et al., 2024).

En respuesta a esta creciente amenaza, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) desarrolló en 2011 un protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal. Este protocolo tiene como objetivo

proporcionar una metodología estandarizada que permita a las entidades nacionales identificar, categorizar y zonificar las áreas con mayor vulnerabilidad a estos eventos, lo que facilita la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas.

La creciente necesidad de desarrollar e implementar estrategias innovadoras para la captura de datos, el procesamiento, el análisis, el modelado y la predicción de estos fenómenos resalta la importancia de las tecnologías geoespaciales. Estas herramientas permiten optimizar la generación de modelos analíticos avanzados, integrando datos geográficos como la topografía, la cobertura del suelo, la climatología y la hidrología, entre otros factores. Este enfoque integral mejora significativamente la capacidad de prevención, respuesta y mitigación del riesgo asociado a los incendios forestales.

Este trabajo desarrolló un modelo de optimización utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), a través de la herramienta Model Builder en ArcGIS, para la zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima. El modelo se basó en el protocolo diseñado por el IDEAM, con el objetivo de optimizar los geoprocесamientos en el software SIG, lo que permitió obtener resultados más rápidos y precisos. Al estandarizar el protocolo en este modelo, se asegura que su aplicación en contextos regionales y locales esté respaldada por una metodología previamente evaluada y aprobada por el IDEAM. De esta manera, el modelo no solo proporciona una herramienta eficiente y dinámica para el análisis y gestión del riesgo de incendios forestales, sino que también contribuye y seguirá contribuyendo a la protección del bienestar humano, la biodiversidad y la conservación de ecosistemas clave para la regulación climática.

1. Planteamiento del problema

1.1.Descripción del área problemática

El presente capítulo tiene como propósito sustentar la relevancia de incorporar herramientas tecnológicas, particularmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como una alternativa eficaz para la gestión y mitigación del riesgo asociado a incendios forestales en el departamento del Tolima. Esta región presenta una alta susceptibilidad a este tipo de eventos debido a sus condiciones climáticas, topográficas y de cobertura vegetal, lo que incrementa significativamente la amenaza sobre los servicios ecosistémicos que actualmente se proveen. En este contexto, el desarrollo de un modelo automatizado de zonificación de amenaza a incendios forestales basado en SIG, y estructurado a partir del protocolo metodológico propuesto por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), busca optimizar los procesos de análisis espacial mediante resultados más ágiles, precisos y ajustados a las particularidades de cada área de análisis. La finalidad de este enfoque es fortalecer la capacidad técnica de las instituciones encargadas de la gestión del riesgo, brindándoles herramientas confiables para la planificación territorial, la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas.

El cambio climático se ha convertido en un factor clave en el aumento de los incendios forestales a nivel mundial, debido al incremento de las temperaturas globales y a la intensificación de fenómenos climáticos extremos, como el fenómeno de El Niño. Estas condiciones afectan las características biológicas de las coberturas, en la cual la vegetación se seca completamente y la convierte en combustible, haciéndola más susceptible al fuego. Según el informe Global Forest Resources Assessment de la FAO (2020), entre 2015 y 2020 se perdieron anualmente más de 67 millones de hectáreas de bosques debido a incendios. Además, el fenómeno de El Niño, que se presentó con una intensidad notable entre junio de 2023 y agosto de 2024, exacerbó la sequía y provocó incendios masivos en diversas regiones del mundo, evidenciando cómo el cambio climático amplifica estos desastres ambientales (FAO, 2020).

En Colombia, el impacto de los incendios forestales ha sido una problemática constante, puesto que ha afectado vastas áreas de bosque y otras coberturas vegetales. Según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019), se estima que entre 2010 y 2020, el país perdió más de 2 millones de hectáreas de bosques debido a incendios forestales. El departamento del Tolima se caracteriza por tener aproximadamente el 49,8 % de su territorio constituido por el ecosistema de bosque seco tropical, en el cual predomina vegetación caducifolia, distinguida por perder sus hojas durante las estaciones de sequía, convirtiéndose en el

material inflamable perfecto para la propagación de incendios forestales, lo que convierte al departamento en un área altamente susceptible (Moreno et al., 2020).

Por lo anterior, el departamento del Tolima enfrenta una problemática ambiental significativa debido a la alta incidencia de incendios forestales, los cuales han causado graves afectaciones a la biodiversidad y a las comunidades locales. Entre 2017 y 2018, Tolima fue el quinto departamento con mayor número de hectáreas afectadas por incendios a nivel nacional, con un total de 6.213 hectáreas de cobertura vegetal quemadas (IDEAM, 2019). Durante el periodo comprendido entre 2001 y 2022, se registraron 283.610,86 hectáreas afectadas, evidenciando una alarmante tendencia de degradación de los ecosistemas (Perea-Ardila & Murillo-Sandoval, 2024).

Según los datos reportados por la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima, 2024), se estima que, en lo corrido del año 2024, se vieron afectadas 10.000 hectáreas de bosque seco tropical en el Tolima, lo que representa aproximadamente el 25 % de este ecosistema en el departamento, repercutiendo considerablemente en las condiciones de flora, fauna, suelo, aire y agua de algunas zonas.

El impacto de estos incendios es considerable, afectando principalmente a municipios como Chaparral, Ortega, Natagaima y Ataco en el sur del Tolima, así como a Espinal, Ibagué, San Luis y Rovira (Perea-Ardila et al., 2024). La pérdida de cobertura vegetal no solo pone en riesgo la biodiversidad, sino que también debilita la capacidad del suelo para retener agua, lo que genera problemas de erosión y disminuye la resiliencia del ecosistema ante el cambio climático (Myers et al., 2000). Adicionalmente, los incendios contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, amplificando los efectos del calentamiento global y afectando la calidad del aire en las zonas urbanas y rurales cercanas (Cochrane, 2003). Las comunidades locales han sufrido pérdidas económicas significativas, además de impactos negativos en la salud y en la disponibilidad de recursos naturales (Smith & Bradshaw, 2013). Por lo tanto, los incendios forestales no solo generan una degradación ambiental significativa, sino que también impactan las comunidades locales, comprometiendo sus medios de subsistencia, la seguridad alimentaria y la salud, debido a la exposición al humo y la pérdida de recursos naturales esenciales.

En cuanto a la gestión del riesgo de incendios forestales, Colombia ha avanzado en la creación de instituciones y marcos regulatorios para enfrentar esta problemática. El IDEAM y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2024) son las principales autoridades encargadas de monitorear y coordinar acciones preventivas y de respuesta ante estos

eventos. Sin embargo, la respuesta a los incendios forestales sigue siendo reactiva y dispersa, con una limitada integración de los datos sobre la zonificación del riesgo. La falta de herramientas tecnológicas eficientes y la escasa articulación entre entidades locales y nacionales dificultan la implementación de políticas preventivas y de manejo del riesgo en regiones altamente vulnerables como Tolima.

Uno de los mayores desafíos en la gestión del riesgo de incendios forestales en Colombia es la carencia de estudios especializados que permitan identificar áreas de mayor vulnerabilidad. A pesar de los esfuerzos del IDEAM por desarrollar protocolos para la zonificación de riesgo a incendios, existe una limitada implementación de mapas actualizados y detallados que permitan a las autoridades locales y regionales tomar decisiones informadas. Además, plataformas de monitoreo como el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y el IDEAM han mostrado avances en el seguimiento de eventos, pero no logran ofrecer en tiempo real una precisión suficiente para la prevención oportuna, lo que resalta la necesidad de mejorar las herramientas de análisis y modelado geoespacial (IDEAM, 2019).

En la actualidad, la zonificación del riesgo de incendios en el Tolima se realiza de manera manual mediante ArcMap, un proceso que puede tardar hasta dos meses debido a la búsqueda y recolección de capas informativas en diferentes portales institucionales, muchas de ellas desactualizadas. Esta metodología manual no solo ralentiza el análisis, sino que también aumenta la probabilidad de errores en la normalización de variables y la aplicación de geoprocursos, lo que afecta la precisión de los mapas generados. Además, la actualización de estos mapas se ve limitada por la falta de un mecanismo ágil que permita incorporar datos recientes y ajustarse a las condiciones cambiantes del clima y la vegetación (Perea-Ardila & Murillo-Sandoval, 2024).

Otro factor limitante es la falta de personal especializado en la entidad para realizar estos análisis. Aunque Cortolima cuenta con ingenieros forestales, ingenieros ambientales y biólogos con experiencia en SIG, muchos de los funcionarios encargados de la zonificación de riesgo no cuentan con el conocimiento técnico para manejar herramientas como Model Builder en ArcGIS Pro, lo que dificulta la optimización del proceso. Además, como entidad pública, Cortolima debe trabajar con software licenciado, lo que restringe las alternativas tecnológicas disponibles y requiere equipos de cómputo adecuados para procesar grandes volúmenes de información.

En este contexto, la automatización de modelos SIG (Sistemas de Información Geográfica) surge como una herramienta fundamental para mejorar la precisión y eficiencia en la creación de

mapas de zonificación de riesgo a incendios forestales. La automatización no solo permite reducir el tiempo necesario para procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales, sino que también facilita la actualización continua de los mapas, integrando variables clave como la cobertura vegetal, condiciones climáticas y actividades humanas. Esto contribuiría directamente a la reducción y manejo del riesgo, al proporcionar a las autoridades y comunidades locales herramientas más precisas para la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas, como la gestión de recursos naturales, el monitoreo de áreas vulnerables y la planificación de respuestas ante eventos de incendios (Smith et al., 2013; Perea-Ardila & Murillo-Sandoval, 2024).

Asimismo, brindará un insumo fundamental para la toma de decisiones en la planificación y gestión ambiental, permitiendo a Cortolima diseñar estrategias más efectivas de prevención y mitigación de incendios forestales. En un contexto de cambio y variabilidad climática, contar con una herramienta automatizada para la zonificación del riesgo a incendios se vuelve indispensable para garantizar la resiliencia del territorio y la protección de los ecosistemas estratégicos del Tolima.

1.2. Pregunta de investigación

¿De qué manera se puede automatizar el proceso mediante el diseño de un modelo SIG para la generación de mapas de zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima, siguiendo el protocolo establecido por el IDEAM en 2011?

2. Antecedentes

Los incendios forestales constituyen una amenaza permanente para los ecosistemas, al afectar significativamente la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la estabilidad ambiental de los territorios. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado numerosos estudios orientados a identificar zonas vulnerables y a fortalecer las capacidades institucionales para la gestión del riesgo.

Estas investigaciones han incorporado tecnologías geoespaciales avanzadas, así como herramientas de programación visual como ModelBuilder, que permiten automatizar procesos y optimizar los análisis espaciales. Asimismo, se ha recurrido al uso de algoritmos de inteligencia artificial y enfoques de análisis multicriterio para la zonificación del riesgo, no solo en el contexto

de incendios forestales, sino también en temas como la estimación de la erosión del suelo, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y la modelación de inundaciones, entre otros.

El presente apartado se estructura en tres secciones —procesos de automatización, antecedentes internacionales y estudios nacionales— que permiten contextualizar esta investigación. A través de estos antecedentes, se destacan los avances en la aplicación de herramientas SIG y metodologías automatizadas para la zonificación del riesgo por incendios forestales, tanto en escenarios globales como en el contexto colombiano.

2.1. Antecedentes de procesos de automatización

En los últimos años, se han desarrollado múltiples investigaciones en diversas regiones del mundo enfocadas en la construcción de modelos automatizados mediante ModelBuilder de ArcGIS, aplicados a procesos de análisis geoespacial en contextos ambientales y de gestión del riesgo. Los antecedentes presentados a continuación evidencian la versatilidad de esta herramienta en la automatización de procedimientos y la generación de insumos útiles para la toma de decisiones en distintos escenarios.

Hidayat y Andajani (2018) diseñaron un modelo automatizado para estimar la erosión del suelo a través de la fórmula MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), implementada en ModelBuilder dentro de ArcGIS. Esta fórmula permite calcular la pérdida promedio anual de suelo (en toneladas por hectárea) en función de factores como la erosividad de la lluvia, las características del suelo, la topografía, el tipo de cultivo y las prácticas de conservación. El estudio, desarrollado en la cuenca hidrográfica de Citepus (Bandung, Indonesia), identificó a la subcuenca de Cilimus como la de mayor pérdida de suelo, con un valor de 234 ton/ha/año, lo que refleja un grave problema de erosión que requiere intervención urgente. El modelo automatizado facilitó la identificación de áreas críticas y permitió replicar el cálculo en otras regiones con características similares.

De manera complementaria, Meyhuay, Vera y Antúnez (2018) evaluaron la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en el área urbana del distrito de Chiquián, Perú, mediante un modelo automatizado construido con ModelBuilder. En su análisis, incorporaron once parámetros para determinar los índices de vulnerabilidad y de daño estructural. Los resultados revelaron que, de un total de 1.417 viviendas, el 14,7 % presentaba vulnerabilidad baja, el 21,2 % media, el 48,8 % alta y el 15,2 % muy alta. Además, se estimó que el 85,32 % de las viviendas colapsarían

completamente ante un evento sísmico, mientras que el 14,68 % sufrirían daños estructurales significativos. Esta automatización permitió una evaluación sistemática y reproducible del riesgo sísmico urbano.

Silalahi y Hidayat (2020) utilizaron ModelBuilder en ArcGIS Pro 2.0 para modelar la dirección del flujo en la cuenca hidrográfica del brazo oeste del río Little, en el condado de Lamoille, Vermont (EE. UU.). A través del análisis de histogramas unitarios, determinaron el momento de máxima descarga durante eventos de lluvia, generando mapas predictivos de inundaciones con utilidad para la planificación territorial y la gestión del riesgo. El estudio evidenció cómo la cobertura vegetal influye en el tiempo de escorrentía: el agua proveniente del noreste de la cuenca, una zona boscosa, tardaba más en llegar al punto de salida. Asimismo, se identificó que el uso de un modelo digital de elevación (DEM) con resolución de 10 metros arrojaba un tiempo de escorrentía de 8 horas y 46 minutos, mientras que con un DEM de 30 metros el tiempo aumentaba a 13 horas y 30 minutos, una diferencia crítica para el diseño de acciones de emergencia.

Por su parte, Stefanidis, Chatzichristaki y Stefanidis (2021) desarrollaron un modelo automatizado para la estimación y el mapeo de la erosión del suelo mediante el modelo de Potencial de Erosión (EPM), también implementado en ModelBuilder. El estudio se llevó a cabo en la cuenca del torrente Aspropotamos, en Grecia Central, donde se estimó una pérdida media anual de 33.112,9 m³ de suelo, con una tasa de erosión de 912,2 m³/año/km². A pesar de la existencia de cierto nivel de incertidumbre en las estimaciones, el modelo demostró ser eficaz para identificar zonas susceptibles a procesos erosivos y apoyar la toma de decisiones para la conservación del suelo.

Estos estudios reflejan el potencial de ModelBuilder como herramienta para la automatización de procesos geospaciales en diferentes ámbitos, como la erosión del suelo, la vulnerabilidad sísmica o la gestión del riesgo por inundaciones. Además, su implementación favorece la estandarización de procedimientos, la replicabilidad en otros territorios y la eficiencia en la generación de información espacial relevante para la gestión ambiental y del territorio.

A continuación, se presentan los antecedentes relacionados con el desarrollo de modelos para la zonificación de amenazas por incendios forestales, abordando investigaciones realizadas a nivel internacional.

2.2. Antecedentes de zonificación de amenazas a incendios forestales

En los últimos años, diversas investigaciones a nivel internacional han desarrollado modelos para la zonificación del riesgo de incendios forestales, integrando tecnologías geoespaciales avanzadas y algoritmos de aprendizaje automático. Estos estudios han permitido identificar factores determinantes, mejorar la precisión de los análisis y facilitar la toma de decisiones en la gestión del riesgo. A continuación, se presentan algunos trabajos representativos que ilustran diferentes enfoques metodológicos y resultados obtenidos en distintas regiones del mundo.

Naderpour, Rizeei y Ramezani (2021) propusieron un marco espacial basado en redes neuronales profundas para cuantificar el riesgo de incendios forestales en Northern Beaches, Sídney (Australia). Utilizaron 36 indicadores clave, integrados mediante técnicas de aprendizaje automático, para evaluar la susceptibilidad y vulnerabilidad territorial. El modelo implementó una red neuronal profunda con arquitectura MLP optimizada mediante FbSP, lo que permitió reducir el sobreajuste. La propuesta facilitó la simulación de múltiples escenarios, considerando tanto edificaciones como cambios socioeconómicos que inciden en la vulnerabilidad. Los resultados indicaron que menos del 2,5 % del territorio se clasifica como de riesgo muy alto, mientras que aproximadamente el 84 % corresponde a zonas seguras. Áreas específicas como Narrabeen y Bayview fueron identificadas como de alto riesgo, por lo que se recomendó implementar planes de reducción del riesgo. El modelo demostró una alta precisión en las métricas de validación y se destacó por su potencial de adaptación a otras regiones del país.

En la provincia de Hunan, China, Yang, Jin y Zhou (2021) desarrollaron un modelo de evaluación del riesgo de incendios forestales integrando el algoritmo Maxent y sistemas de información geográfica (SIG), utilizando datos de incendios ocurridos entre 2016 y 2020 y doce variables relacionadas con el entorno físico y biológico. Las variables más relevantes incluyeron condiciones climáticas, vegetación, topografía y actividades humanas. El estudio evidenció correlaciones positivas no lineales entre la probabilidad de incendios y factores como la temperatura, el índice de aridez, el uso del suelo, la densidad poblacional y la proximidad a vías. Se determinó que el 74,48 % del área presentaba un riesgo moderado, mientras que el 25,52 % tenía riesgo alto o muy alto, concentrado en regiones como Nanling, Yangming, Dawei y zonas cercanas al río Yuanjiang. Los resultados resaltan la importancia de las condiciones meteorológicas y la vegetación como factores clave en la ocurrencia de incendios.

Faramarzi, Hosseini, Pourghasemi y Farnaghi (2021) aplicaron el algoritmo de Evaluación Multicriterio Promedio Ponderado Ordenado (OWA) en el Parque Nacional de Golestán, Irán, para modelar el riesgo de incendios. Mediante el uso de funciones de pertenencia difusa y el método AHP, jerarquizaron los factores de riesgo. Las variables más influyentes fueron la cercanía a carreteras (peso = 0,288), la precipitación (peso = 0,288) y la orientación del terreno (peso = 0,255). Los mapas de riesgo generados bajo distintos escenarios fueron validados mediante la curva ROC, y los resultados mostraron que los factores asociados a la infraestructura vial y las precipitaciones tienen el mayor poder predictivo (factor de combinación = 0,87) en la ocurrencia de incendios en la zona analizada.

En otro estudio en Hunan, China, Tan y Feng (2023) emplearon algoritmos de aprendizaje automático —bosque aleatorio (RF), máquinas de vectores de soporte (SVM) y árboles de decisión con potenciación de gradiente (GBDT)— para mapear zonas de riesgo utilizando datos topográficos, meteorológicos, satelitales y sociales entre 2010 y 2018. El algoritmo de bosque aleatorio mostró el mejor rendimiento, con una precisión del 91,68 %, exactitud del 91,96 %, recuperación del 92,78 %, F1 del 92,37 % y un AUC del 97,2 %. El mapa de riesgo indicó que las zonas de mayor riesgo se concentran en el sur de la provincia, especialmente en ciudades como Hengyang, Shaoyang, Yongzhou, Chenzhou, el centro de Loudi y el sur de Zhuzhou. Se identificaron como principales impulsores del riesgo los factores meteorológicos y la cobertura vegetal.

Jing et al. (2024) realizaron una zonificación predictiva del riesgo de incendios forestales en el sur de China mediante el algoritmo de bosque aleatorio, en combinación con herramientas de análisis espacial como la densidad de kernel y la elipse de desviación estándar. El análisis, basado en datos de incendios entre 2001 y 2019, evidenció una tendencia decreciente en la ocurrencia de eventos, atribuida a mejoras en la gestión del riesgo y mayor conciencia pública. El modelo permitió identificar también variaciones estacionales en la distribución del riesgo.

Finalmente, Chen et al. (2025) desarrollaron un modelo a escala local en el Parque Nacional Wuyishan (China), integrando el algoritmo de bosque aleatorio con el Proceso de Red Analítica Difusa (FANP). Utilizaron datos geoespaciales y herramientas como densidad de kernel y análisis de elipse estándar, logrando un modelo con alto rendimiento predictivo. Identificaron zonas de alto riesgo con variaciones estacionales: de marzo a mayo, la vegetación más seca incrementa el riesgo, mientras que de junio a agosto, las altas temperaturas y sequías lo intensifican. El análisis de los

focos de calor entre 2001 y 2019 mostró una disminución en los incendios, atribuida a una mejor gestión, mayor conciencia pública y factores asociados al cambio climático. El estudio destacó la aplicabilidad de FANP para estudios regionales detallados y su utilidad en la toma de decisiones.

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian un avance significativo en la zonificación del riesgo de incendios forestales mediante la incorporación de técnicas de inteligencia artificial, análisis multicriterio y herramientas SIG. Estas metodologías han permitido el desarrollo de modelos más precisos, adaptables a distintas escalas territoriales y útiles para la planificación preventiva. A partir de estas experiencias internacionales, se hace necesario contrastar los enfoques y resultados con las estrategias implementadas en el contexto nacional y regional, para fortalecer las capacidades locales en la gestión del riesgo por incendios forestales.

2.3. Antecedentes zonificación de amenazas a incendios forestales mediante procesos de automatización.

Los incendios forestales en Colombia representan uno de los principales factores de perturbación que afectan los bosques y la biodiversidad, tanto por su frecuencia como por sus características y sus graves consecuencias sociales y económicas (UNGRD, 2019). Desafortunadamente, la constante presión antrópica ha puesto en riesgo los servicios ecosistémicos esenciales que estos hábitats forestales brindan (UNGRD, 2019). Para enfrentar esta problemática, el Gobierno Nacional, a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2011), ha desarrollado un protocolo para elaborar mapas de zonificación de riesgos de incendios de la cobertura vegetal a escala 1:100,000, con el fin de identificar áreas con diferentes niveles de riesgo y apoyar la planificación y gestión ambiental.

Basados en este protocolo, se han llevado a cabo diversas investigaciones a nivel nacional, orientadas a identificar las zonas más vulnerables y que requieren mayor atención por parte de las autoridades. Dado que el objetivo de este estudio es la zonificación de riesgo a incendios forestales basados en el protocolo del IDEAM (2011), se realizó una revisión de investigaciones relacionadas en los repositorios universitarios de Colombia que ofrecen programas de posgrado en Sistemas de Información Geográfica (SIG). A partir de esta búsqueda, se encontraron los siguientes estudios relevantes:

Prado-Fajardo (2014), realizó un diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas en riesgo por incendios forestales en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá. Encontró que el

índice de peligro del modelo Montealegre (FMA), presentó mayor significancia en la ocurrencia de incidentes, lo que permitió la asignación de una ponderación, y, por lo tanto, se introdujo esta variable de amenaza de la ecuación de peligro, establecida por el IDEAM (2011). Esto permitió la obtención de mapas diarios de riesgos de incendios de la cobertura vegetal en los Cerros Orientales. Entre los problemas que resaltaron, fue la calidad de los datos, para realizar los análisis estadísticos, impidiendo la posibilidad de utilizar los métodos de análisis de riesgos. Se resaltó, la importancia de esta herramienta para la generación diaria de informes de alerta temprana para la toma de decisiones, acciones de vigilancia, prevención y control de eventos que impacta a los ecosistemas.

Más adelante, Forero-Huertas (2016), identificó el riesgo existente por incendios forestales al interior del municipio de Villa de Leyva, Boyacá, a través del uso de un Sistema de Información Geográfica y Percepción Remota, que permitieran complementar la gestión del riesgo municipal. El autor concluye que el uso de los Sistemas de Información Geográfica facilita la continua actualización de la información, y permiten clasificar un territorio en diferentes niveles de riesgo con una adecuada precisión geográfica.

Por otra parte, Mejía-Quesada (2017), elaboró la zonificación de riesgos a incendios forestales en la Cuenca del Río Coello en el departamento del Tolima, que, a diferencia de los otros estudios, en donde se utilizaban límites municipales, la zona de estudio fue una subzona hidrográfica. De acuerdo con los datos obtenidos, la gran presencia de Riesgo Alto (35,57 %) y Riesgo Moderado (34,83 %) en el área de estudio, muestra el daño potencial que puede presentarse. Esto se debe a la heterogeneidad de las coberturas y usos del suelo en el área de estudio. Por otro lado, se resaltó la importancia de trabajar con información depurada y de calidad, además de contar con un personal capacitado para integrar las variables y algoritmos, para definir y generar la zonificación de riesgos a incendios forestales a través de las herramientas SIG.

En ese mismo año, Morales-Salguero (2017), generó la cartografía del riesgo de incendios forestales e identificar su propagación través del uso de herramientas SIG y una simulación que integró variables climáticas, topográficas y de factores humanos, con el fin de conocer el riesgo de ignición y comportamiento del fuego en los cerros orientales de Bogotá. Con este proyecto, se concluyó que la vegetación presente en los cerros orientales presenta un alto riesgo a incendios forestales durante casi todo el año, debido al tipo de combustible, su duración y su carga. A esto se le suma, la influencia de un efecto antrópico, ya que la presencia de caminos y vías aumentan el riesgo, debido a una mayor presencia del hombre e intervención humana.

Al revisar la literatura y analizar los programas de posgrado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que ofrecen las universidades en Colombia, se observa que la mayoría corresponden a especializaciones. Esta estructura académica, al ser de corta duración, limita el tiempo disponible para los trabajos de grado, lo cual ha llevado a que muchos estudios sobre zonificación de incendios se centren únicamente en la etapa del análisis de amenaza. Entre estos trabajos se destacan las siguientes investigaciones:

Arias-Murcia (2016), realizó la producción de un mapa de amenazas por incendios forestales en el sector rural del municipio de Tota, mediante la implementación de una nueva propuesta metodológica con el empleo de SIG. Una vez obtenidos los resultados, se realizó la verificación de huellas de incendios, y demostraron que el municipio de Total presenta una gran predominancia a calificaciones Altas a Muy Altas en el componente de combustibles, debido a la presencia de pastos, cultivos, matorrales, rastrojos y vegetación de páramo.

Mientras tanto, Coral-Chacón y Charromo Benavides (2016), obtuvieron un mapa de zonificación de amenaza por incendios forestales en el Departamento del Cauca que permitió establecer áreas prioritarias como marco de referencia para la gestión del riesgo. Entre las ecoregiones con mayor amenaza se encontraron: Altoandina fría, interandina media y valles interandinos. Este trabajo, resalta la importancia de realizar una zonificación a todo un departamento, ya que esto brinda a las autoridades locales conocer y tomar mejores medidas de prevención adecuadas para el sitio de estudio.

Luego, Urrutia-Garcés (2018), realizó una zonificación de amenaza por incendios forestales en el Municipio de Cali que permita establecer estrategias de prevención en áreas de conservación. Según esta zonificación el riesgo más Alto se concentró al oeste de municipio, con un 7.88%. La categoría de riesgo Moderada correspondió al 29, 47 %, en donde se concentran los centros poblados y la mayor cantidad de población rural. La categoría de riesgo Baja se ve representada por el 37,38 %, en el cual hace parte El Parque Farallones de Cali, bosques densos, mosaicos de pastos y cultivos. Por último, la categoría de riesgo Muy Baja, con un 25,16 %, hace parte de la zona urbana de Cali. A través de su trabajo, el autor resalta que la información oficial solicitada se encuentra desactualizada o mal estructurada, y que, en algunos casos, la adquisición de la información puede generar un costo para la persona que requiera realizar una investigación. Esto resalta la necesidad de que las autoridades encargadas de producir y actualizar la información base

para la zonificación de riesgos maneje la calidad y accesibilidad de los datos, para poder generar las zonificaciones que se adapten a los estándares de calidad de la información.

Más adelante, Talero-Rodríguez (2020), determinó la zonificación de amenazas por incendios de la cobertura vegetal en el municipio de Cuítiva Boyacá a escala 1:25000. Entre los hallazgos encontraron, la amenaza Muy Baja corresponde al 17 % del área, la amenaza Baja se atribuye el 13 %, la amenaza Moderada corresponde al 41 %, la amenaza Alta y Muy Alta, corresponde al 29 % del total del municipio. Finalmente, en su trabajo se realizó una calibración con el registro histórico espacial, evidenciado que el 93 % de los reportes coinciden con zonas de amenaza alta.

En ese mismo año, Rocha-Guzman y Valenzuela-Olaya (2020), determinaron el grado de amenaza por incendios forestales en el municipio de Nimaima, Cundinamarca. Demostraron que el municipio de Nimaima presenta condiciones necesarias para la generación, propagación y prolongada duración de un incendio, por ello el nivel de susceptibilidad y amenaza es alto para la entidad territorial. Por otra parte, resaltan la desactualización de la información disponible a nivel nacional que se encuentra en las plataformas y bases de datos geo ambientales.

De igual manera, Camacho-Reyes (2021), describió el proceso de generación de un mapa de Zonificación de la amenaza de incendios forestales en el municipio de Yopal, Casanare. Encontraron que, en el municipio de Yopal, la calificación que mayor se distribuye corresponde a una amenaza alta, ocupando un 50%, seguido de moderada con un 34%, muy alta con un 8%, baja con un 7% y un 1% correspondiente a muy baja. Esto se debe, a que la mayor parte donde se encuentran las amenazas Alta y Muy Baja corresponde a zonas de ganadería, donde la cobertura vegetal son pastos. Además, en estas áreas se realizan quemas para mejorar la calidad del pasto, lo que aumenta la amenaza.

Por otra parte, Benítez-Flórez (2023), realizó el análisis de las Amenazas por incendios forestales en el Parque Nacional Natural Paramillo, según sus niveles y factores asociados, mediante el uso de sistemas de información geográfica para la toma de decisiones en la gestión del PNN Paramillo. Entre sus hallazgos, se estableció que la mayor área en el territorio es la amenaza Muy Baja, corresponde al 37,54%, debido a que estas zonas se caracterizan por presentar coberturas vegetales con baja combustibilidad, y a la poca accesibilidad. Este trabajo contrasta con los anteriores estudios, ya que se realiza la zonificación en un PNN, a diferencia de un límite regional, además, ya que en este parque se realizan actividades de conservación y restauración, los

cambios de cobertura son menores, lo que se refleja el tipo de amenaza muy baja a incendios en el PNN.

Mientras tanto, Sánchez-Castillo (2023), delimitó la zonificación de amenaza a incendios en las coberturas en el municipio de Cota, Cundinamarca en una escala de 1:10.000. Como resultados obtuvieron que los porcentajes para niveles de amenaza fueron: muy baja con un porcentaje de 1.56% con respecto al área del municipio, amenaza baja representa el 19.46% en donde se incluyen construcciones, amenaza media representa el 80.56% y por último tenemos el nivel de amenaza alta que representa el 0.21%, este se encuentra en su mayor parte en la zona montañosa del municipio. Cabe resalta que, en este trabajo, se utilizó la herramienta de Model Builder para la realización del modelo de amenaza de incendios forestales. Este trabajo, no solo sirve de referencia sobre la aplicación del protocolo diseñado por el IDEAM (2011), sino que funciona como base para realizar el modelo lógico el trabajo a realizar en ModelBuilder.

Finalmente, Forero-Luque (2023), evaluó las amenazas por incendios forestales en San Juan de Rioseco Cundinamarca según el protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal. Se determinó que el municipio se encuentra en un rango “muy alto” ante amenaza por incendios forestales. Las principales razones para el nivel de amenaza muy alto son: la ubicación geográfica, hidro climatología, tipo de cobertura vegetal, la cantidad de vías primarias y secundarias, la temperatura, y actividades antrópicas. Entre las actividades antrópicas se encuentran las quemas para la eliminación de la cobertura vegetal residual o para el control de plagas, y la incineración de residuos por la falta de cubrimiento del sistema de recolección y transporte de residuos veredal. Por último, concluye que el uso de las herramientas SIG son de gran utilidad para la actualización de la información, y como incentivo para la creación de planes de gestión del riesgo, teniendo en cuenta la categorización de amenaza para las áreas específicas del municipio.

Como conclusión de la revisión de antecedentes, se evidencia que la mayoría de los estudios sobre zonificación del riesgo a incendios forestales se han centrado en áreas específicas como municipios o parques naturales, siendo escasos los análisis desarrollados a nivel departamental. Asimismo, varios trabajos resaltan la necesidad de contar con información actualizada y sujeta a revisiones periódicas por parte de las autoridades competentes, para garantizar la precisión y utilidad de los modelos de riesgo. No obstante, se debe resaltar que en Colombia los procesos de zonificación de riesgo a incendios forestales aún se realizan de manera manual, sin buscar la

manera de integrar las nuevas corrientes metodológicas basadas en automatización, algoritmos de aprendizaje automático o inteligencia artificial. Esto posiblemente ocasione una reducción en la eficiencia, escalabilidad y replicabilidad de las zonificaciones. En este sentido, el presente trabajo busca contribuir la incorporación de estas nuevas corrientes metodológicas mediante el diseño de un modelo SIG automatizado, que permita generar mapas de zonificación de riesgo a incendios forestales en el departamento del Tolima, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos por el IDEAM (2011), pero incorporando herramientas actuales como ModelBuilder, que facilitan la modernización y eficiencia del proceso.

3. Justificación

En la actualidad, los cambios del uso del suelo, junto con el cambio climático, ha aumentado la intensidad y la frecuencia de los incendios de la cobertura vegetal (Jones et al., 2024). Los eventos de incendios extremos en los últimos años han impactado a la sociedad y a los ecosistemas del planeta (Cunningham et al., 2024). Por lo tanto, la ocurrencia de incendios forestales representa un riesgo significativo para la integridad ecológica, la calidad del aire, la seguridad de las comunidades, la capacidad regenerativa de la vegetación y, en general, para el desarrollo sostenible de los territorios (Parra-Lara et al., 2011). En Colombia, este fenómeno es considerado un delito de peligro común según el Código Penal (Ley 599 de 2000), debido a los graves impactos ambientales y sociales que puede generar. En respuesta, la Ley 1523 de 2012 establece que la gestión del riesgo es una responsabilidad compartida entre entidades públicas, privadas y comunitarias, quienes deben desarrollar procesos integrales enfocados en el conocimiento del riesgo, su reducción y el manejo de desastres.

En este contexto, el IDEAM (2011) propuso un protocolo técnico para la elaboración de mapas de zonificación de riesgo de incendios en la cobertura vegetal a escala 1:100.000. Esta herramienta busca estandarizar el análisis espacial del riesgo y está dirigida a entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales, las gobernaciones, las alcaldías y la UAESPNN. Sin embargo, en la práctica, muchas de estas instituciones enfrentan limitaciones técnicas, falta de personal capacitado y restricciones de tiempo, lo que dificulta la implementación efectiva de dicho protocolo. En el departamento del Tolima, por ejemplo, la elaboración de mapas de zonificación del riesgo aún se realiza manualmente mediante ArcMap, en procesos que pueden tardar meses debido a la dispersión y desactualización de la información geográfica, así como a la complejidad de los geoprosesamientos requeridos.

Frente a este panorama, la automatización de un modelo geográfico mediante Model Builder en ArcGIS Pro se plantea como una solución innovadora que mejora la eficiencia, reduce errores humanos y garantiza resultados consistentes y actualizables. Además, tiene como ventaja, utilizar un lenguaje de programación intuitivo, ya que es gráfico, permitiendo que los profesionales que no estén relacionados con lenguajes de programación complejos puedan realizar actividades de automatización de procesos (Fernández-García, 2012). Esta herramienta permitirá integrar variables clave como la cobertura vegetal, la pendiente del terreno, la proximidad a fuentes de calor y las condiciones climáticas, facilitando la generación autónoma de mapas de zonificación de

amenaza ajustados a las condiciones dinámicas del entorno. De este modo, se reducirá el tiempo y los recursos necesarios para llevar a cabo los procesos técnicos, al tiempo que se fortalecen la precisión y la confiabilidad de los resultados (Martínez, 2017, p. 23).

La fase de conocimiento es esencial para la gestión del riesgo, pues a partir de información precisa y oportuna es posible planificar acciones de prevención y fortalecer la conciencia ambiental y comunitaria en las zonas más vulnerables. Este proyecto propuso automatizar dicha fase mediante flujos de trabajo secuenciales en ModelBuilder, integrando parámetros como la temperatura, la humedad del suelo y la cobertura vegetal. Esto permitió generar mapas actualizados y flexibles, capaces de adaptarse a cambios ambientales y facilitar una gestión proactiva del riesgo.

El impacto del proyecto fue tanto práctico como estratégico. A nivel institucional y regional, brindo a las autoridades locales y entidades ambientales un insumo técnico confiable para la toma de decisiones, la planeación preventiva y la asignación eficiente de recursos. A nivel territorial, contribuyó a aumentar la resiliencia frente a los efectos del cambio climático y la presión sobre los ecosistemas. Desde el ámbito académico, la propuesta se articuló con líneas de investigación en tecnologías geoespaciales aplicadas a la gestión del riesgo, y fomento la formación de profesionales con competencias en análisis espacial para la solución de problemáticas ambientales.

En términos de innovación, este proyecto planteo un flujo de trabajo automatizado que no ha sido implementado hasta ahora en el departamento del Tolima, ni de forma sistemática a nivel nacional, lo que lo convierte en una experiencia piloto con alto potencial de replicabilidad. Asimismo, ofreció una mejora metodológica al permitir la actualización periódica de los mapas de amenaza con menor esfuerzo operativo, fortaleciendo la fase de conocimiento del riesgo contemplada en el Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD).

En suma, esta automatización no solo optimizó tiempos y recursos, sino que proporciono una herramienta estandarizable y escalable, útil para la planificación territorial, la conservación de la biodiversidad y la evaluación de la eficacia de las medidas preventivas. En este sentido, el proyecto no solo fue pertinente, sino urgente, frente al incremento de eventos extremos asociados al cambio climático y la necesidad de una gestión del riesgo fundamentada en evidencia. Además, contribuyo a la sostenibilidad del territorio a largo plazo, al promover la conservación de la biodiversidad y fortalecer la capacidad adaptativa de las comunidades frente a los riesgos ambientales.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Automatizar un modelo para la zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima, utilizando como base el protocolo del IDEAM para la elaboración de mapas de zonificación de riesgos de incendios en la cobertura vegetal.

4.2. Objetivos específicos

Categorizar los componentes y variables clave para la zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima.

Construir la estructura del modelo para automatizar el proceso de zonificación de amenaza a incendios forestales en del departamento del Tolima.

Obtener el mapa de amenazas a incendios forestales como marco de referencia para la gestión de riesgo en el departamento del Tolima.

5. Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

La automatización de un modelo SIG, permite generar mapas de zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima, de forma más eficiente, sistemática y útil para la gestión del riesgo.

6. Marco teórico

A continuación, se presenta el desarrollo del marco teórico, orientado a establecer los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan la investigación en torno a la zonificación de incendios forestales y la automatización de procesos de geoprocésamiento. Este capítulo permite comprender las bases científicas y metodológicas necesarias para contextualizar el fenómeno de los incendios, sus causas, clasificación, factores asociados y consecuencias, con un enfoque específico en el territorio del Tolima y el contexto nacional colombiano.

6.1.Referente teórico

6.1.1. Incendios forestales y su impacto.

6.1.1.1. Definición y clasificación de los incendios forestales.

Los incendios forestales se definen como la combustión no controlada de la vegetación, que puede originarse de forma natural o por acción antrópica. Diversos estudios han demostrado que la mayor parte de estos eventos son provocados por actividades humanas, ya sea de manera directa o indirecta. De hecho, Van der Werf et al. (2013) estiman que el 96 % de los incendios forestales a nivel mundial tienen origen antrópico.

Para que se inicie un incendio forestal deben confluír ciertos elementos esenciales, como la presencia de oxígeno, vegetación inflamable, combustible seco, condiciones meteorológicas propicias, topografía accidentada y, en la mayoría de los casos, acción humana (Del Campo Parra-Lara & Bernal Toro, 2010).

En cuanto a su clasificación, los incendios forestales pueden dividirse según el estrato afectado y su comportamiento. Entre los más comunes se encuentran:

- **Incendios de superficie:** afectan los estratos bajos de la vegetación como pastizales, hojarasca y arbustos.
- **Incendios de copa:** se propagan por las copas de los árboles, con alta intensidad y difícil control. Suelen generar megaincendios que alteran la atmósfera por la emisión masiva de

monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), lo que repercute negativamente en la calidad del aire y la salud pública.

- **Incendios de subsuelo:** afectan la materia orgánica enterrada; tienen propagación lenta y son poco visibles, pero persistentes (Vega Hidalgo & Díaz Raviña, 2023).

6.1.1.2. Factores que influyen en la ocurrencia y propagación de incendios.

Los incendios forestales responden a la interacción de múltiples factores. Desde una perspectiva física, se requiere la combinación de tres elementos: combustible, calor y oxígeno, lo que se conoce como el "triángulo del fuego". A esto se suman variables meteorológicas (temperatura, humedad, viento), tipo de vegetación y características del relieve (Vega Hidalgo & Díaz Raviña, 2023).

La fuente de ignición puede ser natural (por ejemplo, rayos) o antrópica, siendo esta última la más frecuente. Entre las causas humanas más comunes están la quema de residuos agrícolas, fogatas mal controladas, desechos inflamables como envases de vidrio y acciones intencionadas.

El cambio climático ha intensificado los fenómenos de La Niña y El Niño, generando sequías prolongadas, olas de calor y condiciones de baja humedad. Estos factores favorecen la deshidratación del material vegetal, transformándolo en combustible altamente inflamable. La topografía también juega un papel crucial: en terrenos con pendiente, el fuego se propaga más rápido cuesta arriba debido al efecto del calor ascendente (Consejo Superior de Investigaciones Científicas [CSIC], 2023).

6.1.1.3. Impactos ambientales sociales y económicos en el Tolima y Colombia.

Los incendios forestales tienen efectos multidimensionales. En el plano ambiental, provocan la emisión de gases como el monóxido de carbono (CO), que deteriora directamente la calidad del aire, y el dióxido de carbono (CO₂), considerado uno de los principales gases de efecto invernadero. Según la Organización Mundial de la Salud (2000), el CO es un contaminante de impacto inmediato sobre la salud, mientras que el CO₂, de acuerdo con el IPCC (2021), contribuye significativamente al calentamiento global.

Entre los impactos ecológicos se incluyen la pérdida de biodiversidad, cambios en la composición físico-química del suelo, contaminación de fuentes hídricas y alteraciones microclimáticas. Los incendios forestales liberan entre 6.000 y 8.000 millones de toneladas de CO₂

anualmente, lo que representa entre el 20 % y el 25 % de las emisiones asociadas a la quema de combustibles fósiles.

En Colombia, y especialmente en el Tolima, estos eventos también generan severos impactos socioeconómicos. Las pérdidas agrícolas, los costos en infraestructura, el uso de recursos para la mitigación (agua, transporte, mano de obra), y en algunos casos la reubicación de comunidades, implican una alta carga para la economía local y regional.

En el departamento del Tolima, en el año 2024, según CORTOLIMA se perdió aproximadamente el 25% del ecosistema de bosque seco tropical equivalentes a 10.000 hectáreas en todo el departamento, lo cual responde a la tendencia que se ha venido desarrollando durante la última década a partir de los eventos climáticos extremos como el niño presentando en las épocas de altas temperaturas y poca precipitación, promoviendo la pérdida de este importante ecosistema en el país, siendo uno de los más degradados en la actualidad.

Los impactos económicos de los incendios forestales en el departamento del Tolima, según Simón Gaviria, entonces director del DNP (Noticieros en línea, 2016), los incendios producidos en el año 2015 representaron pérdidas de aproximadamente 22.0000 millones de pesos, estos valores calculados a partir de lo requerido para la atención de las emergencias, la pérdida de servicios ecosistémicos, las pérdidas en infraestructura y el impacto en la salud humana. Destacando que en muchos casos estas áreas no pueden ser recuperadas, sino que al contrario se convierten en suelos infértiles y muertos.

6.1.2. Gestión del riesgo de incendios.

La gestión del riesgo se refiere al proceso de identificar, analizar y reducir la probabilidad de pérdidas asociadas a desastres, adoptando un enfoque preventivo que contempla acciones de mitigación, preparación, respuesta y recuperación frente a posibles eventos (Dwyer et al., 2004; Keipi, Mora y Bastidas, 2005).

En el contexto colombiano, la Ley 1523 de 2012 define la gestión del riesgo como un proceso social permanente de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones orientadas al conocimiento del riesgo, su reducción o control, y la preparación para la atención de emergencias y su recuperación posterior. Este proceso busca contribuir a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de la población, así como al desarrollo sostenible del país.

La gestión del riesgo en Colombia se estructura en tres componentes principales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres (Castañeda-Quinchía, 2019). Este trabajo se enmarca en el primero de estos componentes: el conocimiento del riesgo, cuyo objetivo es identificar escenarios de riesgo y generar conciencia sobre ellos. En este sentido, la evaluación y zonificación del riesgo por incendios forestales se convierte en una herramienta esencial, ya que permite delimitar áreas con alta probabilidad de ocurrencia de estos eventos (Umaña, 2017). Estas evaluaciones son lideradas por entidades nacionales y territoriales que disponen de herramientas técnicas para desarrollar sus propias zonificaciones, las cuales se utilizan como insumo para la toma de decisiones en materia de gestión del territorio (IDEAM, 2011).

En este marco, las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), de conformidad con el artículo 31 de la Ley 1523 de 2012 y la Ley 99 de 1993, desempeñan un papel fundamental como entidades del orden nacional en el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo. Estas instituciones deben brindar apoyo técnico a los entes territoriales en la elaboración de estudios orientados al conocimiento y la reducción del riesgo (Castañeda-Quinchía, 2019).

6.1.2.1. Zonificación de riesgo a incendios

Uno de estos estudios es la zonificación del riesgo, entendida como parte del proceso de ordenamiento territorial mediante el cual se definen zonas de manejo homogéneo sujetas a normas de uso específicas, con el fin de cumplir objetivos determinados (Centro de Estudios Agrarios y Ambientales [CEAA], 2013). En el caso particular de la zonificación del riesgo, esta consiste en dividir un área geográfica en zonas según los niveles de riesgo identificados, para lo cual se requiere la homogenización de variables, la recopilación de información precisa y un análisis riguroso. Estas zonificaciones permiten a las autoridades implementar decisiones estratégicas, como la evacuación de zonas críticas o la asignación de recursos para la mitigación del riesgo (CEAA, 2013).

Para llevar a cabo una zonificación del riesgo por incendios en la cobertura vegetal, es necesario comprender los conceptos que estructuran el análisis del riesgo. De acuerdo con el protocolo del IDEAM (2011), estos conceptos son:

Amenaza: Se refiere al peligro latente que representa la posible ocurrencia de un incendio de la cobertura vegetal, ya sea de origen natural, socio-natural o antrópico, en un área determinada. Esta amenaza puede generar efectos adversos sobre las personas, la producción, la infraestructura,

los bienes y servicios, y el ambiente. La amenaza se expresa como la probabilidad de que un incendio ocurra con una determinada intensidad, en un lugar y tiempo específicos (IDEAM, 2011).

Susceptibilidad de la vegetación: Corresponde a las características intrínsecas de la vegetación y los ecosistemas, como la carga de combustibles, su disposición y combustibilidad, que determinan el grado de probabilidad de que se inicie, propague y mantenga un incendio. Este concepto hace parte integral de la amenaza (IDEAM, 2011).

Vulnerabilidad: Es la predisposición de los elementos expuestos a ser afectados por un incendio de cobertura vegetal. Incluye la probabilidad de daño físico, económico, político o social, así como las dificultades para recuperarse. La vulnerabilidad se interpreta a partir de variables como la densidad poblacional, la infraestructura, las actividades económicas, el patrimonio natural y cultural, y la capacidad institucional. En el caso específico de la vegetación, la vulnerabilidad se relaciona con su grado de adaptación al fuego y su capacidad para resistir o recuperarse tras un evento de incendio (IDEAM, 2011).

Riesgo: Se define como la probabilidad de que se presenten consecuencias negativas — económicas, sociales o ambientales— en un territorio durante un periodo determinado, como resultado de la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad. El riesgo puede expresarse como una función: $\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$. Así, cualquier cambio en estos dos factores modifica directamente el nivel de riesgo. En el contexto de los incendios, la cobertura vegetal actúa tanto como un factor de amenaza —al aportar el combustible— como un factor de vulnerabilidad al verse afectada por el fuego (IDEAM, 2011).

Estas categorías se encuentran estrechamente relacionadas entre sí y organizadas de forma jerárquica para la elaboración de una zonificación de riesgos. El análisis de la amenaza y la susceptibilidad permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un incendio de cobertura vegetal; estos eventos son de origen natural, socio-natural o antrópico, y no pueden ser controlados (Morales-Salguero, 2017). En contraste, la vulnerabilidad se refiere a los elementos expuestos — como las personas, la infraestructura o los ecosistemas— y a su capacidad para verse afectados por este tipo de eventos. A diferencia de la amenaza, la vulnerabilidad sí puede ser gestionada o reducida mediante acciones institucionales (Morales-Salguero, 2017). Finalmente, el riesgo surge de la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad, y representa el nivel de consecuencias potenciales esperadas en un área determinada (IDEAM, 2011).

Es importante señalar que este trabajo se enfoca exclusivamente en la zonificación de la amenaza por incendios de la cobertura vegetal, entendida como la identificación espacial de áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios, según sus características biofísicas y territoriales. Por tanto, la evaluación de la vulnerabilidad y la cuantificación del riesgo total no forman parte del alcance de esta investigación, aunque se reconocen como fases esenciales en procesos posteriores de planificación y gestión integral del riesgo.

6.1.2.2. Metodologías para la zonificación de la amenaza a incendios forestales.

La zonificación del riesgo por incendios forestales consiste en delimitar un área geográfica en función del potencial de ocurrencia y propagación del fuego. Esta herramienta permite identificar, clasificar y representar espacialmente zonas con distintos niveles de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (Suárez, 2009). Su aplicación es fundamental para apoyar la toma de decisiones informadas en la planificación del territorio, la prevención de desastres y la asignación de recursos destinados a la mitigación de impactos en cada región (Oliveira, 2002).

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) tiene la función de monitorear y dar seguimiento a los eventos relacionados con incendios forestales. En el año 2011, esta entidad estableció un protocolo técnico para la elaboración de mapas de zonificación del riesgo por incendios de la cobertura vegetal, con una escala de trabajo de 1:100.000. Este protocolo está dirigido a las entidades regionales y locales responsables de la gestión del riesgo, como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), las gobernaciones, los municipios y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN) (IDEAM, 2011).

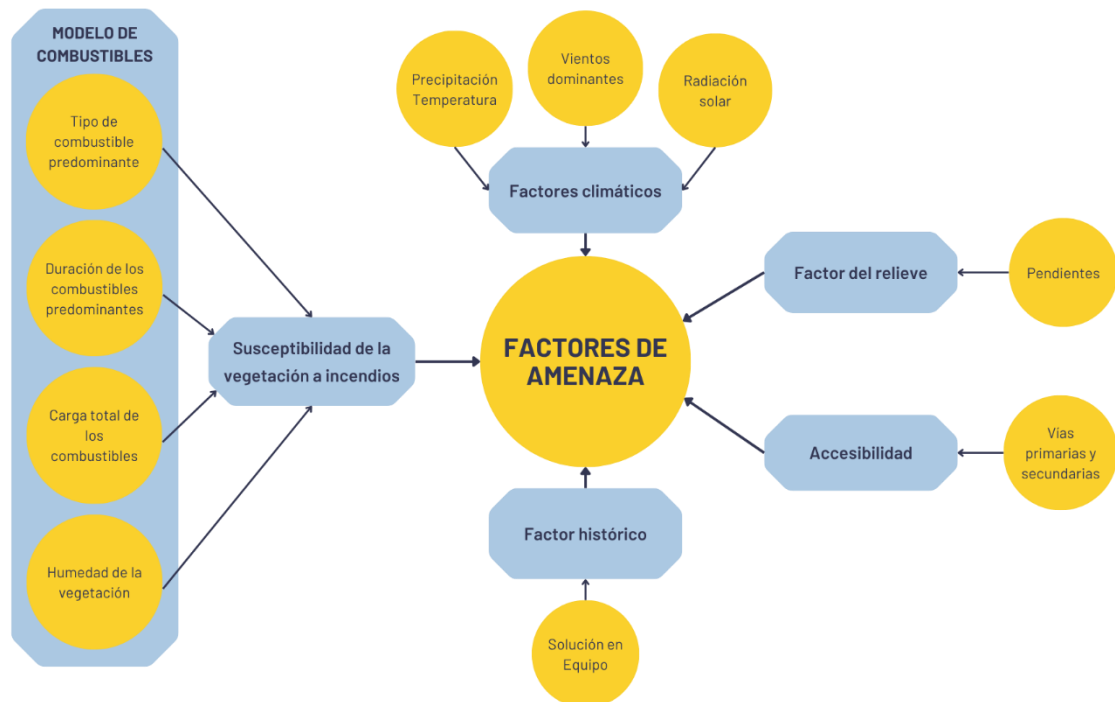
La metodología se presenta en forma de fichas técnicas organizadas en cuatro etapas: (i) zonificación de la susceptibilidad de la cobertura vegetal, (ii) zonificación de la amenaza, (iii) zonificación de la vulnerabilidad y (iv) integración de los resultados para generar el mapa final de riesgo. Este proceso se basa en un análisis multicriterio de cada uno de los componentes, utilizando la parametrización y el procesamiento de variables espaciales a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (IDEAM, 2011).

En el caso específico de la zonificación de la amenaza, esta se realiza mediante la calificación de factores biofísicos y climáticos del territorio que inciden en la ocurrencia de incendios. Entre estos factores se incluyen: la susceptibilidad de la cobertura vegetal al fuego (tipo,

carga y continuidad de combustibles), la accesibilidad, variables climáticas (temperatura, precipitación, vientos y radiación solar), características del relieve (pendiente), y antecedentes históricos (frecuencia de incendios) (IDEAM, 2011). En la Figura 1 se ilustra el proceso metodológico para la evaluación de la amenaza.

Figura 1

Integración de factores para la zonificación de amenaza por incendios de cobertura vegetal



Nota. Fuente *Elaboración propia (adaptado de IDEAM, 2011).*

La integración de estas capas temáticas se lleva a cabo mediante la técnica de análisis jerárquico, que permite asignar pesos a cada variable según su influencia relativa en la ocurrencia de incendios. Este enfoque de evaluación multicriterio busca reducir la subjetividad en la ponderación de los factores (IDEAM, 2011). Como producto intermedio, se genera un mapa que clasifica el territorio en zonas de amenaza baja, media y alta.

Para realizar estos análisis, se emplean herramientas SIG que permiten integrar las capas temáticas, establecer relaciones entre variables y generar salidas cartográficas. Plataformas como ArcMap, ArcGIS Pro, QGIS, entre otras, ofrecen entornos de geoprocésamiento que facilitan la ejecución de estos procesos.

6.1.2.3. Normativa nacional en gestión de riesgo.

Colombia cuenta con un marco normativo que respalda la prevención, mitigación y atención de incendios forestales, articulando la protección ambiental con la gestión del riesgo. La Ley 2ª de 1959 fue una de las primeras disposiciones en establecer bases legales para la conservación de los recursos naturales. Más adelante, la Ley 46 de 1988 y el Decreto 919 de 1989 crearon y organizaron el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD), exigiendo que los planes de desarrollo territoriales incluyeran acciones preventivas frente a desastres.

La Constitución Política de 1991, refuerza este enfoque al señalar que el Estado debe proteger la diversidad e integridad del ambiente mediante el establecimiento de acciones de desarrollo humano sostenible. En ese marco, entidades como el antiguo INDERENA, hoy Ministerio de Ambiente, y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) han trabajado de manera conjunta para avanzar en la prevención de incendios, apoyados por la Comisión Nacional Asesora para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales.

Dos leyes clave fortalecen este marco: la Ley 1523 de 2012, que adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y crea el SNGRD; y la Ley 1575 de 2012, que establece la Ley General de Bomberos, ambas fundamentales para coordinar acciones de prevención, respuesta y planificación territorial frente a incendios forestales.

En el Tabla 1, se presenta una matriz con las principales normas, leyes y decretos que regulan la gestión del riesgo por incendios forestales en Colombia.

Tabla 1

Matriz de normatividad que regula la gestión del riesgo por incendios forestales en Colombia.

Norma	Objeto	Observación
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.	Creó el Sistema Nacional Ambiental (SINA), asignó funciones específicas a las autoridades ambientales en materia de atención y prevención de desastres con el propósito de proteger el medio ambiente.
Ley 322 de 1996	Por la cual se crea el Sistema Nacional de Bomberos de Colombia y se dictan otras disposiciones.	Creó el Sistema Nacional de Bomberos con el propósito de fortalecer su organización, funcionamiento y especificando que todos los incendios deben ser atendidos por el cuerpo de bomberos.
CONPES 2834 de 1996	Política de Bosques	Establece la necesidad de formular y poner en marcha el "Programa Nacional para la

		Prevencción, Control y Extinción de Incendios Forestales y rehabilitación de áreas afectadas”, el cual debe articularse al Plan Nacional para la Prevencción y Atención de Desastres y operar dentro del Sistema Nacional Ambiental y el Sistema Nacional para la Prevencción y Atención de Desastres
Decreto 2340 de 1997	Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevencción y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones.	Se crean las Comisiones Asesoras para la prevencción y mitigación de Incendios Forestales en el nivel nacional, regional y local, asignándoles funciones y responsabilidades.
Decreto 93 de 1998	Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevencción y Atención de Desastres.	Se adoptó el Plan Nacional para la Prevencción y Atención de Desastres con el objeto de “Orientar las acciones del Estado y de la sociedad civil para la prevencción y mitigación de riesgos, los preparativos para la atención y recuperación en caso de desastre, contribuyendo a reducir el riesgo y al desarrollo sostenible de las comunidades vulnerables ante los eventos naturales y antrópicos.
CONPES 3125/01	Plan Nacional de Desarrollo Forestal	Establecieron la necesidad de formular planes de contingencia regionales y municipales contra incendios forestales; la consolidación de la Red Nacional de los Centros Regionales de Respuesta Inmediata; y el Desarrollo e implementación de mecanismos y sistemas de detección y monitoreo de Incendios Forestales.
Ley 599 de 2000	Por la cual se expide el Código Penal.	Considera los incendios como delito de peligro común, que pueden ocasionar grave perjuicio para la comunidad. Específicamente, en el artículo 3502, establece sanciones cuando este tipo de eventos se suceden en bosque, recurso florístico o en área de especial importancia ecológica.
Ley 1551 de 2012	Por el cual se dictan normas para la modernización, organización y el funcionamiento de los municipios.	Dicta que la administración municipal debe promover la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, mediante la planificación del desarrollo ambiental de su territorio y el manejo de los recursos naturales y el medio ambiente, de conformidad con la ley y en coordinación con otras entidades.
Ley. 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.	Adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). Define la Gestión del riesgo como un proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación. Enfoca la responsabilidad de los entes territoriales en la gestión, en especial la de los municipios y le da a las Corporaciones autónomas regionales funciones de apoyo a los

		municipios y departamentos básicamente en conocimiento y reducción del riesgo.
Ley 1575 de 2012	Por medio de la cual se establece la ley general de Bomberos de Colombia.	Mediante la cual se creó el Sistema Nacional de Bomberos con el propósito de fortalecer su organización, funcionamiento y especificando que todos los incendios deben ser atendidos por el cuerpo de bomberos.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010)	La política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país.	<p>Contiene el Objetivo específico No. 4: RIESGO, cuyo alcance es: “Desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua”. Este objetivo se logra con las siguientes estrategias:</p> <p>Estrategia 4.1: “Generación y divulgación de información y conocimiento sobre riesgos que afecten la oferta y disponibilidad hídrica”.</p> <p>Estrategia 4.2: “Incorporación de la gestión de los riesgos asociados a la disponibilidad y oferta del recurso hídrico en los instrumentos de planificación”.</p> <p>Estrategia 4.3: “Medidas de reducción y adaptación de los riesgos asociados a la oferta hídrica”. Entre otros.</p>
Plan Nacional de Prevención, Control de Incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas (2002)	Establecer los lineamientos de orden nacional para la prevención, control y restauración de las áreas afectadas por los incendios forestales, mitigando su impacto y fortaleciendo la organización nacional, regional y local con programas a corto (3 años), mediano (10 años) y largo plazo (25 años).	Orientado a concretar integral y sistemáticamente las políticas de protección ambiental con los programas e instituciones que deben actuar en la prevención, control y restauración de áreas afectadas por los Incendios Forestales.

Nota: Fuente Elaboración propia, basada en la información de la página oficial de Sistema Único de Información Normativa (<https://www.suin-juriscal.gov.co/>)

6.1.3. *Sistemas de información geográfica y Automatización de procesos en SIG.*

6.1.3.1. **Ventajas del uso de sig.**

Los sistemas de información geográfica son un conjunto de elementos interrelacionados que permiten capturar, almacenar, procesar, editar, analizar y representar datos georreferenciados. Los componentes que conforman los SIG, son:

Hardware: los sistemas de información geográfica requieren de un equipo que cumpla con los criterios técnicos para cumplir con las necesidades de la aplicación.

Software: las aplicaciones o programas se componen principalmente de un sistema de manejo de base de datos, herramientas para captura, manejo, consulta, análisis y visualización de información geográfica.

Información: este es el componente de mayor importancia. Todo el sistema depende de la información, como materia prima de calidad para que el SIG ejecute procesos y permita un análisis eficiente de los datos.

Personal: Son los encargados de diseñar y ejecutar las acciones necesarias para el funcionamiento del software, sin los técnicos especializados el SIG no podría cumplir con sus funciones.

Métodos: Son el conjunto de metodologías a aplicar sobre los datos.

La posibilidad de interrelacionar capas de información cartográfica es lo que pone a los SIG en ventaja sobre otro tipo de sistema, ya que, permite la gestión eficiente de la información y el abordaje integral de cada uno de los fenómenos espaciales que se requieren estudiar.

6.1.3.2. Importancia de la automatización y sus ventajas

Los procesos realizados en los sistemas de información geográfica requieren de ejecutar tareas repetitivas que requieren de tiempo y disposición de personal calificado, lo cual crea la necesidad de implementar metodologías que optimicen, minimicen los errores humanos, generen productos de mejor calidad y establezcan flujos de trabajo como herramientas que se pueden compartir en diferentes organizaciones.

La optimización de los flujos de trabajo en entornos geoespaciales permite reducir significativamente los costos operativos, el tiempo de procesamiento y la cantidad de personal requerido para el diseño, ejecución y actualización de datos. Al mismo tiempo, contribuye a perfeccionar la estructura y los productos generados por el modelo, incrementando la eficiencia y la confiabilidad de los análisis espaciales. Esta mejora integral facilita la generación de resultados en menor tiempo, lo cual es esencial para apoyar procesos de toma de decisiones oportunas y eficaces, especialmente en contextos que demandan respuesta rápida, como la gestión del riesgo.

6.1.4. *ModelBuilder* y su automatización en *Arcgis Pro*.

6.1.4.1. Conceptos básicos de ModelBuilder.

ModelBuilder es una herramienta de ArcGIS que permite construir modelos mediante programación visual. Facilita la integración de herramientas, capas, datasets y otros datos conectados lógicamente dentro de un entorno gráfico (Esri, 2024c). Su diseño visual permite representar procesos complejos mediante diagramas comprensibles, mejorando la interpretación y comunicación de los análisis.

ModelBuilder automatiza y documenta los procedimientos, promoviendo la replicabilidad. Los modelos pueden convertirse en herramientas que se integran con scripts en Python, ampliando su aplicación en entornos especializados (Hidayat & Andajani, 2018; Esri, 2024c). Para construir un modelo se agregan herramientas y datos, y se define el orden de ejecución mediante conexiones lógicas (Esri, 2024d).

Para crear un modelo en ModelBuilder, se agregan herramientas y datos, y se establecen conexiones entre ellos para definir el orden de ejecución (Esri, 2024d). Los principales elementos del modelo son:

Herramientas de geoprocésamiento: Realizan operaciones sobre datos geográficos o tabulares. Cuando se añaden al modelo, se representan como rectángulos grises, indicando que aún no están listos para ejecutarse (Esri, 2024f). Se debe definir sus parámetros de entrada y salida.

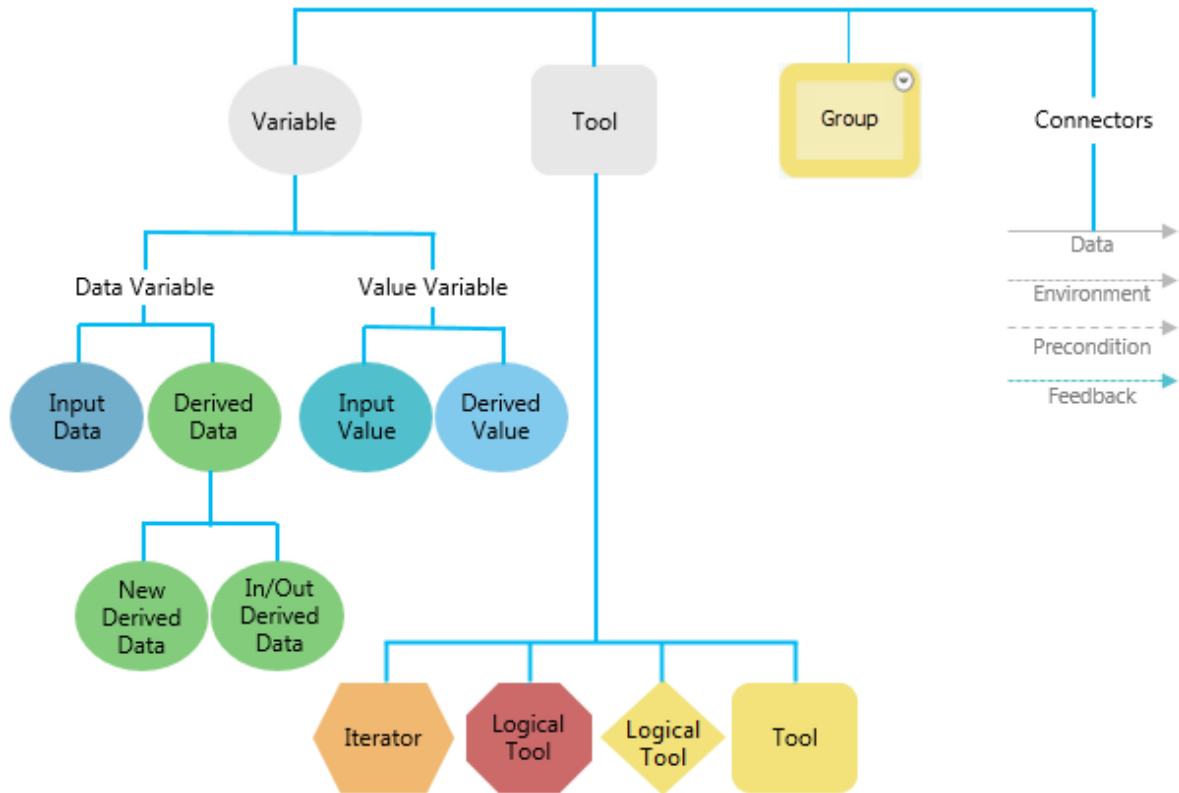
Variables: Contienen valores o referencias a datos, y pueden ser de datos o de valores. Se representan con óvalos azules y almacenan información descriptiva, como extensión espacial, sistema de coordenadas o ruta (Esri, 2024f).

Conectores: Enlazan variables y herramientas, indicando la dirección del flujo de datos o procesos. Existen cuatro tipos: datos, entorno, condición previa y retroalimentación (Esri, 2024e). Al conectar una salida de una herramienta con la entrada de otra, se dibuja una línea que indica el orden de ejecución.

Grupos: Agrupan herramientas relacionadas, permitiendo contraer o expandir su visualización para gestionar mejor el espacio de trabajo (Esri, 2024e).




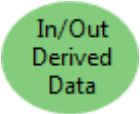
En la Figura 2, se observa los elementos que componen a un modelo con su simbología, mientras que en la Tabla 1, se explica con detalle cada uno de sus componentes.

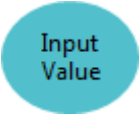





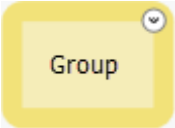
Figura 2
Clasificación de los elementos que componen el modelo



Nota. Fuente (Esri, 2024e).

Tabla 2
Descripción de los elementos de ModelBuilder

Elemento	Gráfico	Descripción
Variable de datos		Son elementos de modelo que almacenan rutas y otras propiedades de los datos. Entre las variables de datos más comunes se incluyen la clase de entidad, la capa de entidades, el dataset ráster y el espacio de trabajo.
		Son datos nuevos creados por una herramienta en el modelo. Cuando se agrega una herramienta de geoprocésamiento a un modelo, se crean automáticamente variables para los parámetros de salida de la herramienta y se conectan a la herramienta.
Variable de datos de salida o derivados		Crea un dataset que se escribe en el disco cuando se ejecuta el modelo.
		Modifica los datos de entrada cuando se ejecuta el modelo. Por defecto, la variable de datos derivados de entrada y salida tendrán el mismo nombre que los datos de entrada, pero con un número único incorporado al final.

Variable de valores		Son valores como cadenas de caracteres, números, booleanos (valores true/false), referencias espaciales, unidades lineales o extensiones. Las variables de valor contienen de todo excepto referencias a capas o a datos almacenados en el disco.
Variable de valor derivado		Los valores que son el resultado de una herramienta. Pueden ser entradas para otras herramientas.
Herramienta		Son las herramientas de geoprocésamiento que se agregan al modelo. Las herramientas de ModelBuilder también incluyen herramientas especiales, como iteradores, utilidades de ModelBuilder y herramientas de lógica de ModelBuilder. En el caso de Tool, son herramientas que resultan de gran utilidad para crear modelos y que solo funcionan dentro de ModelBuilder, no en scripts.
		Los iteradores son herramientas especiales solo de ModelBuilder que repiten la misma operación o bucle en un conjunto de datos o valores de entrada.
		Son herramientas especiales exclusivas de ModelBuilder que dividen el modelo en función de distintas condiciones.
		Se utilizan para controlar el flujo lógico de los modelos. Una de las herramientas de lógica es la herramienta Detener.
Grupo		Los grupos son categorías visuales que incluyen otros elementos en el modelo. Estos grupos se pueden expandir y contraer.

Nota. Fuente (Esri, 2024e).

Los modelos creados pueden exportarse como scripts de Python editables, que funcionan como herramientas independientes o pueden integrarse en otros procesos automatizados (Esri, 2024e).

6.1.4.2. Creación de flujos de trabajo automatizado

La automatización de procesos mediante ModelBuilder permite estructurar y ejecutar flujos de trabajo repetitivos de manera eficiente (Hidayat & Andajani, 2018). Esta funcionalidad es especialmente útil cuando se requiere procesar múltiples capas o archivos dentro de un mismo análisis, como clases de entidades, imágenes ráster o tablas, en un espacio de trabajo determinado

(Esri, 2024c). Además, la herramienta permite ejecutar modelos de forma secuencial, ya sea paso a paso o en su totalidad, facilitando el control sobre cada fase del procesamiento (Esri, 2024c).

Los modelos de geoprocésamiento se crean y modifican en ModelBuilder, en donde un modelo se representa como un diagrama que encadena secuencias de procesos y herramientas de geoprocésamiento, utilizando la salida de un proceso como entrada de otro (Esri, 2024c). Esta capacidad de automatización no solo optimiza el tiempo y recursos, sino que también contribuye a reducir errores humanos, mejorar la trazabilidad del análisis y garantizar la consistencia de los resultados (Esri, 2024c). Además, al permitir la personalización de modelos para diferentes contextos, ModelBuilder se convierte en un recurso flexible para abordar diversas problemáticas ambientales, sociales o territoriales (Hidayat & Andajani, 2018).

Para crear un flujo de trabajo en ModelBuilder, se deben seguir los siguientes pasos:

- Abrir ModelBuilder desde la pestaña de Análisis en el grupo Geoprocésamiento.
- Agregar los datos, ya sea arrastrándolos desde el contenido del mapa o desde el proyecto, lo que los mostrará como variables de datos de entrada.
- Añadir las herramientas de geoprocésamiento, mediante la búsqueda en el cuadro de diálogo "Agregar herramientas al modelo" o arrastrándolas desde el panel de Geoprocésamiento.
- Conectar datos y herramientas, especificando qué variables de datos del modelo se deben procesar y qué herramientas utilizar. Luego, seleccionar el parámetro de la herramienta que se conectará con la variable para dibujar la línea de conexión.
- Configurar los parámetros de cada herramienta, abriéndolas mediante doble clic y modificando los valores obligatorios para que funcionen correctamente en el modelo.
- Definir parámetros de modelo, haciendo clic derecho en cualquier variable y seleccionando "Parámetro", de modo que puedan ingresarse valores o datos específicos al ejecutar el modelo como herramienta.
- Ejecutar el modelo haciendo clic en el botón "Ejecutar" en la pestaña de ModelBuilder. Durante la ejecución, la herramienta en proceso se resaltará en rojo, y las variables de salida marcadas para visualización se agregarán al mapa activo.

Este proceso automatizado no solo ahorra tiempo y recursos, sino que también aumenta la precisión y la reproducibilidad del análisis (Hidayat & Andajani, 2018).

6.1.4.3. ArcGIS Pro

ArcGIS Pro es una aplicación de escritorio de sistemas de información geográfica (SIG) que ofrece herramientas para mantener datos espaciales de forma eficiente, generar visualizaciones, realizar análisis cartográficos avanzados y crear servicios web, con integración a otras plataformas como R (Esri, 2024a). Estas capacidades permiten identificar patrones, realizar predicciones y responder preguntas relacionadas con el análisis espacial.

El entorno de ArcGIS Pro proporciona un marco integrado de herramientas conocido como geoprocésamiento, utilizado para analizar datos espaciales y administrar información geográfica de manera automatizada (Esri, 2024b). Estas herramientas operan con datasets de entrada —como clases de entidad, ráster o tablas— para generar nuevos datasets de salida. Además, permiten configurar entornos de procesamiento y crear herramientas personalizadas para flujos de trabajo automatizados mediante ModelBuilder o Python (Esri, 2024b).

Las herramientas de geoprocésamiento constan de tres componentes principales (Zandbergen, 2015): ArcToolbox, que agrupa funciones analíticas organizadas en cajas de herramientas; ModelBuilder, que permite vincular herramientas para crear análisis integrados mediante diagramas visuales; y Python Window, donde se pueden escribir scripts personalizados.

ModelBuilder funciona como una interfaz gráfica para crear modelos sin necesidad de programar, mediante diagramas de flujo visuales que representan los procesos de forma comprensible y aplicable (Elghazoli et al., 2019). Esta automatización potencia el uso de ArcGIS Pro en la zonificación de riesgos, facilitando la identificación de áreas vulnerables, la simulación de escenarios futuros y el apoyo en la toma de decisiones en planificación territorial y gestión del riesgo (Elghazoli et al., 2019).

7. Metodología

Este trabajo se enmarca en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizados aquí como herramienta de apoyo para la zonificación de incendios, un componente esencial en la planificación de los planes de gestión del riesgo, tanto a nivel municipal como departamental.

Para su desarrollo, será necesaria la recolección y normalización de capas geográficas, lo que permitirá generar mapas de zonificación de amenazas de incendios forestales en el departamento del Tolima. La metodología adoptada es de enfoque cuantitativo y se orienta al diseño e implementación de un modelo automatizado en SIG que permitió zonificar el riesgo de incendios forestales en el departamento del Tolima. El modelo siguió los lineamientos del Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal propuesto por el IDEAM (2011), y fue implementado mediante la herramienta ModelBuilder del software ArcGIS Pro 3.3, optimizando así el análisis y procesamiento de datos espaciales.

A continuación, se presentan el enfoque metodológico, el tipo de estudio y el procedimiento desarrollado para alcanzar los objetivos propuestos.

7.1. Enfoque metodológico

Se adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en la recolección, transformación, normalización y ponderación de variables geoespaciales. Este proceso facilitó la construcción de un modelo automatizado que permitirá realizar la zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima, utilizando operaciones de álgebra de mapas y análisis multicriterio.

7.2. Tipo de estudio

La investigación que se realizó fue de tipo aplicada, ya que busco resolver una problemática concreta —la zonificación de riesgos de incendios forestales en el departamento del Tolima— mediante el desarrollo de una herramienta automatizada para la gestión del riesgo.

El diseño del estudio fue correlacional-descriptivo. El componente descriptivo se emplea en la caracterización de variables relacionadas con la amenaza de incendios (por ejemplo, cobertura

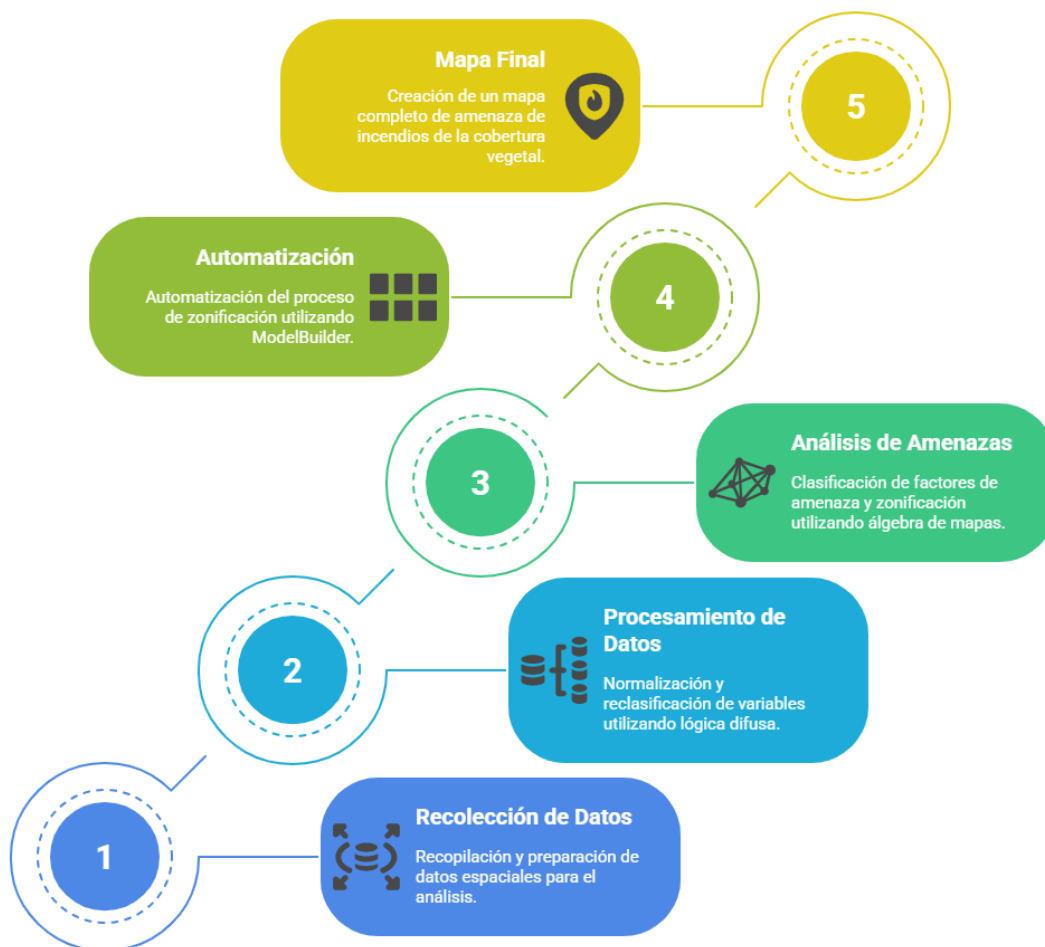
del suelo, clima y relieve), mientras que el componente correlacional analiza cómo dichas variables se relacionan con la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el territorio, en concordancia con el protocolo del IDEAM (2011).

7.3. Procedimiento metodológico

La metodología se estructura en las siguientes fases, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Procesamiento metodológico para la automatización y generación del mapa de amenaza a incendios forestales



Nota. Fuente Elaboración propia (adaptado de IDEAM, 2011).

7.3.1. Recolección y preparación de datos

7.3.1.1. Fuente de datos

En esta etapa se recopilaron los datos espaciales necesarios para la elaboración del mapa de amenaza por incendios forestales, conforme a los lineamientos técnicos del IDEAM (2021). Para ello, se accedió a distintos geoportales de instituciones oficiales, desde los cuales se descarga la información en formatos shapefile (vectorial) y GeoTIFF (raster), según corresponda a cada uno de los factores que integran los componentes de la amenaza.

Los insumos recopilados se detallan en el Anexo 1, donde se identifican las fuentes de información utilizadas, la etapa del proceso a la que pertenecen, una descripción de cada conjunto de datos, el factor de amenaza con el que se relacionan y su uso dentro del modelo. La Tabla 2 presenta un ejemplo de la estructura y contenido del Anexo 2.

Tabla 3

Ejemplo de la estructura y contenido de los insumos cartográficos para la elaboración del mapa de amenaza.

Etapa	Información requerida	Descripción	Factor	Fuente
Análisis de susceptibilidad	Cobertura de la tierra CLC	Cartografía actualizada de coberturas de la tierra según la clasificación Corine Land Cover (CLC) Año 2019 clasificados al tercer nivel. Escala 1:25.000, (<i>CoberturaTierra_CLC_2019</i>)	Mapa de susceptibilidad por tipo de combustible; mapa de susceptibilidad por carga de combustible; mapa de susceptibilidad por duración del combustible	CORTOLIMA

Fuente: Elaboración propia con base en IDEAM (2011).

7.3.1.2. Preprocesamiento

Luego de la recolección de las capas temáticas, se realizó la conversión de estas capas a formato ráster, mediante la herramienta “feature to raster”, ya que se trabaja de manera más fácil y visual en el análisis de álgebra de mapas, para poder determinar las zonas que tengan una mayor probabilidad de incendio. Es necesario generar la transformación de las capas temáticas siempre empleando los mismos parámetros de tamaño de píxel, el cual tendrá una resolución de 12.5 metros, tras este proceso, se continúa con la normalización por reclasificación y por lógica difusa.

7.3.2. *Procesamiento y análisis*

Los factores que constituyen una amenaza de incendios a la cobertura vegetal se clasificaron de acuerdo con el protocolo del IDEAM (2011). Para integrar adecuadamente los factores de riesgo, se utilizó una escala de riesgo (bajo, medio, alto). Esto puede cambiar la naturaleza de los datos, además, implica transformar estos datos categóricos en ordinales.

Así mismo, la integración de las variables en un índice único requiere que se pondere cada una de ellas en función de su importancia en la explicación de la ocurrencia del incendio. Para llevar a cabo este proceso de ponderación, fue necesario realizar procedimientos cualitativos basados en ponderaciones poder realizar una zonificación efectiva de los factores que generan el riesgo.

Para esto, se debieron construir jerarquías y se establecieron prioridades, utilizando análisis multicriterio para garantizar la consistencia lógica de las ponderaciones y reducir la subjetividad en su evaluación.

7.3.2.1. Normalización de variables y factores

La normalización de variables emplea lógica difusa para estandarizar escalas de medición diversas. Cada factor se transforma a un rango de 0-1 mediante la siguiente ecuación:

$$\textit{Factor normalizado} = \frac{x - \textit{Min}}{\textit{Max} - \textit{Min}}$$

Donde:

X = Valor observado de la variable

Min = Valor mínimo observado de la variable

Max = Valor máximo observado de la variable

Esta fórmula garantiza que los valores se comparen de manera estandarizada independientemente de sus magnitudes (IDEAM, 2011).

Posteriormente, estos valores se reclasifican en cinco categorías de riesgo mediante distribución de frecuencias, cuyo tamaño se determina a partir de la amplitud de los valores generados mediante la siguiente ecuación:

$$\textit{Amplitud del rango} = \frac{\textit{Max}_1 - \textit{Min}_1}{n}$$

Donde:

Max_1 = valor máximo del rango de datos

Min_1 = valor mínimo del rango de datos

n = número de intervalos de clase

De esta manera se define el tamaño de cada clase en que se agruparán los datos (IDEAM, 2011).

Cada uno de los rangos de amenaza se le asigna una clasificación que permite realizar comparaciones entre las unidades de análisis de las variables, incluso cuando se encuentran en diferentes tipos de unidades de medida. A continuación, se presenta una tabla que ilustra esta clasificación:

Tabla 4

Rangos y categorías de clasificación.

Calificación	Categoría
0	Sin riesgo
1	Muy Baja
2	Baja
3	Moderada
4	Alta
5	Muy alta
6	Sin información

Nota. Fuente Zonificación de amenaza por incendios forestales según criterios del IDEAM (2011, p. 23).

7.3.2.2. Ponderación de variables y factores

Después de normalizar las variables, se estructuran los factores mediante un sistema de ponderación basado en la consulta a expertos, a través del método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Thomas Saaty, que organiza el problema en una jerarquía. Este método estructurado permite la toma de decisiones multicriterio. El proceso facilita el análisis de amenaza ante los incendios, desglosando cada componente en una matriz de comparación y mostrando su contribución al objetivo final mediante una escala de 1 a 9 que refleja la importancia de cada elemento. En la siguiente ecuación se muestra los pesos para cada una de las variables que influyen sobre la amenaza a incendios forestales:

$$\begin{aligned} \text{Amenaza} = & \textit{Susceptibilidad de la vegetación} \times (0.17) + \textit{Precipitación} \times (0.20) \\ & + \textit{Temperatura} \times (0.20) + \textit{Pendientes} \times (0.07) + \textit{Frecuencia} \times (0.10) \\ & + \textit{Accesibilidad} \times (0.10) + \textit{Vientos} \times (0.10) \\ & + \textit{Radiación solar} \times (0.07) \end{aligned}$$

Donde:

- Susceptibilidad de la vegetación = grado de inflamabilidad del tipo de cobertura vegetal
- Precipitación = cantidad de lluvia registrada en la zona
- Temperatura = temperatura media del área de estudio
- Pendientes = inclinación del terreno, que influye en la propagación del fuego
- Frecuencia = recurrencia histórica de incendios en el área
- Accesibilidad = facilidad de acceso humano, que puede incrementar el riesgo de ignición
- Vientos = velocidad y dirección predominante del viento
- Radiación solar = intensidad de energía solar que favorece la desecación de la vegetación

Cada variable tiene un peso relativo en la ecuación según su influencia en la probabilidad de incendio (IDEAM, 2011).

7.3.3. Factores de amenaza

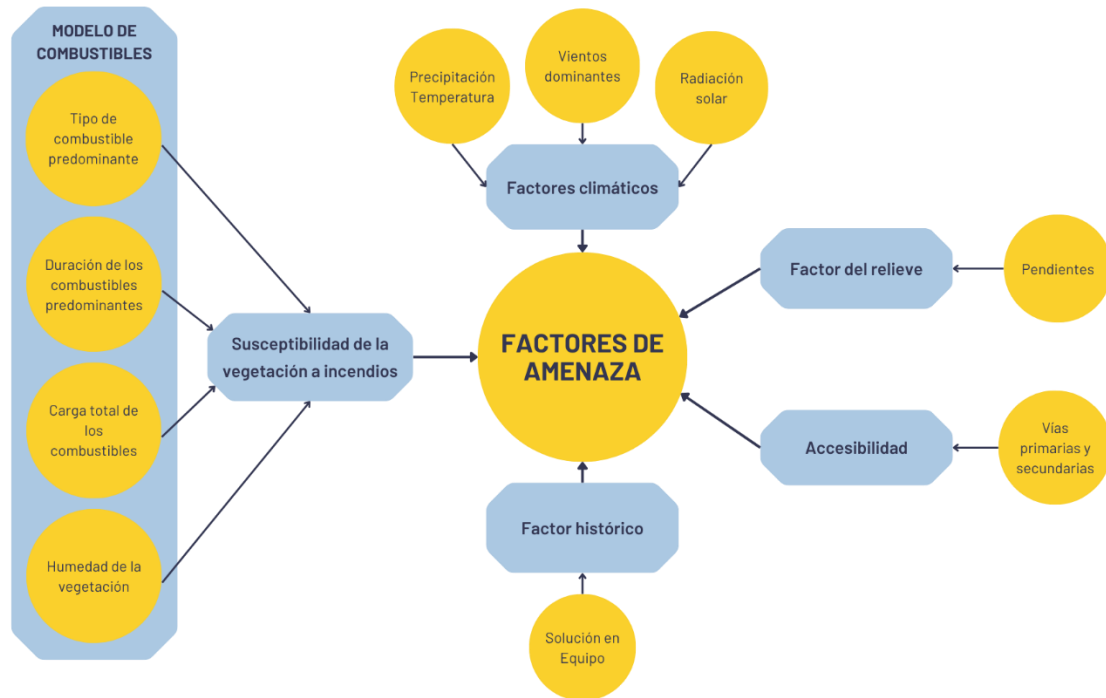
Una vez obtenida la información espacial correspondiente a cada uno de los factores de amenaza por incendios en el área de estudio, se procedió a su clasificación individual. Estas clasificaciones se realizaron conforme a los lineamientos establecidos en el protocolo del IDEAM (2011).

La zonificación de la amenaza se fundamenta en la asignación de calificaciones y ponderaciones a cada factor evaluado, las cuales se integran mediante operaciones de álgebra de mapas. Este proceso permite generar una suma ponderada que representa el índice de amenaza total a incendios sobre la cobertura vegetal.

En la Figura 4, se presenta el diagrama que ilustra la interrelación entre los distintos factores que contribuyen a la amenaza de incendios en la cobertura vegetal.

Figura 4.

Representación gráfica de los componentes de la amenaza.



Nota. Fuente Adaptado de IDEAM (2011, p. 27).

7.3.3.1. Susceptibilidad de la vegetación

La clasificación, calificación y categorización de la susceptibilidad de la vegetación a incendios —considerada un factor clave dentro del análisis de amenaza— se realiza a partir del análisis de la condición pirogénica de la vegetación colombiana, utilizando como base el modelo de combustibles propuesto por Páramo (2007).

Este modelo se estructura jerárquicamente y contempla tres factores principales que determinan el comportamiento del combustible vegetal ante el fuego:

- Tipo de combustible vegetal predominante, definido según el bioma, ecosistema y tipo de cobertura vegetal.
- Duración del combustible dominante, expresada en horas de ignición (1 h, 10 h y 100 h), lo que indica el tiempo necesario para que el material vegetal se encienda.
- Carga total de combustibles, determinada de manera cualitativa mediante la correlación entre la altura de la vegetación (en metros), el porcentaje de cobertura y la biomasa aérea (Ton/ha).

Una vez se han calificado estos factores y generado los respectivos mapas temáticos (tipo, duración y carga), se realizó su integración mediante álgebra de mapas, multiplicando los valores

correspondientes de cada capa. El resultado es un mapa de susceptibilidad bruta, que posteriormente se clasificó en cinco niveles mediante una distribución de frecuencias.

Cada nivel recibe una calificación ordinal entre 0 y 5, a la que se le asigna una categoría de susceptibilidad, desde sin riesgo (valor 0) hasta muy alta (valor 5), conforme a la siguiente ecuación:

$$SUSC = CAL(tc) + CAL(dc) + CAL(ct)$$

Donde:

- $CAL(tc)$ = calificación del tipo de cobertura
- $CAL(dc)$ = calificación de la densidad de cobertura
- $CAL(ct)$ = calificación de la condición del terreno

Esta medida permite establecer el nivel de vulnerabilidad de la cobertura vegetal ante un posible incendio (IDEAM, 2011).

7.3.3.2. Factores climáticos

El clima es un factor determinante en la generación y propagación de incendios forestales, ya que incide directamente en la duración y severidad de las estaciones secas y cálidas en una región. Estas condiciones climáticas afectan la humedad del entorno y, por ende, la cantidad y disponibilidad del combustible vegetal. Una menor humedad incrementa la inflamabilidad de la vegetación, facilitando la ignición y acelerando la propagación del fuego. Por estas razones, las variables climáticas constituyen un componente indispensable en la evaluación de la amenaza por incendios forestales.

Entre los factores climáticos con mayor incidencia se encuentran la temperatura media multianual y la precipitación media multianual, tanto bajo condiciones normales como bajo la influencia de eventos extremos como el Fenómeno de El Niño. Adicionalmente, pueden considerarse variables complementarias como la radiación solar y los vientos dominantes, cuya inclusión en el análisis resulta útil dependiendo del contexto específico del área de estudio.

Dada su relevancia, es necesario realizar una calificación de las variables climáticas basada en los valores promedio de temperatura y precipitación registrados en Colombia (Páramo, 2010). Para ello, se genera un conjunto de mapas temáticos que representan la distribución espacial de estas variables, empleando la metodología aplicada para la calificación de la susceptibilidad.

La información utilizada proviene de los registros climáticos del IDEAM (2007), que caracterizan los ecosistemas colombianos con base en datos históricos de precipitación, temperatura, vientos y radiación solar.

7.3.3.3. Relieve

La propagación del fuego se ve directamente influenciada por el ángulo de inclinación del terreno. En particular, el avance del incendio es más rápido y peligroso cuando se produce en dirección ascendente, es decir, a favor de la pendiente. Esto se debe a que el calor se transfiere más fácilmente hacia arriba, presecando e inflamando el combustible vegetal con mayor rapidez. Por esta razón, los incendios forestales no ocurren de manera aleatoria, sino que tienden a concentrarse en determinadas configuraciones topográficas.

Con el fin de incorporar este factor en la evaluación de la amenaza, se genera un mapa de pendientes a partir de un modelo digital de elevación del terreno. Este mapa, expresado inicialmente en grados, es reclasificado por rangos de porcentaje de pendiente, a los cuales se les asignan calificaciones y categorías específicas que reflejan el grado de influencia del relieve en la propagación del fuego.

El resultado de este proceso es un mapa de amenaza por pendiente, que permite identificar las zonas más propensas a favorecer la propagación del incendio debido a las características topográficas del terreno.

7.3.3.4. Factor histórico

A partir de los registros de incendios forestales obtenidos mediante el sistema FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA, correspondientes al periodo 2014–2024, se construyó una base de datos espacial basada en los focos de calor detectados por el sensor VIIRS versión C2, a bordo del satélite Suomi NPP. Esta información permitió generar una nube de puntos con la distribución anual de eventos de incendio en el departamento del Tolima, la cual fue delimitada mediante la aplicación de un buffer de 50 km alrededor de los límites departamentales, a fin de incluir eventos cercanos con posible influencia en el territorio.

Sobre esta nube de puntos se aplicó el geoprocesamiento de Densidad Kernel, utilizando un tamaño de celda de 12.5 m y unidades de análisis en kilómetros cuadrados (km²), a través del software ArcGIS Pro. Esta técnica permite modelar la densidad espacial de eventos puntuales, estimando para cada celda el valor de densidad con base en la cantidad y proximidad de puntos

cercanos, lo que genera superficies continuas que representan la concentración espacial de los incendios (Fuenzalida et al., 2013).

Para garantizar la confiabilidad del análisis, se incluyeron únicamente los registros clasificados con un alto nivel de confianza. Esta aproximación posibilita identificar patrones espacio-temporales en la ocurrencia de incendios durante la última década y delimitar áreas prioritarias para la aplicación y validación de la metodología de zonificación de amenaza propuesta por el IDEAM (2011).

Una vez calculados los índices de densidad, los datos son sometidos a un proceso de normalización, seguido de su calificación y categorización, con el objetivo de integrarlos de manera coherente en el análisis espacial de amenaza por incendios forestales.

7.3.3.5. Accesibilidad

La accesibilidad se considera parte de la amenaza a incendios de la cobertura vegetal, debido a que es un factor determinante en la probabilidad de que la población pueda acceder a las áreas con coberturas vegetal susceptibles y generar focos de incendios.

Para el análisis por la cercanía a las vías se debe realizar a partir del mapa vial (vías principales y secundarias), la generación de 4 buffers (cada uno de 500 m de ancho a lado y lado); una vez generados los buffers, se procede a su calificación (la cual toma valores entre 1 y 5), teniendo como base la facilidad de acceso a las distintas coberturas teniendo como parámetro la distancia de estas a las vías.

7.3.4. Mapa de amenaza a incendios de la cobertura vegetal

Con la información generada durante los pasos anteriores según el protocolo del IDEAM (2011), mediante procesos de álgebra de mapas se genera una suma ponderada la cual equivale a la amenaza total a incendios de la cobertura vegetal, la cual se muestra en la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Amenaza} = & \text{Susceptibilidad de la vegetación} * (0,17) + \text{Precipitación} * (0,20) \\ & + \text{Temperatura} * (0,20) + \text{Pendientes} * (0,07) + \text{Frecuencia} * (0,10) \\ & + \text{Accesibilidad} * (0,10) + \text{Vientos} * (0,10) + \text{Radiación Solar} * (0,07) \end{aligned}$$

Una vez realizada la respectiva suma ponderada, se procede a realizar una distribución de frecuencias en 5 rangos para así llegar a categorizar el grado de amenaza entre “muy baja” (rango menor) a “muy alta” (rango mayor).

7.3.5. *Desarrollo del modelo de automatización*

La automatización del proceso se llevará a cabo en el software ArcGIS Pro 3.3, utilizando la herramienta Model Builder. Esta aplicación permite integrar funciones de geoprocamiento dentro de un modelo que registra de forma sistemática los conjuntos de datos, procesos, parámetros y supuestos utilizados (Zhu, 2010). Esta característica facilita tanto la repetición del procedimiento como la modificación de datos y parámetros en futuras ejecuciones (Zhu, 2010).

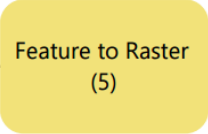
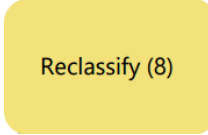
En el presente caso, la secuencia de procesos será organizada tomando como base el modelo conceptual propuesto por Flores Garnica et al. (2016). A partir de dicho modelo, se construirá un modelo físico que incluirá la reclasificación de las capas temáticas por variable, asignando los valores correspondientes según las ponderaciones establecidas. Posteriormente, se realizará la combinación de variables dentro de cada componente y, finalmente, la integración de las capas por categoría utilizando los pesos derivados del método de comparación por pares de Saaty.

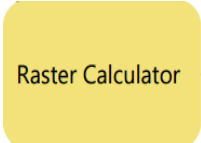

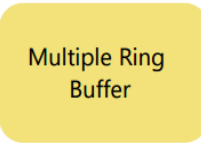
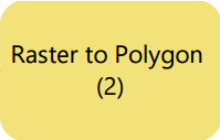
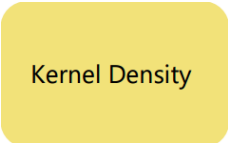
Esta estructura permitirá consolidar un modelo automatizado de zonificación de la amenaza por incendios forestales, conforme a los lineamientos técnicos definidos por el IDEAM (2011).

Las herramientas de geoprocamiento requeridas para el proceso de automatización, son las siguientes:

Tabla 5

Geoprocamos utilizados en el proceso de automatización de la zonificación de amenazas por incendios forestales.

Elemento	Gráfico	Descripción
De entidad a Raster		Esta herramienta permite convertir entidades o objetos vectoriales a formato raster, dando como resultado una representación matricial de datos espaciales, para el caso de estudio al ser un análisis de zonificación es necesario trabajar con datos raster, integrando los datos vectoriales en análisis basados en raster.
Reclasificar		Esta herramienta se usa para cambiar los valores de un raster, el resultado final es la reasignación de uno o más valores de un conjunto de datos rasterizados a nuevos valores de salida.

Calculadora raster		Esta herramienta permite crear y ejecutar expresiones de álgebra de mapas, con la cual se puede ejecutar operadores y funciones de análisis espacial.
Pendiente		Esta herramienta permite calcular la inclinación o pendiente en cada celda de una superficie de raster.
Áreas de influencia múltiple		Esta herramienta permite crear áreas de influencia de un objeto (punto, una línea o un polígono), bajo parámetros específicos de distancias, facilitando la interpretación y análisis espacial.
Raster a polígono		Esta herramienta permite convertir capas raster a capas de entidades vectoriales, es decir, toma los píxeles y los convierte en polígonos.
Kernel density		Esta herramienta permite calcular la densidad de entidades en un área determinada, dando como resultado la representación de la cantidad de puntos en un lugar determinado.

Nota. Fuente Elaboración propia

8. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para este estudio, permitiendo analizar los principales elementos que inciden en la ocurrencia de incendios forestales en el departamento del Tolima, tomando como base el protocolo del IDEAM (2011). Para ellos se llevó a cabo la categorización de los factores de amenaza, la construcción de un modelo automatizado en entorno SIG a partir de la aplicación de ModelBuilder, y finalmente, se generaron los mapas de susceptibilidad y amenaza para cada uno de los factores, en donde se refleja la distribución espacial de las categorías de amenaza dentro del territorio.

A continuación, se presentan los resultados organizados en tres apartados: la categorización de los componentes y variables utilizadas, el diseño y automatización del modelo, y la zonificación de amenaza a incendios forestales.

8.1. Categorización de los componente y variables

En esta primera parte se presenta la categorización y clasificación de los factores que inciden en la amenaza por incendios forestales. Siguiendo los lineamientos técnicos del protocolo del IDEAM (2011), estas variables están divididas en susceptibilidad de la vegetación, factores climáticos, pendientes, accesibilidad y factores históricos.

Cada apartado fue analizado de manera individual, asignándole rangos, categorías de amenaza y valores normalizados, como se verá a continuación. Los resultados se presentarán de forma detallada por cada factor.

8.1.1. *Susceptibilidad de la vegetación a incendios*

La susceptibilidad de la vegetación se evaluó mediante la identificación y calificación de la condición pirotécnica de la cobertura de la tierra en el departamento del Tolima, con base en el modelo de combustibles desarrollado para Colombia por Páramo (2007). Para ello, se utilizó la información geográfica de coberturas del suelo clasificada bajo la metodología Corine Land Cover (CLC), a escala 1:25.000.

La reclasificación de las coberturas se realizó con el objetivo de determinar tres factores: tipo de combustible, duración del combustible y carga total de combustible. Estos factores componen un modelo jerárquico de susceptibilidad, estructurado de la siguiente manera:

8.1.1.1. Tipo de Combustibles

El tipo de combustible predominante se relaciona con la facilidad de combustión de la vegetación, considerando factores como la cantidad de biomasa, el contenido de humedad y la composición química (Parra Lara, 2011). Según el modelo de Páramo (2007), los combustibles se agrupan en:

Combustibles ligeros: pastos, hierbas, hojas, ramillas, líquenes, etc. Se inflaman con facilidad y se consumen rápidamente cuando están secos.

Combustibles pesados: troncos, ramas gruesas, raíces, etc. Se inflaman con mayor dificultad y arden más lentamente.

La clasificación asigna una calificación y categoría de susceptibilidad a cada tipo de cobertura. (Tabla 6).

Tabla 6
Calificación y categorización según tipo de combustible

Tipo de cobertura	Tipo de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad
Suelos desnudos, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	0	Sin riesgo
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	Árboles	1	Muy Baja
Bosques fragmentados	Árboles/arbustos	2	Baja
Arbustales	Arbustos	3	Moderada
Arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado	Arbustos/Hierbas árboles/hierbas pastos/hierbas/arbustos/árboles	– – 3	Moderada
Herbazales y cultivos herbáceos	Hierbas/ cultivos herbáceos	4	Alta
Pastos enmalezados	Hierbas – Pastos	5	Muy alta
Pastos limpios y zonas verdes urbanas	Pastos – zonas verdes urbanas	5	Muy alta
Zonas con presencia de nubes o sombras	Sin información	6	Sin información

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

De acuerdo con esta clasificación, los tipos de cobertura menos resistentes a los procesos de combustión corresponden a cultivos y zonas de pastos con baja capacidad de retención de agua, lo que los hace más susceptibles durante un incendio. Con base en esta información, el protocolo del IDEAM asigna a cada tipo de Cobertura Vegetal Nivel 3 una calificación según su tipo de combustible. En la Tabla 6 se presentan los distintos tipos de cobertura presentes en el departamento del Tolima, junto con su respectiva calificación y categorización según el combustible predominante.

Tabla 7

Reclasificación del tipo de combustible, según nivel 3.

Tipo de cobertura (Nivel 3)	Tipo de combustible	Calificación
1.1.1. Tejido urbano continuo	Áreas urbanas	0
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Áreas urbanas	0
1.1.3 Construcciones Rurales	No combustibles	0
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	No combustibles	0
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos	No combustibles asociados	0
1.2.4. Aeropuertos	No combustibles	0
1.2.5. Obras hidráulicas	No combustibles	0
1.3.1. Zonas de extracción minera	No combustibles	0
1.3.2. Zona de disposición de residuos	No combustibles	0
1.4.1. Zonas verdes urbanas	Pastos	5
1.4.2. Instalaciones recreativas	Pastos	5
2.1.1. Otros cultivos transitorios	Hierbas	4
2.1.2. Cereales	Hierbas	4
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	Hierbas	4
2.1.4. Hortalizas	Hierbas	4
2.1.5. Tubérculos	Hierbas	4
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	Hierbas	4
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	Arbustos	3
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	Árboles	1
2.2.4. Cultivos agroforestales	Pastos	3
2.2.5. Cultivos confinados	Hierbas	4
2.3.1. Pastos limpios	Pastos	5

2.3.2. Pastos arbolados	Pastos	5
2.3.3. Pastos enmalezados	Pastos/hierbas	5
2.4.1. Mosaico de cultivos	Hierbas	4
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Pastos/hierbas	5
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Pastos/hierbas/arbustos/árboles	3
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Pastos/hierbas/arbustos/árboles	3
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	Pastos/hierbas/arbustos/árboles	3
3.1.1. Bosque denso	Árboles	1
3.1.2. Bosque abierto	Arboles	1
3.1.3. Bosque fragmentado	Árboles	2
3.1.4. Bosque de galería y ripario	Árboles	1
3.1.5. Plantación forestal	Árboles	1
3.2.1. Herbazal	Hierbas	4
3.2.2. Arbustal	Arbustos	3
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	Arboles/arbustos	2
3.3.1. Zonas arenosas naturales	No combustibles	0
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles	0
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	No combustibles	0
3.3.4. Zonas quemadas	No combustibles	0
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles	0
4.1.1. Zonas pantanosas	Hierbas	4
4.1.2. Turberas	Hierbas	4
4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	Hierbas	4
5.1.1. Ríos (50 m)	No combustibles	0
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles	0
5.1.3. Canales	No combustibles	0
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	No combustibles	0

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.1.2. Duración de Combustibles

La duración del combustible se asocia al tiempo requerido para que su contenido de humedad se equilibre con la humedad ambiental, lo cual influye directamente en el tiempo de ignición y la peligrosidad del incendio (Páramo, 2011). En este sentido, esta variable se clasifica

de acuerdo a la duración del proceso de ignición que tiene cada tipo de cobertura, como se muestra en la Tabla 7. Esta duración depende de diferentes tipos de características, como la humedad y el área foliar (Parra Lara, 2011).

Tabla 8

Calificación y categorización según la duración del combustible.

Tipo de cobertura	Tipo de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	0	Sin riesgo
Zonas verdes urbanas / pastos limpios	1 hora	1	Baja
Herbazales / cultivos herbáceos / pastos enmalezados	1 hora	1	Baja
Arbustal abierto / herbazal con arbustos y/o arbolado	10 horas	2	Moderada
Arbustales / mosaicos con espacios naturales	10 horas	2	Moderada
Bosques fragmentados	100 horas	3	Alta
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	100 horas	3	Alta
Zonas en las que no se tiene información por presencia de nubes o sombras)	Sin información	6	Sin información

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

Por medio de esta categorización, se realizó la reclasificación de la Cobertura vegetal, según su tipo de cobertura en el nivel 3, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 9

Reclasificación según la Duración de Combustibles.

Tipo de cobertura (Nivel 3)	Duración de combustible	Calificación
1.1.1. Tejido urbano continuo	No combustibles	0
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	No combustibles	0
1.1.3 Construcciones Rurales	No combustibles	0
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	No combustibles	0
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos	No combustibles	0
1.2.4. Aeropuertos	No combustibles	0

1.2.5. Obras hidráulicas	No combustibles	0
1.3.1. Zonas de extracción minera	No combustibles	0
1.3.2. Zona de disposición de residuos	No combustibles	0
1.4.1. Zonas verdes urbanas	1 hora	1
1.4.2. Instalaciones recreativas	1 hora	1
2.1.1. Otros cultivos transitorios	10 horas	2
2.1.2. Cereales	10 horas	2
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	10 horas	2
2.1.4. Hortalizas	10 horas	2
2.1.5. Tubérculos	10 horas	2
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	10 horas	2
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	10 horas	2
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	100 horas	3
2.2.4. Cultivos agroforestales	10 horas	2
2.2.5. Cultivos confinados	1 hora	1
2.3.1. Pastos limpios	1 hora	1
2.3.2. Pastos arbolados	1 hora	1
2.3.3. Pastos enmalezados	1 hora	1
2.4.1. Mosaico de cultivos	10 horas	2
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	10 horas	2
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	10 horas	2
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	10 horas	2
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	10 horas	2
3.1.1. Bosque denso	100 horas	3
3.1.2. Bosque abierto	100 horas	3
3.1.3. Bosque fragmentado	100 horas	3
3.1.4. Bosque de galería y ripario	100 horas	3
3.1.5. Plantación forestal	100 horas	3
3.2.1. Herbazal	10 hora	2
3.2.2. Arbustal	10 horas	2
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	10 horas	2
3.3.1. Zonas arenosas naturales	No combustibles	0
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles	0

3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	No combustibles	0
3.3.4. Zonas quemadas	No combustibles	0
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles	0
4.1.1. Zonas pantanosas	1 hora	1
4.1.2. Turberas	1 hora	1
4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	1 hora	1
5.1.1. Ríos (50 m)	No combustibles	0
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles	0
5.1.3. Canales	No combustibles	0
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	No combustibles	0

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.1.3. Carga Total de Combustibles

Corresponde al peso estimado de biomasa disponible por hectárea, considerando variables como la altura, densidad, cobertura y contenido de humedad de la vegetación (Páramo, 2011). Se expresa en toneladas por hectárea (ton/ha), y su clasificación se presenta en la Tabla 9.

Tabla 10

Calificación y categorización según la carga total de combustible.

Tipo de cobertura	Tipo de carga total de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y todas aquellas coberturas no naturales	No combustibles	0	Sin riesgo
Zonas verdes urbanas	<1 ton/ha	1	Baja
Herbazales / cultivos herbáceos / pastos enmalezados / pastos limpios	1-50 ton/Ha	2	Moderada
Arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado	50 a 100 ton/Ha	3	Alta
Arbustos	50 a 100 ton/ha	3	Alta
Bosques fragmentados	>100 ton/ha	4	Muy alta
Bosques densos y abiertos, altos y bajos	>100 ton/Ha	4	Muy alta
Sin información (zonas en las que no se tiene información por presencia de nubes o sombras)	Sin información	6	Sin información

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

De acuerdo a la categorización anterior, se realizó la reclasificación de la cobertura vegetal, según su tipo de combustible, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 11
Reclasificación según la carga total de combustible.

Tipo de cobertura (Nivel 3)	Carga total de combustible	Calificación
1.1.1. Tejido urbano continuo	No combustibles	0
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	No combustibles	0
1.1.3 Construcciones Rurales	No combustibles	0
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	No combustibles	0
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos	No combustibles	0
1.2.4. Aeropuertos	No combustibles	0
1.2.5. Obras hidráulicas	No combustibles	0
1.3.1. Zonas de extracción minera	No combustibles	0
1.3.2. Zona de disposición de residuos	No combustibles	0
1.4.1. Zonas verdes urbanas	Menos de 1 ton	1
1.4.2. Instalaciones recreativas	1-50 ton/ha	2
2.1.1. Otros cultivos transitorios	1-50 ton/ha	2
2.1.2. Cereales	1-50 ton/ha	2
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	1-50 ton/ha	2
2.1.4. Hortalizas	1-50 ton/ha	2
2.1.5. Tubérculos	1-50 ton/ha	2
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	1-50 ton/ha	2
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	50-100 ton/ha	3
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	más de 100 ton/ha	4
2.2.4. Cultivos agroforestales	50-100 ton/ha	3
2.2.5. Cultivos confinados	1-50 ton/ha	2
2.3.1. Pastos limpios	1-50 ton/ha	2
2.3.2. Pastos arbolados	1-50 ton/ha	2
2.3.3. Pastos enmalezados	1-50 ton/ha	2
2.4.1. Mosaico de cultivos	1-50 ton/ha	2
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	1-50 ton/ha	2

2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	50-100 ton/ha	3
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	50-100 ton/ha	3
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	50-100 ton/ha	3
3.1.1. Bosque denso	más de 100 ton/ha	4
3.1.2. Bosque abierto	más de 100 ton/ha	4
3.1.3. Bosque fragmentado	más de 100 ton/ha	4
3.1.4. Bosque de galería y ripario	más de 100 ton/ha	4
3.1.5. Plantación forestal	más de 100 ton/ha	4
3.2.1. Herbazal	1-50 ton/ha	2
3.2.2. Arbustal	50-100 ton/ha	3
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	50-100 ton/ha	3
3.3.1. Zonas arenosas naturales	No combustibles	0
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles	0
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	No combustibles	0
3.3.4. Zonas quemadas	No combustibles	0
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles	0
4.1.1. Zonas pantanosas	1-50 ton/ha	2
4.1.2. Turberas	1-50 ton/ha	2
4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	1-50 ton/ha	2
5.1.1. Ríos (50 m)	No combustibles	0
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles	0
5.1.3. Canales	No combustibles	0
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	No combustibles	0

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.1.4. Susceptibilidad de la vegetación a Incendios

Una vez asignadas las calificaciones correspondientes y generados los mapas de tipo, duración y carga de combustibles, se procedió a combinar estos insumos mediante la herramienta de álgebra de mapas. El resultado se clasifica en cinco niveles utilizando una distribución de frecuencias, y a cada grupo se le asignó una calificación que varía entre 0 (nivel más bajo) y 5 (nivel más alto). Estas calificaciones se asocian con categorías de susceptibilidad al fuego, que van desde "sin riesgo" (valor 0) hasta "muy alta" (valor 5). De acuerdo con los datos obtenidos, en la

Tabla 11 se presenta la distribución de frecuencias junto con su respectiva calificación y categorización.

Tabla 12

Clasificación y categorización mediante la distribución de frecuencias para obtener el Mapa de Susceptibilidad

5 Niveles (CAL(tc)+CAL(dc)+CAL(ct))	Calificación	Categoría Susceptibilidad
0 - 5	1	Muy Baja
5 - 6	2	Baja
6 - 7	3	Moderada
7 - 8	4	Alta
8 - 9	5	Muy Alta

Nota. Fuente Elaboración propia, basado en el protocolo del IDEAM (2011).

7.1.2. Factores climáticos

El clima va a determinar la duración y severidad de las estaciones secas y calurosas de la zona de estudio (IDEAM, 2011). La ponderación de las variables se realiza mediante la distribución de frecuencias de cada uno de los factores climáticos que caracterizan climáticamente a los ecosistemas colombianos (IDEAM, 2007), ajustando las variables de categorización a cada uno de los conjuntos de datos.

Cada factor climático se categoriza y califica según los parámetros del protocolo del IDEAM (2011), con base en su distribución de frecuencias (Ver Tablas del 13-16). Se evaluaron las siguientes variables:

7.1.2.1. Precipitación media anual

Tabla 13

Calificación y categorización por Precipitación Media Anual en milímetros

Precipitación Media Anual (mm)	Tipo de humedad	Calificación	Categoría de Amenaza
>7000	Pluvial	1	Muy Baja
3000 – 7000	Muy Húmedo	2	Baja
2000 – 3000	Húmedo	3	Moderada
1000 – 2000	Seco	4	Alta

0 – 1000	Muy Seco	5	Muy Alta
----------	----------	---	----------

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.2.2. Temperatura media anual

Tabla 14

Calificación y categorización por Temperatura media anual

Temperatura media anual (°C)	Calificación	Categoría de Amenaza
<6°	1	Muy Baja
6° - 12°	2	Baja
12° - 18°	3	Moderada
18° - 24°	4	Alta
>24°	5	Muy Alta

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.2.3. Radiación media anual

Tabla 15

Categorización por Radiación media anual

Radiación media anual (KWh/m ² /año)	Calificación	Categoría de Amenaza
<3,0	1	Muy Baja
3,0 – 4,0	2	Baja
4,0 – 5,0	3	Moderada
5,0 – 6,0	4	Alta
>6,0	5	Muy Alta

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.2.4. Velocidad media multianual del viento

Tabla 16

Categorización por velocidad media multianual del viento

Velocidad media multianual del viento (m/s)	Calificación	Categoría de Amenaza
<2,0	1	Muy Baja
2,0 – 3,0	2	Baja
3,0 – 4,0	3	Moderada
4,0 – 5,0	4	Alta

>5,0	5	Muy Alta
------	---	----------

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.3. Factor del relieve

El relieve del terreno influye significativamente en la propagación y el comportamiento del fuego, ya que, a mayor inclinación de la ladera, mayor será la velocidad de propagación del fuego (IDIGER, 2017). El mapa de pendientes se generó a partir del modelo digital del terreno, con una resolución espacial de 12.5 metros. Posteriormente, se realizó una reclasificación basada en la distribución de frecuencias de los grados de pendiente presentes en el departamento del Tolima. Finalmente, se asignaron calificaciones y categorías, como se detalla en la Tabla 15.

Tabla 17

Categorización por factor de pendientes

Grados de pendiente	Clasificación Pendiente (%)	Calificación	Categoría de Amenaza
0 – 3,15	0 – 7	1	Muy Baja
3,16 – 5,40	7 – 12	2	Baja
5,41 – 11,25	12 – 25	3	Moderada
11,26 – 33,75	25 – 75	4	Alta
>33,76	>75	5	Muy Alta

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.4. Factor histórico

La evaluación del factor histórico se basó en el análisis de densidad de puntos de calor mediante la estimación de densidad de Kernel, utilizando datos satelitales. La densidad resultante se reclasificó en cinco categorías de amenaza, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 18

Categorización por densidad Kernel

Estimación de Densidad Kernel (KDE)	Calificación	Categoría de Amenaza
< 0.0179	1	Muy Baja
0.0179 - 0.0358	2	Baja
0.0358 - 0.0538	3	Moderada

0.05378 - 0.0717	4	Alta
>0.0717	5	Muy Alta

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.5. Accesibilidad

Este factor representa la facilidad de acceso de la población a las áreas forestales, lo cual incrementa la probabilidad de generación de focos de incendio. Utilizando la información de vías primarias y secundarias suministrada por el IGAC, se generaron zonas de influencia (buffers) cada 500 metros, con el objetivo de establecer diferentes categorías de amenaza. Con base en la proximidad de las coberturas vegetales a las vías de acceso, se definieron los niveles de amenaza, como se detalla en la Tabla 17.

Tabla 19

Categorización por susceptibilidad por accesibilidad

Distancia a la vía (ancho del buffer en m)	Calificación	Categoría de Amenaza
>2000	1	Muy Baja
1500 – 2000	2	Baja
1000 – 1500	3	Moderada
500 – 1000	4	Alta
0 – 500	5	Muy Alta

Nota. Fuente Adaptado IDEAM (2011).

7.1.6. Amenaza Total a incendios de la cobertura vegetal

Finalmente, se realizó una integración de todos los factores mediante un análisis de suma ponderada en la Calculadora Raster, asignando pesos conforme al protocolo del IDEAM (2011). Posteriormente, se procedió a realizar una distribución de frecuencias en 5 rangos para así llegar a categorizar el grado de amenaza entre “muy baja” (rango menor) a “muy alta” (rango mayor), como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 20

Normalización y categorización de la amenaza total

Índice de frecuencia de Amenaza	Calificación	Categoría de Amenaza
1.680 - 2.226	1	Muy Baja

2.226 - 2.772	2	Baja
2.772 - 3.318	3	Moderada
3.318 - 3.864	4	Alta
3.864 - 4.410	5	Muy Alta

Nota. Fuente Elaboración propia

La categorización y reclasificación de los factores descritos constituyen la base para la construcción de un conjunto de capas temáticas estandarizadas, fundamentales para el proceso de zonificación de la amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima. Estos insumos serán integrados en el modelo automatizado desarrollado en ModelBuilder, el cual permite realizar una evaluación multicriterio ponderada que da lugar a la generación del mapa final de amenaza, presentado en el siguiente apartado.

7.2. Arquitectura del modelo de automatización geográfica para la zonificación de amenaza

Con base en los factores clave para el análisis espacial de la amenaza por incendios forestales, se diseñó un modelo automatizado en ModelBuilder de ArcGIS Pro 3.3. Este modelo permitió ejecutar de manera sistemática la zonificación de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima. La herramienta integró insumos en distintos formatos, tanto ráster como vectoriales, y automatizó procesos esenciales de geoprocésamiento, tales como la conversión de capas vectoriales a ráster, la reclasificación y categorización de variables, así como el uso de la calculadora ráster para la suma ponderada que genera el mapa final de amenaza, siguiendo la evaluación multicriterio propuesta por el protocolo del IDEAM (2011).

El modelo fue estructurado en diferentes grupos, cada uno correspondiente a los componentes definidos por el protocolo del IDEAM (2011). Cada grupo incluye las operaciones necesarias para reclasificar y ponderar los insumos originales, generando capas listas para su integración en el mapa final de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima. La estructura general del modelo se presenta en el Anexo 2.

A continuación, se describe la estructura del modelo automatizado, organizada según los diferentes factores establecidos por el IDEAM (2011) para la zonificación de amenaza.

7.2.1. Automatización de la susceptibilidad de la cobertura vegetal

El proceso de automatización de la susceptibilidad de la cobertura vegetal inicia con la conversión de la capa vectorial de Cobertura de la Tierra a formato ráster, utilizando la herramienta *Feature to Raster*, seleccionando como campo de entrada la clasificación temática de Nivel 3.

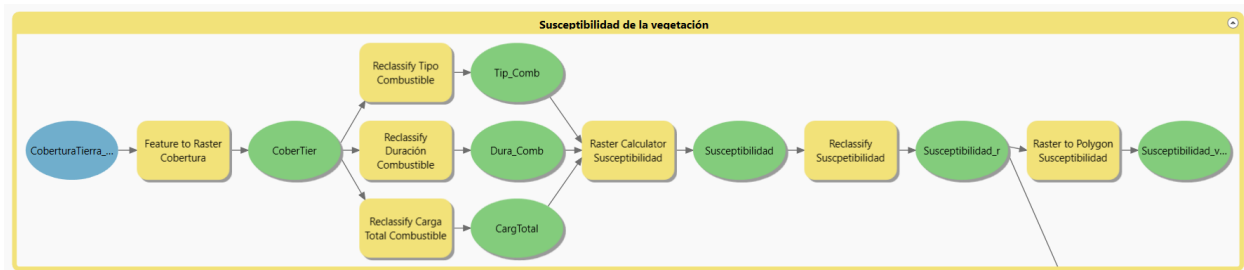
Posteriormente, se aplicó la herramienta *Reclassify* para reclasificar la capa ráster según tres variables definidas previamente: tipo de combustible, duración del combustible y carga total de combustible, conforme a las categorías establecidas en el apartado 7.1.1.

Una vez generadas estas tres capas temáticas, se integraron mediante una operación de suma ponderada utilizando la herramienta *Raster Calculator*, con el fin de obtener el mapa de susceptibilidad. El resultado fue reclasificado nuevamente con *Reclassify*, empleando los rangos normalizados y las categorías de susceptibilidad previamente definidas, generando así la capa final de susceptibilidad de la vegetación a incendios forestales. En la Figura 5 se muestra la automatización de la susceptibilidad de la cobertura vegetal.

Finalmente, para facilitar la representación cartográfica y análisis espacial complementario, la capa ráster de susceptibilidad fue convertida a formato vectorial mediante la herramienta *Raster to Polygon*.

Figura 5

Estructura del modelo para categorizar el factor de susceptibilidad de la cobertura vegetal



Nota. Fuente Elaboración propia

7.2.2. Automatización de los factores climáticos

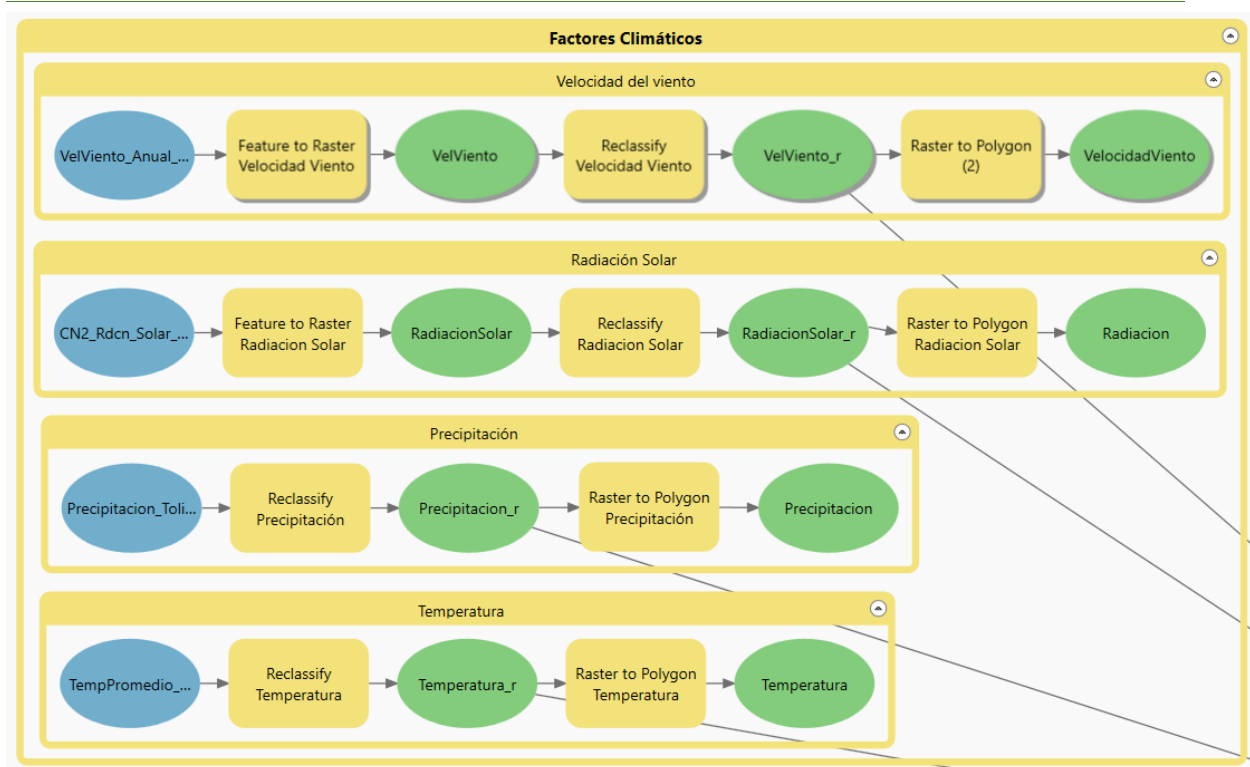
Para la automatización de los factores climáticos se utilizaron cuatro variables principales: temperatura media anual, precipitación media anual, radiación solar y velocidad del viento. Las dos primeras estaban disponibles en formato ráster, mientras que las capas de radiación y viento se encontraban en formato vectorial (shapefile), por lo que fue necesario aplicar la herramienta *Feature to Raster* para convertirlas al formato adecuado para el análisis.

Cada una de estas variables fue procesada de forma independiente mediante submodelos específicos, como se muestra en la Figura X. Posteriormente, se aplicó la herramienta *Reclassify* para asignar categorías de amenaza a los valores de cada variable, según los rangos establecidos en el protocolo del IDEAM (2011) y descritos en el apartado 7.1.2. En la Figura 6 es posible observar el modelo automatizado.

El resultado fue un conjunto de capas climáticas en formato ráster, reclasificadas de acuerdo con su grado de influencia en la amenaza por incendios forestales. Estas capas fueron convertidas a formato vectorial mediante la herramienta *Raster to Polygon*, con el fin de facilitar su representación cartográfica y permitir su incorporación en productos visuales individuales para cada variable.

Figura 6

Estructura del modelo para categorizar los factores asociados a las variables climáticas



Nota. Fuente Elaboración propia

7.2.3. Automatización del factor de relieve

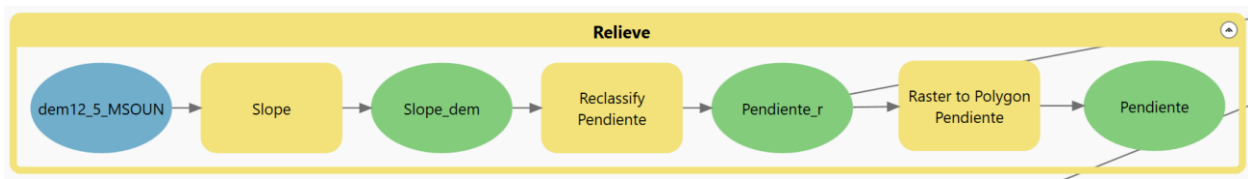
Para la automatización del factor de relieve se utilizó como insumo el Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución espacial de 12.5 metros. A partir de este modelo se generó el mapa de pendientes mediante la herramienta *Slope*, que permite calcular la inclinación del terreno en grados de pendiente.

El resultado fue reclasificado empleando la herramienta *Reclassify*, siguiendo los rangos y categorías definidos en el apartado 7.1.3, con el fin de estandarizar los valores según el nivel de amenaza asociado a la pendiente. El modelo se puede observar en la Figura 7.

La capa ráster de pendientes reclasificadas fue incorporada como uno de los insumos para la generación del mapa de amenaza por incendios forestales. Finalmente, con el propósito de facilitar su representación cartográfica, esta capa fue convertida a formato vectorial mediante la herramienta *Raster to Polygon*.

Figura 7

Estructura del modelo para categorizar el factor de relieve



Nota. Fuente Elaboración propia

7.2.4. Automatización del factor histórico

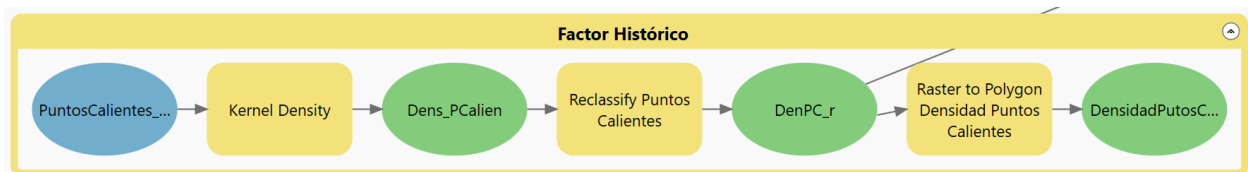
Para la automatización del factor histórico se utilizaron los puntos calientes (focos de calor) registrados entre los años 2014 y 2024, obtenidos del sistema FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA. A partir de esta información, se generó una capa de densidad espacial utilizando la herramienta *Kernel Density*, que permite estimar la concentración de eventos de incendios a lo largo del territorio mediante el método de densidad de Kernel (KDE).

La capa resultante fue reclasificada mediante la herramienta *Reclassify*, siguiendo los rangos definidos en el apartado 7.1.4 del presente documento, con el fin de categorizar el nivel de amenaza en función de la recurrencia histórica de incendios. La automatización de este factor se encuentra en la Figura 8.

Esta capa representa la distribución espacial de la amenaza derivada del historial de eventos térmicos en el departamento del Tolima, y constituye un insumo clave para la integración del modelo de zonificación de amenaza. Finalmente, se aplicó la herramienta *Raster to Polygon* para convertir la capa a formato vectorial y así facilitar su representación cartográfica.

Figura 8

Estructura del modelo para categorizar el factor histórico



Nota. Fuente Elaboración propia

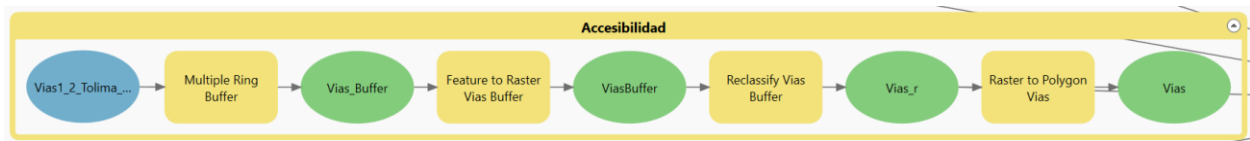
7.2.5. Automatización de la accesibilidad

El factor de accesibilidad se automatizó a partir de la información suministrada por el IGAC sobre las vías del departamento del Tolima. En primer lugar, se generaron las zonas de influencia mediante la herramienta de *Multiple Ring Buffer*, creando anillos cada 500 metros desde las vías principales y secundarias.

Posteriormente, esta capa se convirtió a formato ráster utilizando la herramienta de *Feature to Raster*, y luego fue reclasificada mediante *Reclassify*, aplicando los rangos de distancia y categorías de amenaza definidos en el apartado 7.1.5. El resultado es una capa rasterizada que representa la amenaza por accesibilidad, la cual es incorporada en el modelo de zonificación (Figura 9).

Figura 9

Estructura del modelo para categorizar el factor de accesibilidad



Nota. Fuente Elaboración propia

7.2.6. Automatización del mapa amenaza total a incendios de la cobertura vegetal

Una vez generadas todas las capas temáticas reclasificadas, correspondientes a los distintos factores de amenaza, se procedió a su integración mediante la herramienta *Raster Calculator*. En este paso, se aplicó una suma ponderada, asignando a cada variable un peso específico según su nivel de influencia en la ocurrencia de incendios, conforme a lo establecido en el protocolo metodológico del IDEAM (2011).

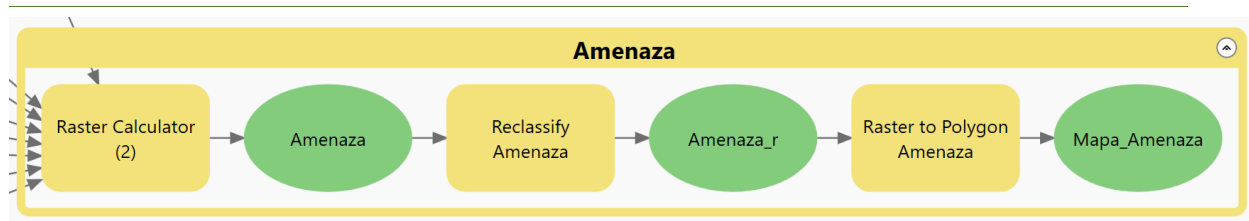
El resultado fue una capa ráster continua que representa un índice compuesto de amenaza por incendios forestales (ver Figura 10). Esta capa fue posteriormente reclasificada utilizando la herramienta *Reclassify*, dividiendo el índice en cinco categorías ordinales de amenaza: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Para su representación final y para facilitar su incorporación en productos cartográficos, la capa de amenaza fue convertida a formato vectorial mediante la herramienta *Raster to Polygon*.

El diseño automatizado de este proceso permite replicar el análisis en otras áreas geográficas o escalas espaciales, y facilita su actualización periódica ante la disponibilidad de nuevas fuentes de información o cambios en las condiciones ambientales del territorio.

Figura 10

Estructura del modelo para categorizar el factor de susceptibilidad de la cobertura vegetal



Nota. Fuente Elaboración propia

En la siguiente sección se presentan los resultados derivados de la ejecución del modelo, específicamente el mapa de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima, el cual cumple el objetivo de proporcionar un insumo clave la gestión de riesgo.

7.3. Mapa de amenaza a incendios forestales en el departamento del Tolima

Gracias a la ejecución del modelo automatizado en ModelBuilder, se generaron los mapas correspondientes a los diferentes factores que inciden en la amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima. Cada uno de estos factores fue clasificado en cinco niveles de amenaza —muy baja, baja, moderada, alta y muy alta— siguiendo los lineamientos metodológicos del protocolo del IDEAM (2011).

En este apartado se presentan los productos cartográficos obtenidos, acompañados de un análisis de su comportamiento espacial y de la distribución porcentual de las categorías de amenaza en el territorio.

7.3.1. Susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios

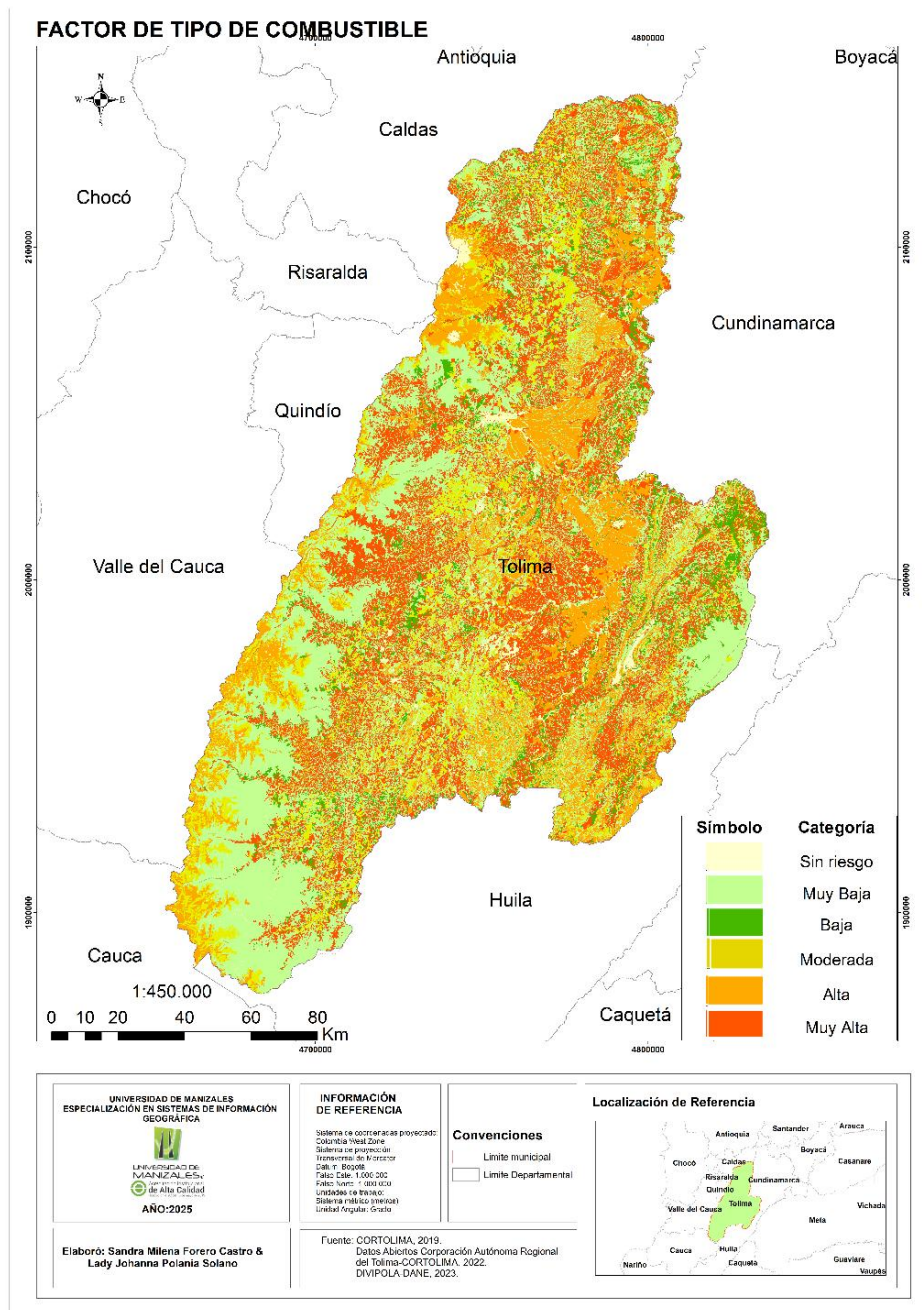
En este último apartado se presenta los resultados del modelo automatizado, expresados en mapas de susceptibilidad de la vegetación y mapas amenaza por incendios forestales, clasificados en cinco niveles: Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta amenaza.

Se describe para cada factor la distribución de las categorías de amenaza, identificando las zonas más afectadas. Finalmente, se expone el mapa de amenaza total para del departamento, junto con los municipios más afectados.

7.3.1.1. Susceptibilidad por tipo de combustible

Figura 11

Mapa de susceptibilidad por tipo de combustible



Nota. Fuente Elaboración propia

El análisis de la susceptibilidad por tipo de combustible (Figura 12), muestra que aproximadamente el 37,58 % de las coberturas del departamento presentan una susceptibilidad muy baja, correspondiente principalmente a bosques densos y abiertos (altos y bajos), que tienen mayor resistencia a la combustión (Tabla 19 y Figura 11).

En contraste, cerca del 26,13 % del territorio presenta una susceptibilidad muy alta, concentrada en áreas dominadas por pastos limpios, pastos enmalezados y zonas verdes urbanas,

coberturas que tienden a inflamarse con facilidad. Adicionalmente, un 16,62 % del área se clasifica con susceptibilidad alta, asociada a herbazales y cultivos herbáceos, los cuales también poseen características inflamables relevantes.

El restante 19,67 % del territorio se distribuye entre las categorías de sin riesgo, baja y moderada, e incluye coberturas como suelos desnudos, cuerpos de agua, zonas urbanas, bosques fragmentados y arbustales.

Tabla 21

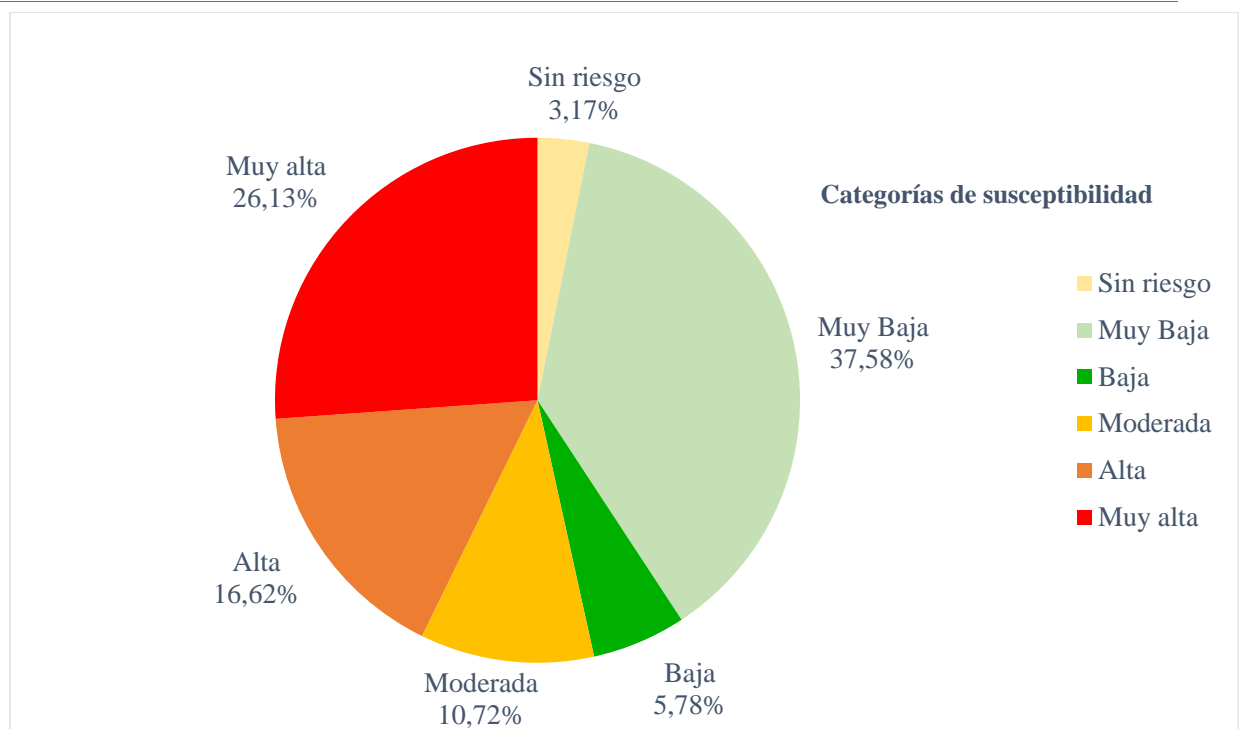
Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad por tipo de combustible

Tipo de cobertura	Tipo de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad	Área (Ha)
Suelos desnudos, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y no naturales	No combustibles	0	Sin riesgo	76594.69
Bosques densos, abiertos, altos y bajos	Árboles	1	Muy Baja	907099.75
Bosques fragmentados	Árboles/arbustos	2	Baja	139586.14
Arbustales, arbustal abierto, herbazal con arbustos y/o arbolado	Arbustos/Hierbas, arboles/hierbas, pastos/hierbas/arbustos/árboles	3	Moderada	258674.69
Herbazales y cultivos herbáceos	Hierbas/ cultivos herbáceos	4	Alta	401150.78
Pastos enmalezados, limpios y zonas verdes urbanas	Hierbas, pastos, zonas verdes urbanas	5	Muy alta	630626.47
Zonas con presencia de nubes o sombras	Sin información	6	Sin información	0

Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 12

Grado de susceptibilidad por tipo de combustible



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.1.2. Susceptibilidad por duración del combustible

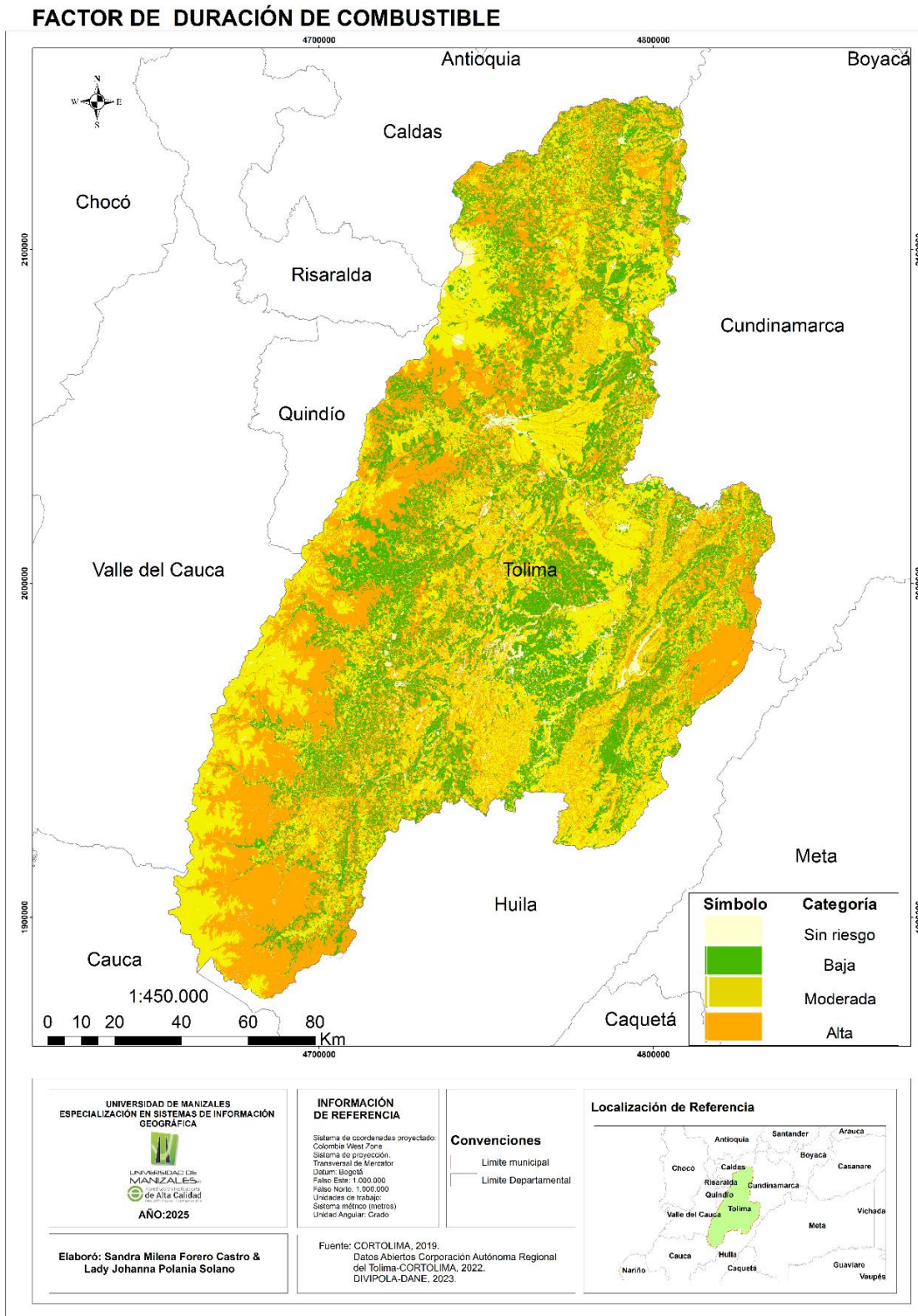
La variable de duración del combustible, que representa el tiempo aproximado en que una cobertura vegetal puede mantenerse encendida, evidencia que el 38,33 % del territorio presenta una susceptibilidad Alta (Figura 13). Esta categoría corresponde principalmente a bosques densos y fragmentados, cuya biomasa puede tardar alrededor de 100 horas en consumirse, aumentando el riesgo de propagación sostenida del fuego (Tabla 20).

Le sigue una categoría de susceptibilidad moderada, que abarca el 34,39 % del territorio, asociada a coberturas como arbustales y herbazales, cuya combustión puede prolongarse hasta 10 horas (Figura 14).

Por su parte, el 24,11 % del área presenta una susceptibilidad baja, correspondiente a coberturas como pastos, cultivos herbáceos y zonas verdes urbanas, cuyo tiempo de combustión es mucho menor (alrededor de una hora). Finalmente, un 3,17 % del territorio se encuentra en la categoría sin riesgo, correspondiente a coberturas no combustibles como cuerpos de agua o suelos desnudos.

Figura 13

Mapa de susceptibilidad por duración de combustible



Nota. Fuente Elaboración propia

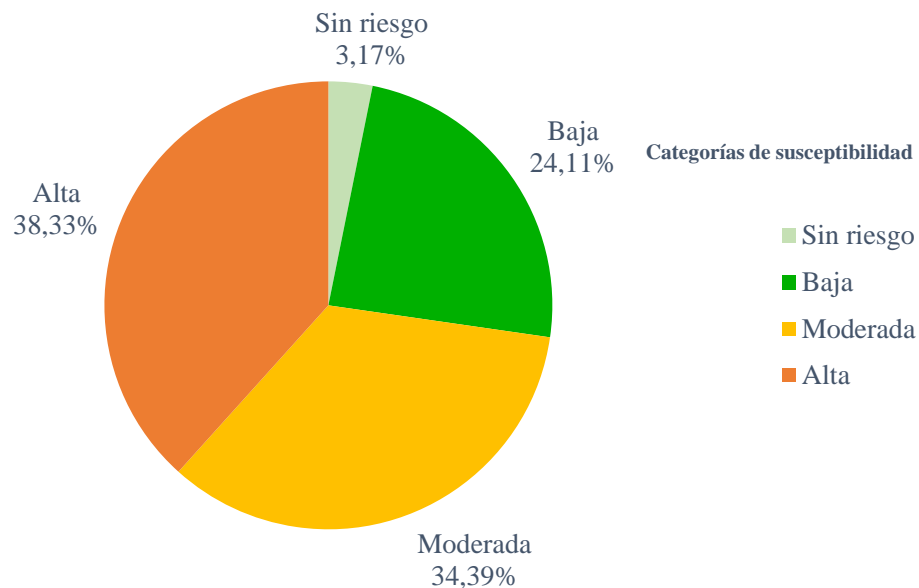
Tabla 22

Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad por duración de combustible

Tipo de cobertura	Duración de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad	Área (Ha)
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y no naturales	No combustibles	0	Sin riesgo	76585.12
Zonas verdes urbanas / pastos limpios Herbazales / cultivos herbáceos / pastos enmalezados	1 hora	1	Baja	581952.58
Arbustal abierto / herbazal con arbustos y/o arbolado Arbustales / mosaicos con espacios naturales	10 horas	2	Moderada	830049.95
Bosques fragmentados Bosques densos y abiertos	100 horas	3	Alta	925145.58
Zonas en las que no se tiene información por presencia de nubes o sombras	Sin información	6	Sin información	0

Nota. Fuente Elaboración propia

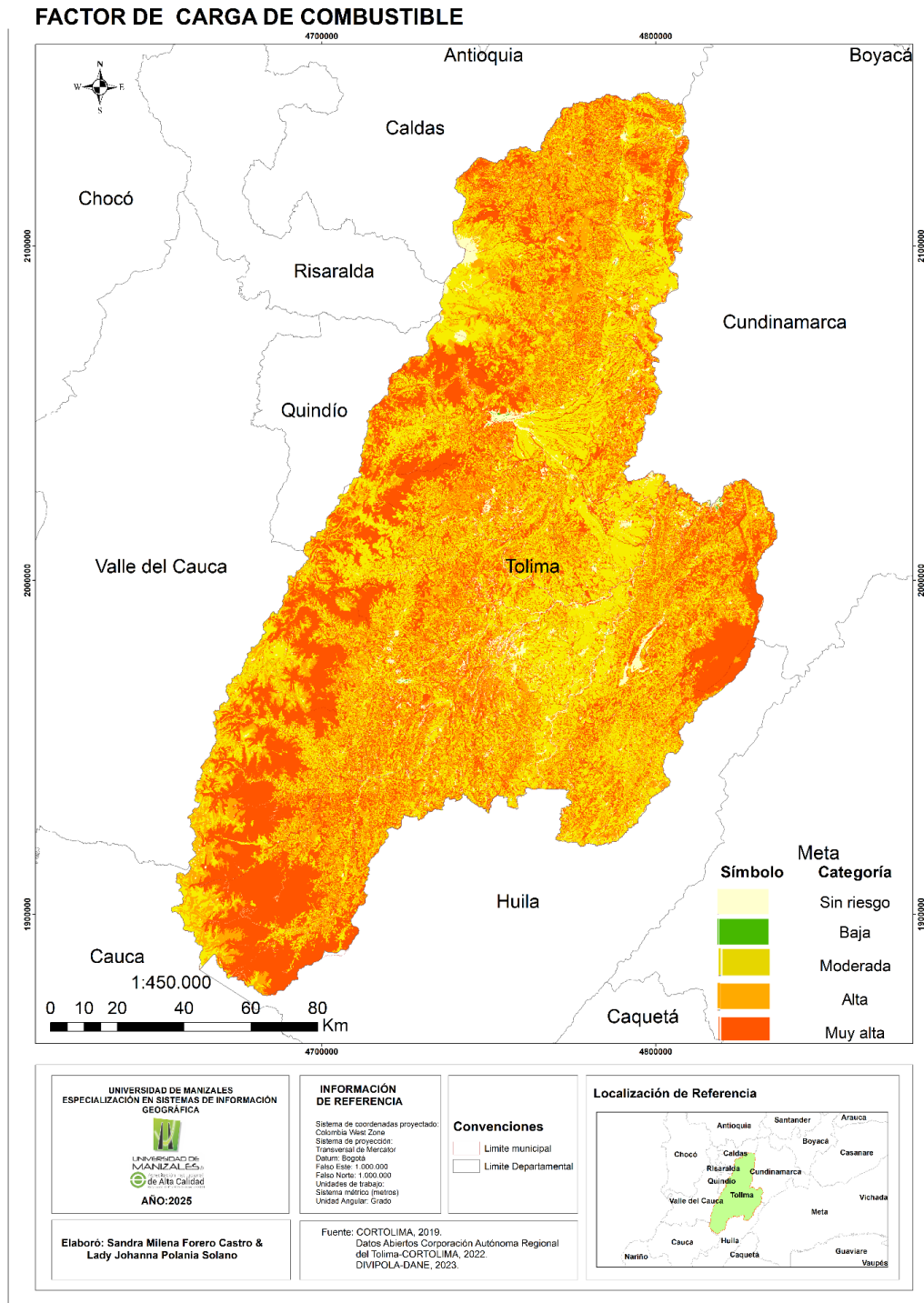
Figura 14
Grado de susceptibilidad por duración del combustible.



8. Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.1.3. Susceptibilidad por carga del combustible

Figura 15
 Mapa de susceptibilidad por carga total de combustible



Nota. Fuente Elaboración propia

La carga total de combustible está determinada por la cantidad de biomasa disponible en cada tipo de cobertura vegetal, expresada en toneladas por hectárea (ton/ha). Esta variable influye directamente en la intensidad y duración potencial de un incendio forestal (Figura 15).

En el departamento del Tolima, aproximadamente el 42,72 % del territorio se clasifica en la categoría de susceptibilidad Moderada, asociada a coberturas como herbazales, cultivos, pastos limpios y pastos enmalezados, las cuales presentan entre 1 y 50 ton/ha de biomasa disponible (Figura 16).

Por otro lado, cerca del 38,33 % del área corresponde a la categoría de susceptibilidad Muy alta, representada por bosques densos, abiertos y fragmentados, cuya carga de combustible supera las 100 ton/ha, incrementando significativamente el riesgo en caso de incendio.

Asimismo, un 15,75 % del territorio presenta susceptibilidad Alta, vinculada a arbustales abiertos, herbazales con arbustos y coberturas arboladas, con cargas estimadas entre 50 y 100 ton/ha (Tabla 21).

Finalmente, aproximadamente el 3,20 % del área se encuentra en las categorías de Baja y Sin riesgo, correspondientes a suelos desnudos, cuerpos de agua, zonas urbanas y zonas verdes urbanas, donde la biomasa disponible para combustión es nula o muy limitada.

Tabla 23

Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad por carga total de combustible

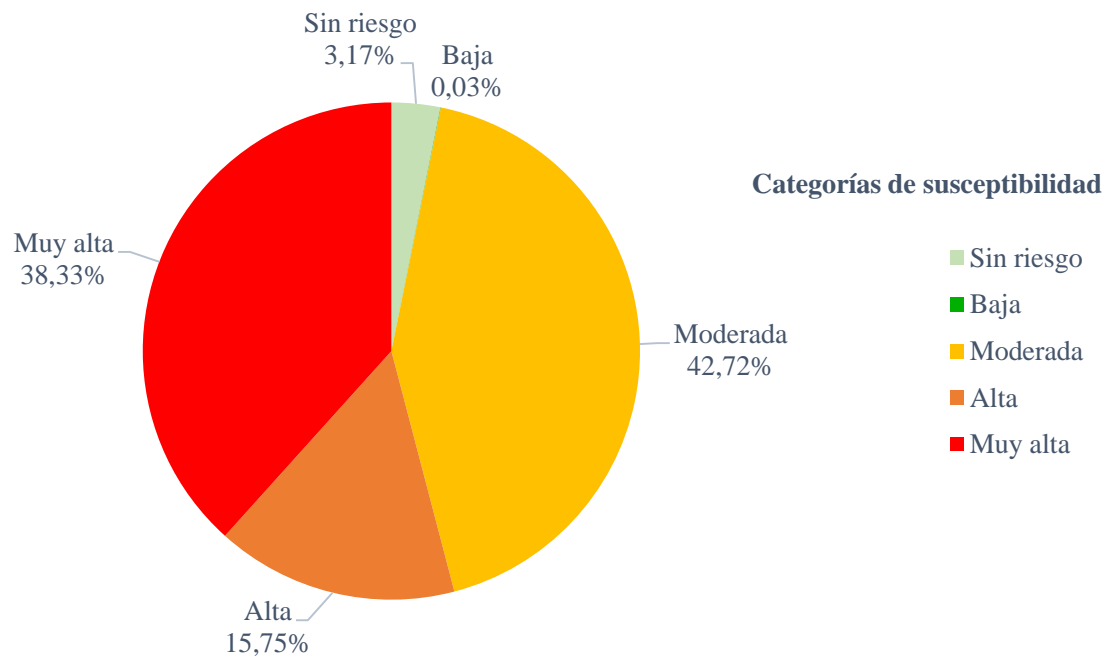
Tipo de cobertura	Tipo de carga total de combustible	Calificación	Categoría de susceptibilidad	Área (Ha)
Suelos desnudos o degradados, roca, nieves perpetuas, cuerpos de agua, zonas urbanas y no naturales	No combustibles	0	Sin riesgo	76587.96
Zonas verdes urbanas	<1 ton/ha	1	Baja	619.70
Herbazales / cultivos herbáceos / pastos enmalezados / pastos limpios	1-50 ton/Ha	2	Moderada	1031173.78
Arbustal abierto y herbazal con arbustos y/o arbolado Arbustos	50 a 100 ton/Ha	3	Alta	380188.17
Bosques fragmentados Bosques densos y abiertos, altos y bajos	>100 ton/ha	4	Muy alta	925162.96

Sin información	Sin información	6	Sin información	0
-----------------	-----------------	---	-----------------	---

Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 16

Grado de susceptibilidad por carga de combustible



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.1.4. Susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios

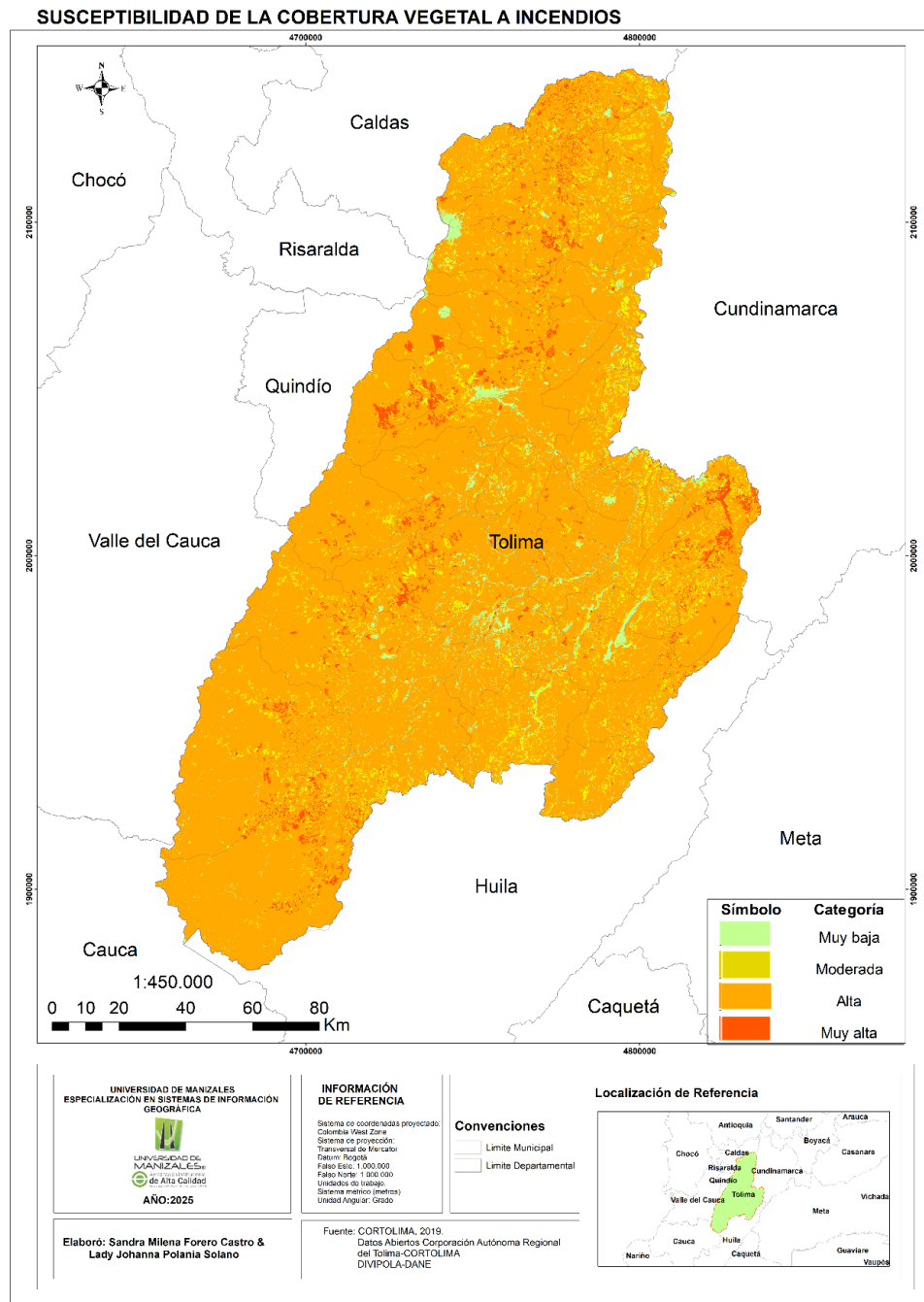
La susceptibilidad total de la cobertura vegetal es el resultado de la suma ponderada de las tres variables previamente analizadas: tipo de combustible, duración del combustible y carga total de combustible. Esta integración permite estimar de manera más precisa el nivel de susceptibilidad real de las coberturas vegetales frente a incendios forestales en el departamento del Tolima (Figura 17).

Como se observa en las Figura 18, el análisis espacial evidencia que aproximadamente el 88,83 % del territorio presenta una susceptibilidad Alta, lo cual resalta la gran proporción de coberturas con condiciones favorables para la propagación del fuego.

En menor proporción, se identificaron zonas con susceptibilidad Moderada (5,15 %) y Muy alta (2,85 %), mientras que solo el 3,17 % del área corresponde a la categoría de susceptibilidad Muy baja. Es importante resaltar que no se registraron áreas clasificadas dentro del nivel de

susceptibilidad baja, lo que refleja una fuerte predisposición del territorio a condiciones de riesgo elevadas (Tabla 22).

Figura 17
Mapa de susceptibilidad total de la cobertura vegetal



Nota. Fuente Elaboración propia

Tabla 24

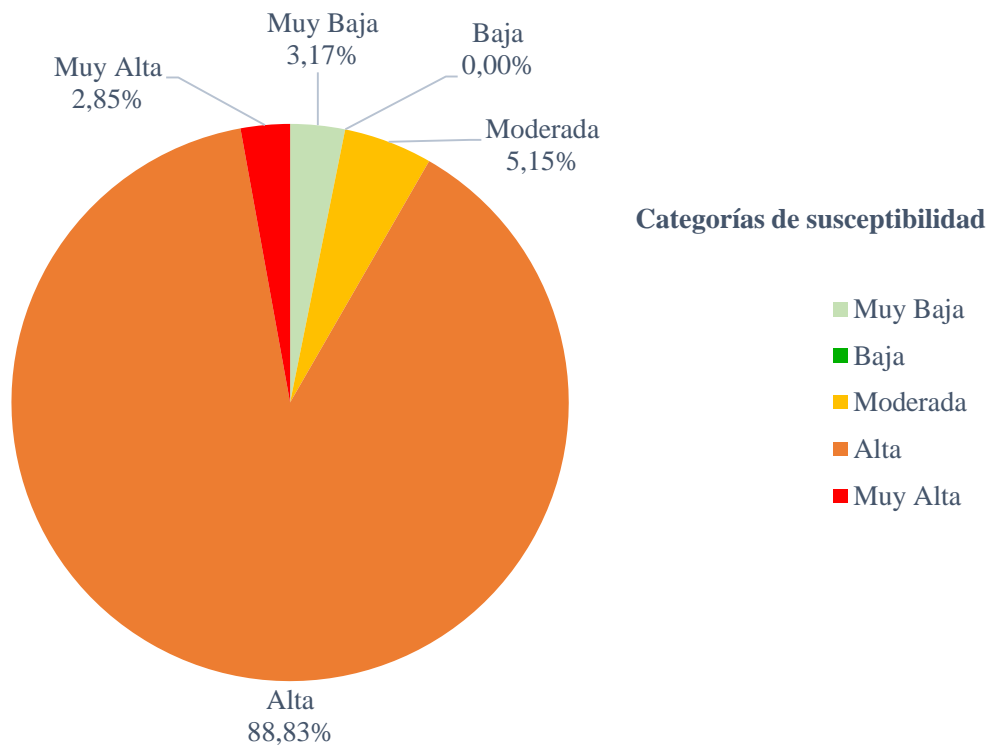
Área perteneciente a cada categoría de susceptibilidad total

5 Niveles (CAL(tc)+CAL(dc)+CAL(ct))	Calificación	Categoría Susceptibilidad	Área (Ha)
0 - 5	1	Muy Baja	76513.14
5 - 6	2	Baja	0
6 - 7	3	Moderada	124232.29
7 - 8	4	Alta	2144115.14
8 - 9	5	Muy Alta	68875.35

Nota. Elaboración propia, basado en el protocolo del IDEAM (2011).

Figura 18

Grado de susceptibilidad total



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.2. Amenaza por factores climáticos

7.3.2.3. Amenaza por temperatura

La temperatura media anual es un factor climático clave en la propagación de incendios forestales, ya que influye directamente en la sequedad de la vegetación y su inflamabilidad. Esta variable cobra especial importancia cuando se presentan aumentos bruscos o prolongados de calor, los cuales pueden intensificar la probabilidad de ignición y la velocidad de propagación del fuego.

En el departamento del Tolima, aproximadamente el 36,31 % del territorio se clasifica en la categoría de amenaza Muy alta, correspondiente a zonas con temperaturas superiores a los 24 °C, concentradas principalmente en el valle del río Magdalena (Figura 20). Estas áreas presentan condiciones térmicas que favorecen notablemente la ocurrencia de incendios (Figura 19).

Le sigue la categoría de amenaza Alta, que abarca un 28,97 % del departamento, caracterizada por temperaturas entre 18 °C y 24 °C. Luego, la categoría de amenaza Moderada, que se encuentra entre temperaturas de 12° a 18° C, alcanza cerca del 18.86 % del territorio tolimense. Estas zonas se ubican predominantemente en las laderas intermedias de las vertientes oriental de la Cordillera Central y occidental de la Cordillera Oriental, donde se combinan condiciones térmicas elevadas con coberturas vegetales susceptibles (Tabla 23).

En contraste, la categoría de amenaza Baja, correspondiente a temperaturas entre 6 °C y 12 °C, representa el 15,12 % del territorio tolimense. Estas zonas se localizan en las áreas de mayor altitud de la vertiente oriental de la Cordillera Central, donde predominan ecosistemas de páramo y zonas de influencia glaciario, como los alrededores del Parque Nacional Natural Los Nevados.

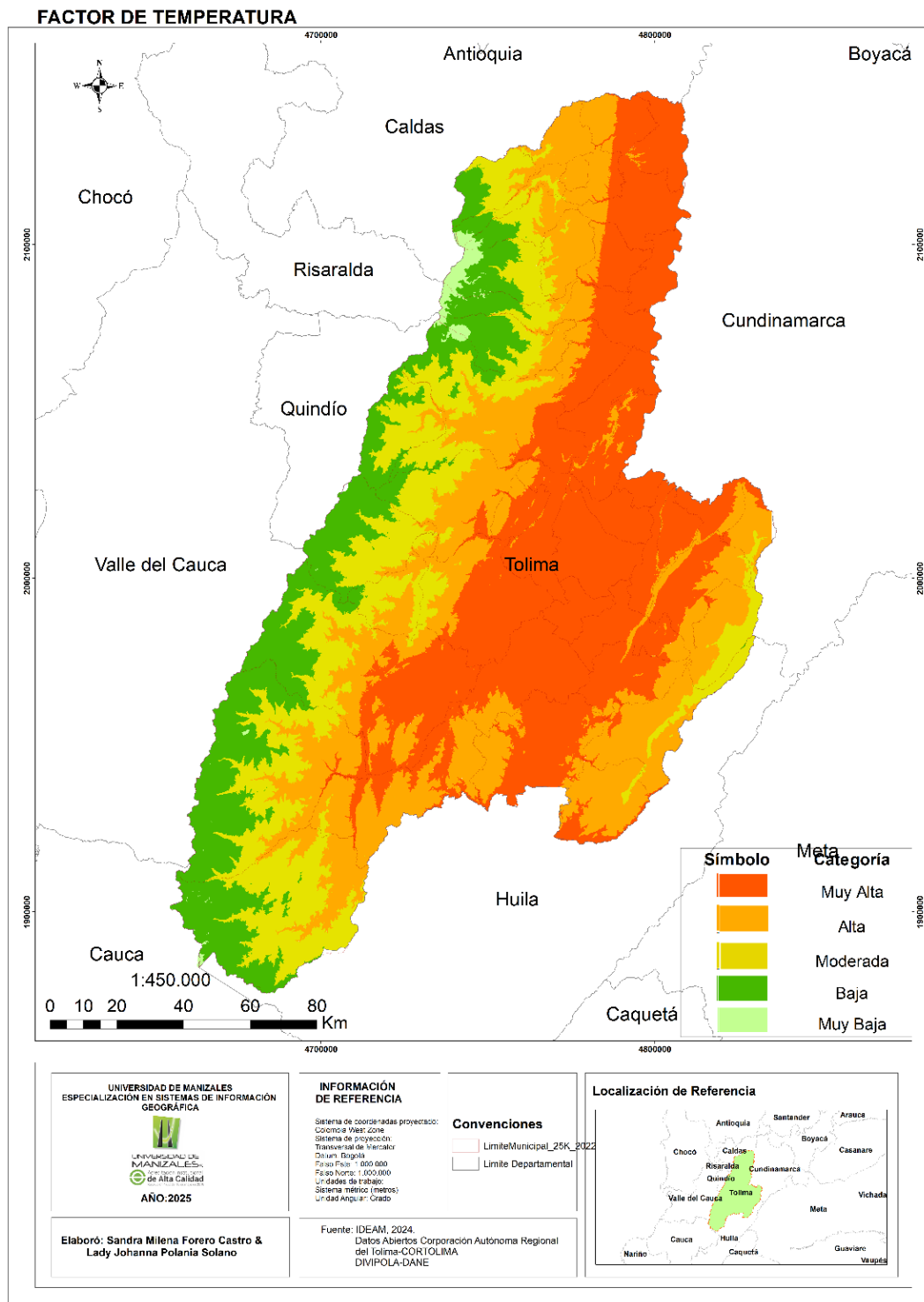
Tabla 25

Área perteneciente a cada categoría de amenaza por temperatura

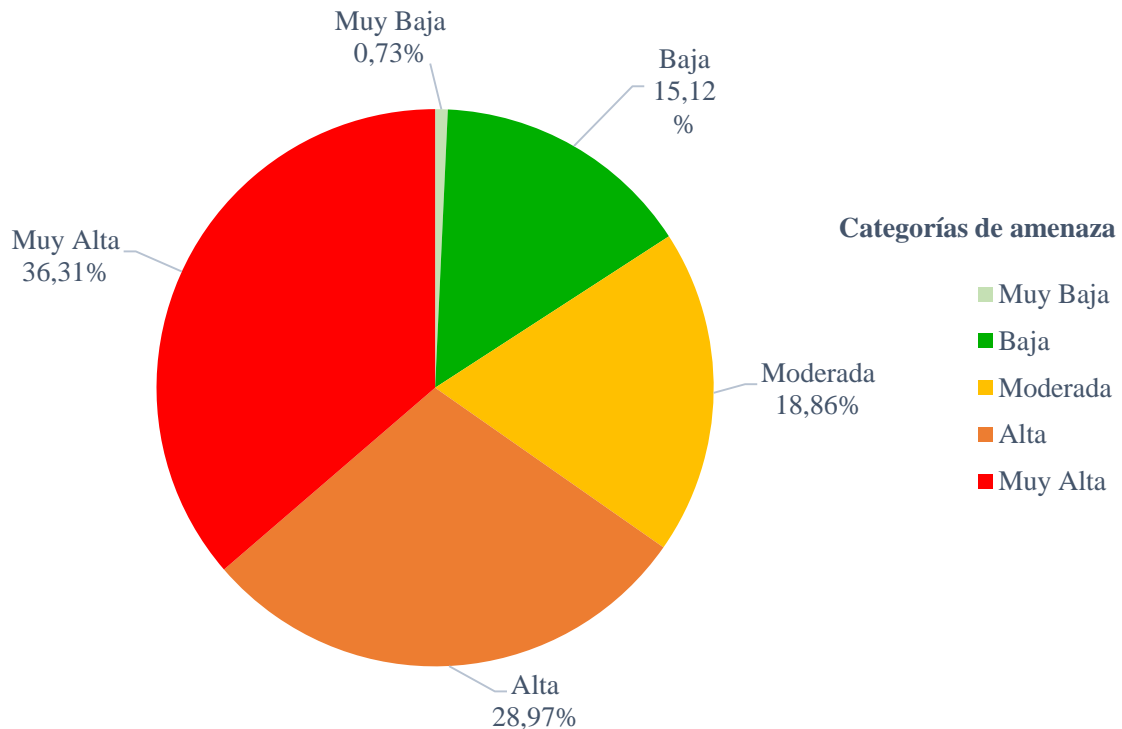
Temperatura media anual (°C)	Calificación	Categoría de Amenaza	Área (Ha)
<6°	1	Muy Baja	17633.81
6° - 12°	2	Baja	365304.22
12° - 18°	3	Moderada	455570.13
18° - 24°	4	Alta	699939.86
>24°	5	Muy Alta	877241.53

Nota. Adaptado IDEAM (2011).

Figura 19
Mapa de amenaza por temperatura media anual



Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 20*Grado de amenaza por temperatura*

Nota. Fuente Elaboración propia

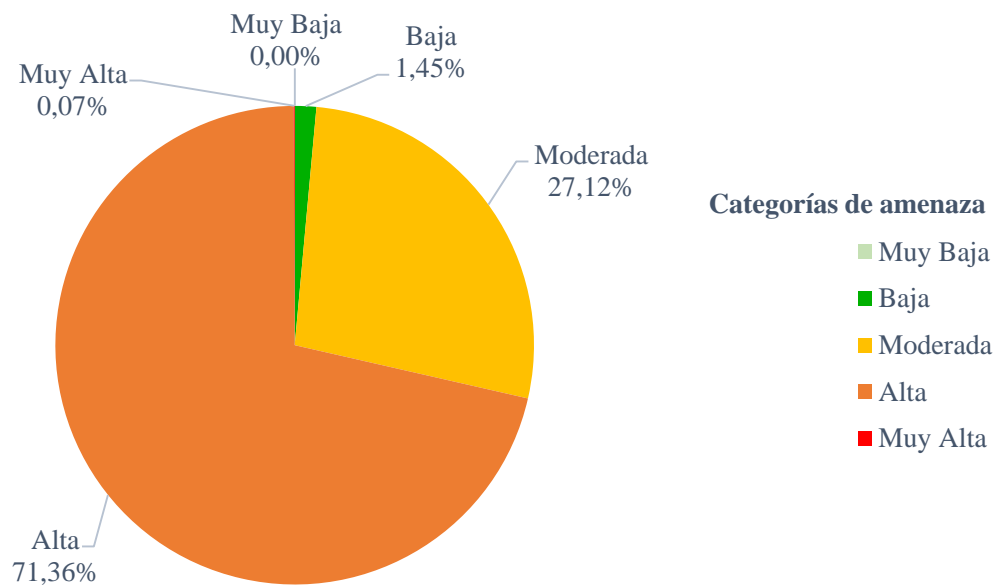
7.3.2.4. Amenaza por precipitaciones

La precipitación media anual es un factor climático determinante en la humedad de la vegetación, lo cual influye directamente en su susceptibilidad a los incendios. Al igual que la temperatura, este parámetro desempeña un papel clave en el grado de amenaza por incendios forestales, ya que menores niveles de precipitación suelen estar asociados a una mayor probabilidad de ocurrencia de fuego, debido a condiciones de sequedad.

Según se observa en el Figura 21, aproximadamente el 71,36 % del territorio del Tolima se encuentra clasificado en la categoría de amenaza Alta, correspondiente a zonas con precipitaciones medias anuales entre 1.000 y 2.000 mm. Estas áreas presentan una reducción significativa de humedad en los periodos secos, lo que incrementa el riesgo de propagación del fuego (Figura 22).

Le sigue la categoría de amenaza Moderada, que abarca un 27,12 % del territorio, correspondiente a rangos de precipitación media anual entre 2.000 y 3.000 mm. Estas zonas presentan condiciones más equilibradas de precipitación, pero aún con susceptibilidad intermedia durante épocas de sequías (Tabla 24).

En menor proporción, se identificaron áreas clasificadas con amenaza Muy alta (0,07 %), correspondientes a regiones con precipitaciones inferiores a 1.000 mm anuales, y amenaza Baja (1,45 %), donde los registros superan los 3.000 mm. No se reportaron áreas pertenecientes a la categoría de amenaza Muy baja, lo cual indica que en todo el departamento hay un predominio de condiciones climáticas que favorecen, en mayor o menor medida, la ocurrencia de incendios forestales.

Figura 21*Grado de amenaza por precipitación*

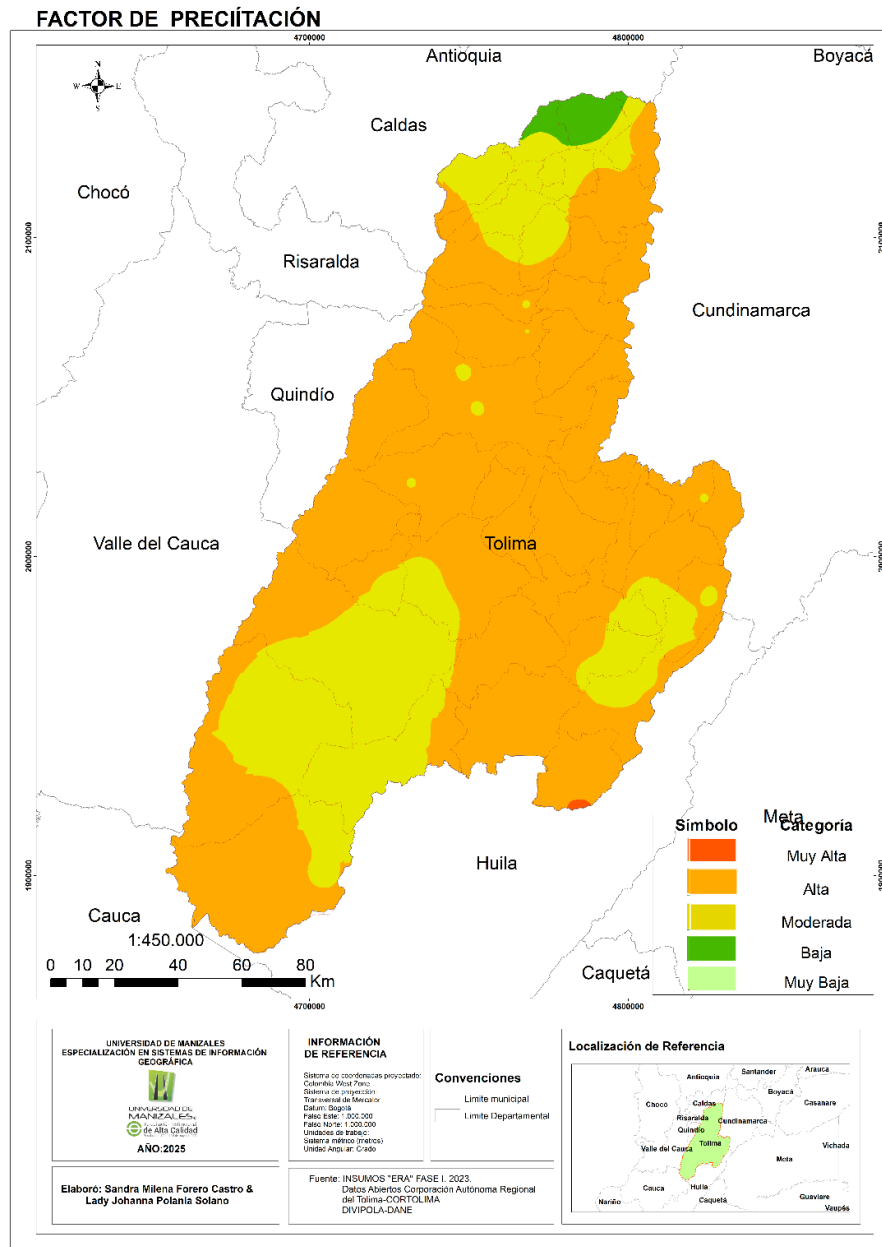
Nota. Fuente Elaboración propia

Tabla 26*Área perteneciente a cada categoría de amenaza por precipitación*

Precipitación Media Anual (mm)	Tipo de humedad	Calificación	Categoría de Amenaza	Área (Ha)
>7000	Pluvial	1	Muy Baja	0
3000 – 7000	Muy Húmedo	2	Baja	35091.35
2000 – 3000	Húmedo	3	Moderada	655347.54
1000 – 2000	Seco	4	Alta	1724216.90
0 – 1000	Muy Seco	5	Muy Alta	1726.33

Nota. Adaptado IDEAM (2011).

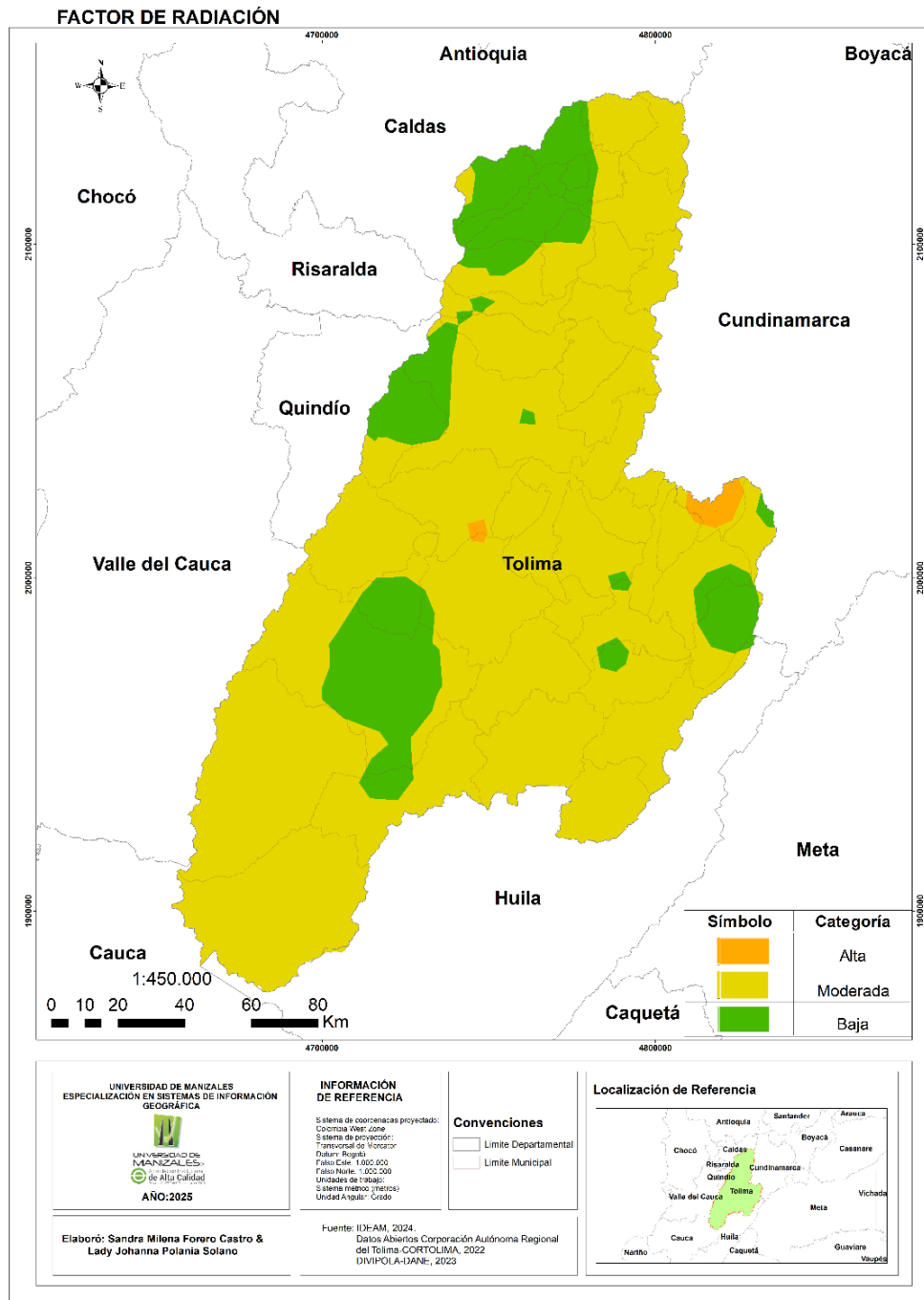
Figura 22
 Mapa de amenaza por precipitación media anual



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.2.5. Amenaza por radiación solar

Figura 23
 Mapa de amenaza por radiación solar



Nota. Fuente Elaboración propia

La radiación solar es un factor climático relevante en contextos de sequía, ya que su incremento intensifica los procesos de evapotranspiración en las plantas, reduciendo su contenido de humedad y, por ende, aumentando su vulnerabilidad ante un posible incendio. Su efecto se vuelve más significativo cuando se combina con temperaturas elevadas y bajos niveles de precipitación (Figura 23).

En el departamento del Tolima, aproximadamente el 82,51 % del territorio se encuentra en la categoría de amenaza Moderada, correspondiente a rangos de radiación media anual entre 4 y 5 kWh/m²/año. Esta categoría abarca la mayor parte del territorio, especialmente en zonas de altitudes intermedias y bajas (Figura 24).

Le sigue la categoría de amenaza Baja, que representa el 16,77 % del área, asociada a zonas donde la radiación se encuentra entre 3 y 4 kWh/m²/año, relacionadas con sectores montañosos o de mayor nubosidad.

En menor proporción, tan solo un 0,72 % del territorio se clasifica con amenaza Alta, correspondiente a áreas con radiación superior entre 5 a 6 kWh/m²/año. No se identificaron zonas clasificadas en las categorías de amenaza muy baja ni muy alta, lo que indica una distribución relativamente homogénea de esta variable en el departamento (Tabla 25).

Tabla 27

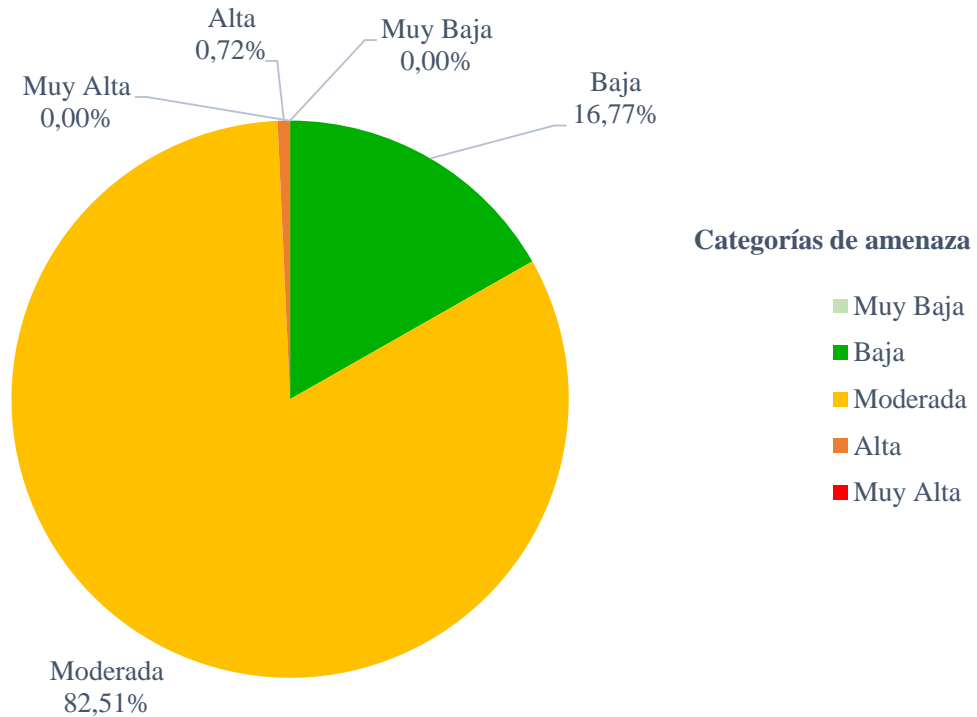
Área perteneciente a cada categoría de amenaza por radiación solar

Radiación media anual (KWh/m ² /año)	Calificación	Categoría de Amenaza	Área (Ha)
<3,0	1	Muy Baja	0
3,0 – 4,0	2	Baja	404793.71
4,0 – 5,0	3	Moderada	1991685.07
5,0 – 6,0	4	Alta	17313.66
>6,0	5	Muy Alta	0

Nota. Adaptado IDEAM (2011).

Figura 24

Grado de amenaza por radiación solar



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.2.6. Amenaza por velocidad del viento

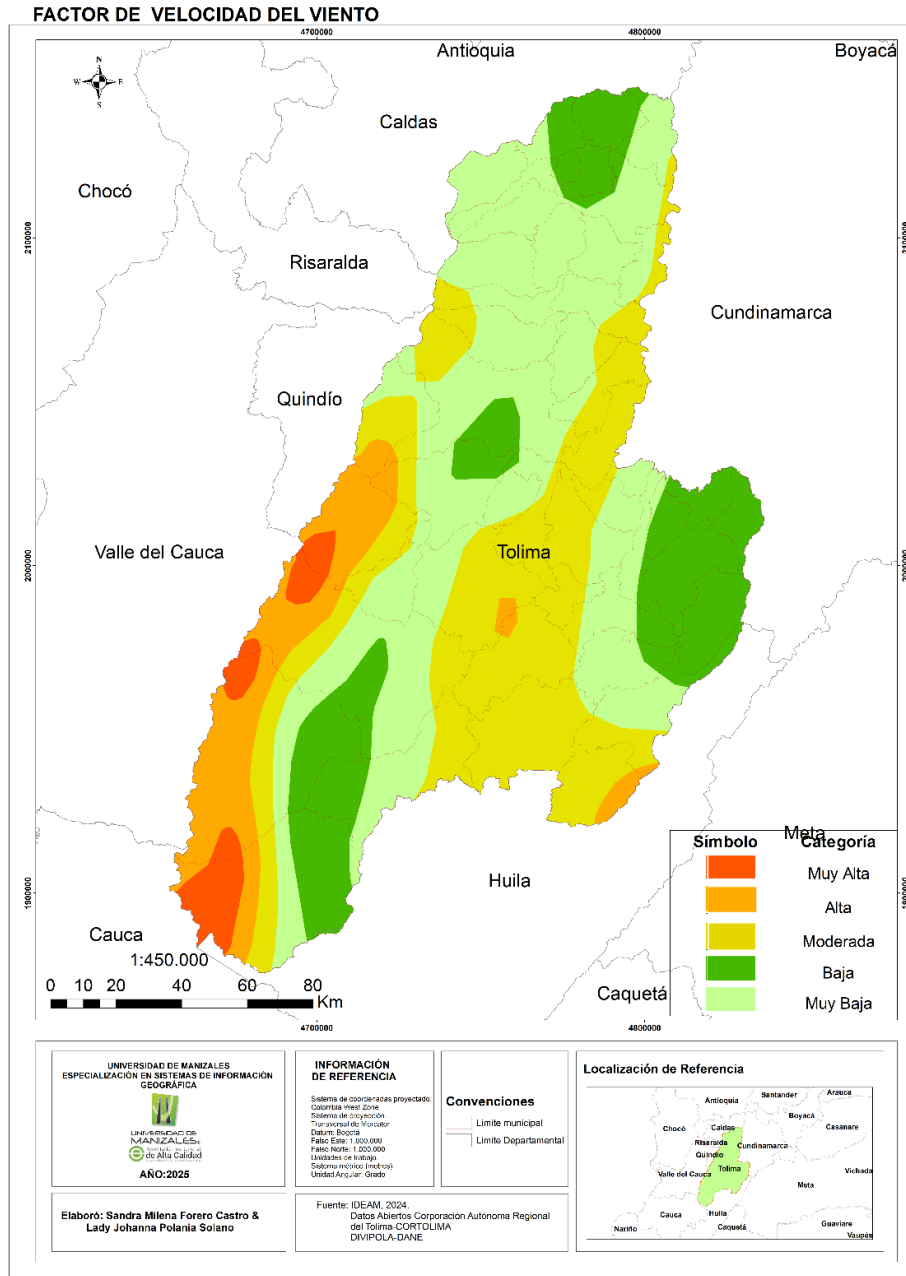
La velocidad del viento es un factor climático con alta incidencia durante la ocurrencia de incendios forestales, ya que influye directamente en la propagación del fuego, aumentando su intensidad, expansión y dificultad para ser controlado. Vientos más fuertes no solo aceleran el avance de las llamas, sino que también facilitan la dispersión de focos secundarios.

Según se observa en la Figura 26, en el departamento del Tolima, la mayor proporción del territorio, cerca del 39,47 %, se clasifica en la categoría de amenaza Muy baja, correspondiente a zonas donde la velocidad media multianual del viento es inferior a 2 m/s (Figura 25).

Le sigue la categoría de amenaza Moderada, que abarca el 28,66 % del territorio, en donde se registran velocidades entre 3 y 4 m/s. Posteriormente, un 18,88 % del área se ubica en la categoría baja, con velocidades promedio entre 2 y 3 m/s (Tabla 26).

En menor proporción, el 9,69 % del territorio presenta amenaza alta, y un 3,3 % se clasifica como Muy alta, ambas categorías asociadas a velocidades del viento superiores a 4 m/s. Estas zonas de mayor amenaza se concentran principalmente sobre la vertiente oriental de la Cordillera Central, donde la topografía canaliza y acelera el flujo del viento.

Figura 25
 Mapa de amenaza por velocidad de los vientos



Nota. Fuente Elaboración propia

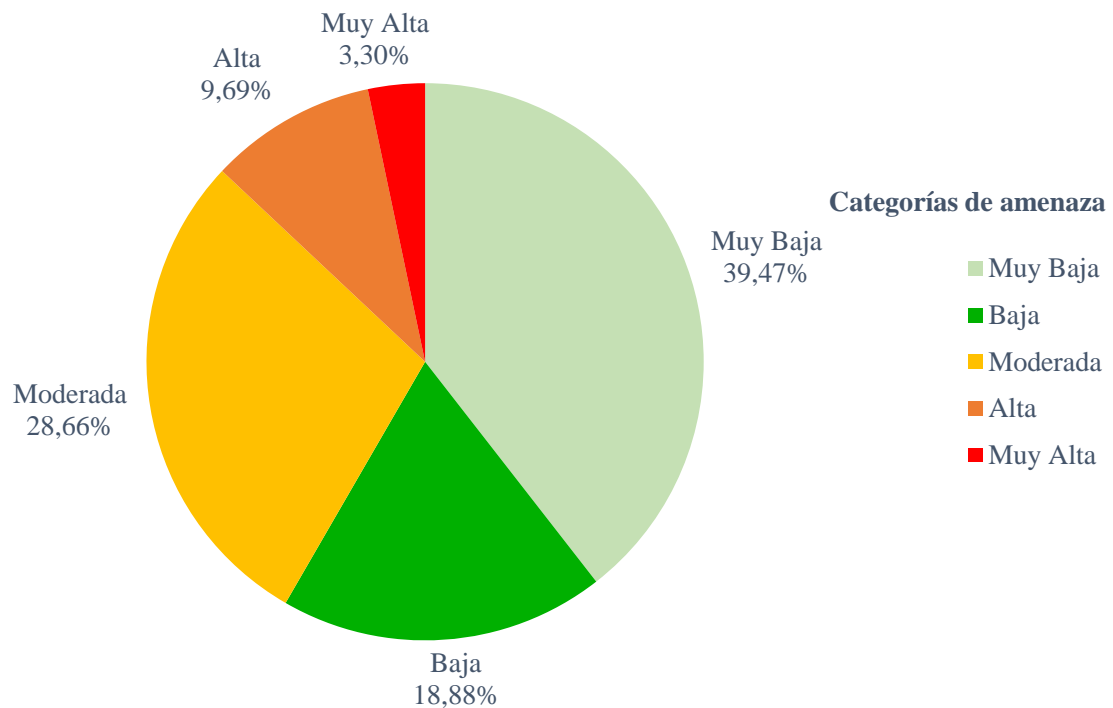
Tabla 28
 Área perteneciente a cada categoría de amenaza por velocidad del viento

Velocidad media multianual del viento (m/s)	Calificación	Categoría de Amenaza	Área (Ha)
<2,0	1	Muy Baja	952730.67
2,0 – 3,0	2	Baja	455629.21
3,0 – 4,0	3	Moderada	691819.90
4,0 – 5,0	4	Alta	233900.72
>5,0	5	Muy Alta	79711.73

Nota. Adaptado IDEAM (2011).

Figura 26

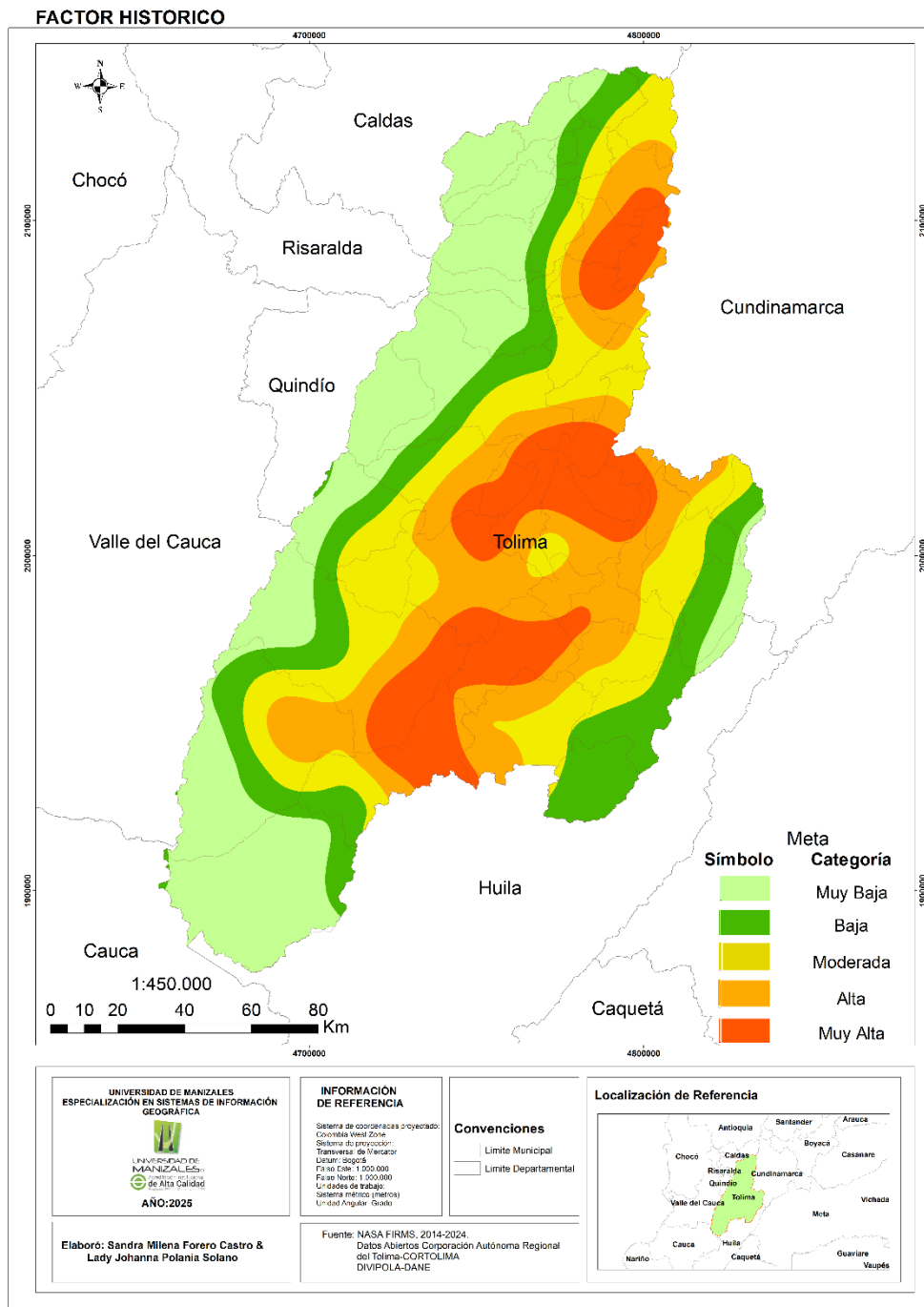
Grado de amenaza por velocidad del viento



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.3. Amenaza por factor histórico o frecuencia

Figura 27
 Mapa de amenaza por factor histórico



Nota. Fuente Elaboración propia

El factor histórico se evaluó a partir del análisis de los focos de calor registrados en el departamento del Tolima entre los años 2014 y 2024, utilizando los datos del sensor VIIRS C2, a

bordo del satélite Suomi NPP, caracterizado por una resolución espacial de 375 metros, lo que permite una detección más precisa de incendios en áreas relativamente pequeñas.

Este sensor detecta puntos de alta temperatura en la superficie terrestre, lo que facilita la identificación de eventos asociados a incendios forestales. Para este estudio, se procesaron los puntos térmicos mediante una estimación de densidad de Kernel, clasificando el resultado en cinco categorías de amenaza según la concentración de eventos históricos, como se muestra en la Tabla 27.

El análisis espacial (Figura 28) indica que cerca del 43,14 % del territorio del Tolima se encuentra en la categoría de amenaza Muy baja, con una densidad menor a 0,0179 focos/km², especialmente en las vertientes oriental de la Cordillera Central y occidental de la Cordillera Oriental, donde la ocurrencia de incendios ha sido históricamente baja (Figura 27).

Le sigue la categoría de amenaza Baja, que cubre el 24,83 % del territorio, asociada a densidades entre 0,0179 y 0,0358 focos/km². Estas zonas también presentan baja recurrencia histórica, aunque con una mayor dispersión de los focos de calor.

En contraste, las áreas con mayor concentración de focos se ubican en el entorno del valle del río Magdalena, donde los incendios forestales han tenido mayor recurrencia. Allí se encuentran las categorías de amenaza Alta (10,63 %) y Muy alta (1,91 %), con densidades superiores a 0,05378 focos/km², lo que refleja una mayor presión histórica sobre estas zonas.

Tabla 29

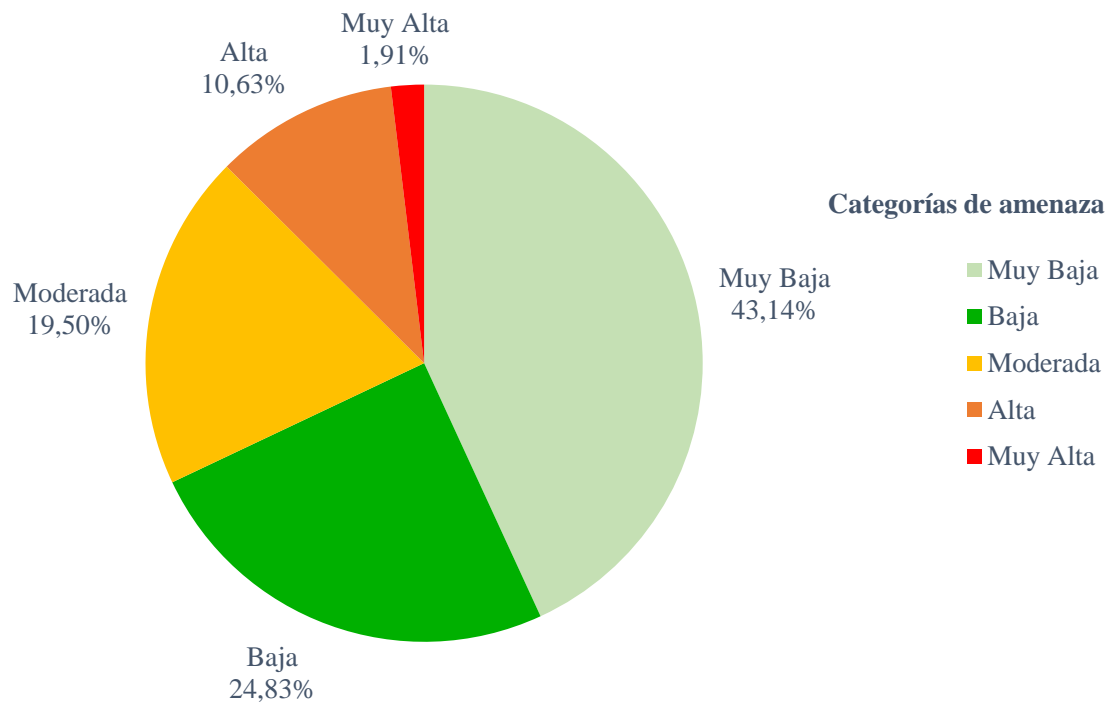
Área perteneciente a cada categoría de amenaza por densidad Kernel de los puntos calientes.

Estimación de Densidad Kernel (puntos/km ²)	Calificación	Categoría de Amenaza	Área (Ha)
< 0.0179	1	Muy Baja	1041208.87
0.0179 - 0.0358	2	Baja	599374.23
0.0358 - 0.0538	3	Moderada	470642.68
0.05378 - 0.0717	4	Alta	256521.15
>0.0717	5	Muy Alta	46046.53

Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 28

Grado de amenaza por densidad Kernel de los puntos calientes



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.4. Amenaza por factor relieve

La pendiente del terreno es un factor de amenaza que incide de forma significativa en la propagación de incendios forestales, especialmente cuando actúa en conjunto con el viento. En terrenos inclinados, el fuego tiende a ascender con mayor facilidad, ya que las llamas y brasas alcanzan con facilidad las copas de los árboles en niveles superiores, generando una propagación ascendente continua y de difícil control. Además, las zonas de alta pendiente suelen presentar limitaciones de acceso que dificultan la intervención y el combate de los incendios.

En el caso del departamento del Tolima, la influencia del relieve montañoso es notable, dado que el territorio se encuentra entre las vertientes de la Cordillera Central y la Cordillera Oriental. Esto genera una topografía con predominancia de altas pendientes, a excepción del área correspondiente al valle del río Magdalena, que presenta condiciones más planas (Figura 30).

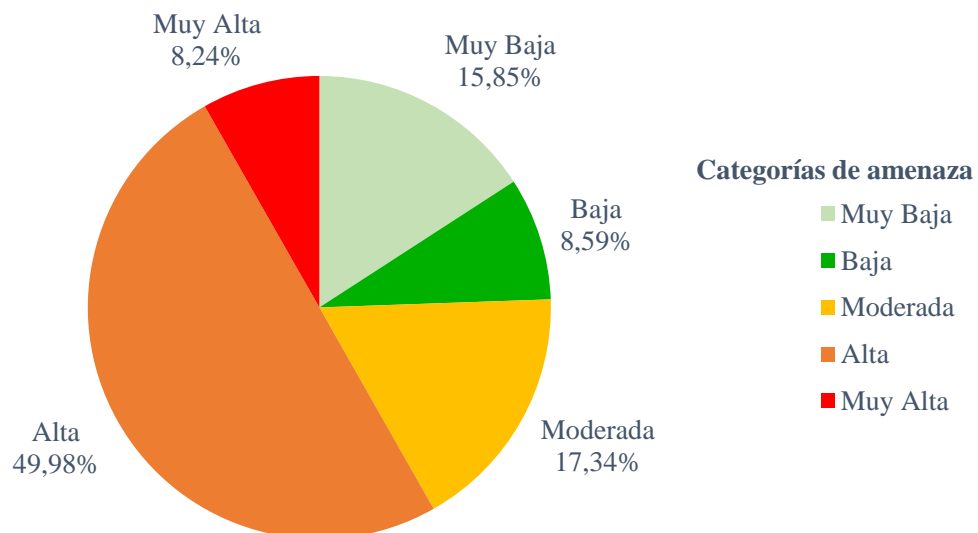
El análisis realizado muestra que aproximadamente el 49,98 % del territorio del Tolima se encuentra en la categoría de amenaza Alta, con pendientes que oscilan entre $11,26^\circ$ y $33,75^\circ$, lo que representa una condición de riesgo relevante para la propagación del fuego en gran parte del departamento (Figura 29).

Le sigue la categoría de amenaza Moderada, con un 17,34 % del área, asociada a pendientes entre 5,41° y 11,25°, en zonas de transición entre los valles y las laderas montañosas. En contraste, la categoría de amenaza Muy baja ocupa el 15,85 % del territorio, correspondiente a terrenos con pendientes suaves (0° a 3,15°), localizados principalmente en el valle del río Magdalena.

Finalmente, el 8,24 % del territorio se clasifica en la categoría de amenaza Muy alta, con pendientes superiores a 33,76°, ubicadas principalmente en zonas montañosas de difícil acceso, donde el riesgo de propagación de los incendios es mucho mayor (Tabla 28).

Figura 29

Grado de amenaza por grados de pendiente



Nota. Fuente Elaboración propia

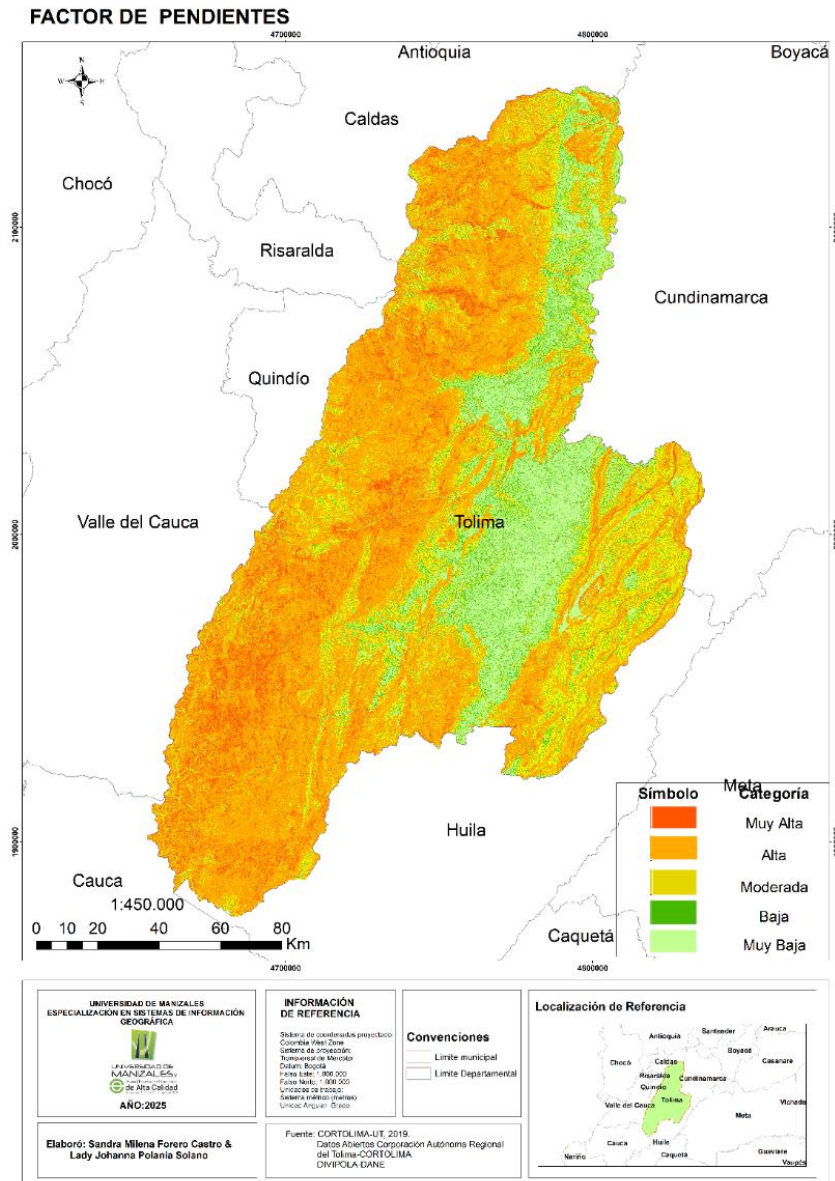
Tabla 30

Área perteneciente a cada categoría de amenaza por grados de pendiente

Grados de pendiente	Clasificación Pendiente (%)	Calificación	Categoría de Amenaza	Área (ha)
0 – 3,15	0 – 7	1	Muy Baja	382493.23
3,16 – 5,40	7 – 12	2	Baja	207199.09
5,41 – 11,25	12 – 25	3	Moderada	418298.34
11,26 – 33,75	25 – 75	4	Alta	1205704.08
>33,76	>75	5	Muy Alta	198862.04

Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 30
Mapa de amenaza por grados de pendiente



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.5. Amenaza por accesibilidad

El factor de accesibilidad se evaluó a partir de la proximidad a las vías de primer y segundo orden del departamento del Tolima, debido a su importancia funcional y volumen de tránsito vehicular. La presencia de estas vías expone a las coberturas vegetales, especialmente boscosas, a actividades humanas frecuentes como urbanización, construcción de infraestructura,

establecimientos comerciales, estaciones de servicio, centros educativos, entre otros. Estas dinámicas pueden ocasionar incendios de manera accidental o intencionados, aumentando el riesgo de incendios forestales en sus áreas de influencia.

Para categorizar este riesgo, se establecieron zonas buffer a cada costado de las vías principales, clasificando la amenaza en función de la distancia. Así, a menor distancia de las vías mayor será su grado de amenaza. Según se observa en la Figura 32, el 67,66 % del territorio del Tolima se clasifica en la categoría de amenaza Muy baja, lo cual corresponde a zonas que no presentan proximidad directa a vías de primer o segundo orden, reduciendo significativamente la exposición a factores de riesgo asociados a actividades humanas (Figura 31).

En contraste, la categoría de amenaza Muy alta representa el 9,71 % del área, asociada a zonas ubicadas a una distancia de 0 a 500 metros de las vías, donde la posibilidad de ocurrencia de incendios es más elevada por la alta presencia y circulación de personas. Le sigue la categoría de amenaza Alta, con un 8,30 % del territorio, correspondiente a áreas situadas entre 500 y 1.000 metros de las vías principales, donde aún persiste una influencia directa, aunque menos intensa.

Finalmente, se encuentran las categorías de amenaza moderada (7,49 %) y baja (6,84 %), correspondientes a distancias de 1.000 a 1.500 metros y 1.500 a 2.000 metros, respectivamente. Estas zonas presentan menor presión por actividades humanas y, por tanto, un riesgo reducido de generación de incendios asociados a la accesibilidad (Tabla 29).

Tabla 31

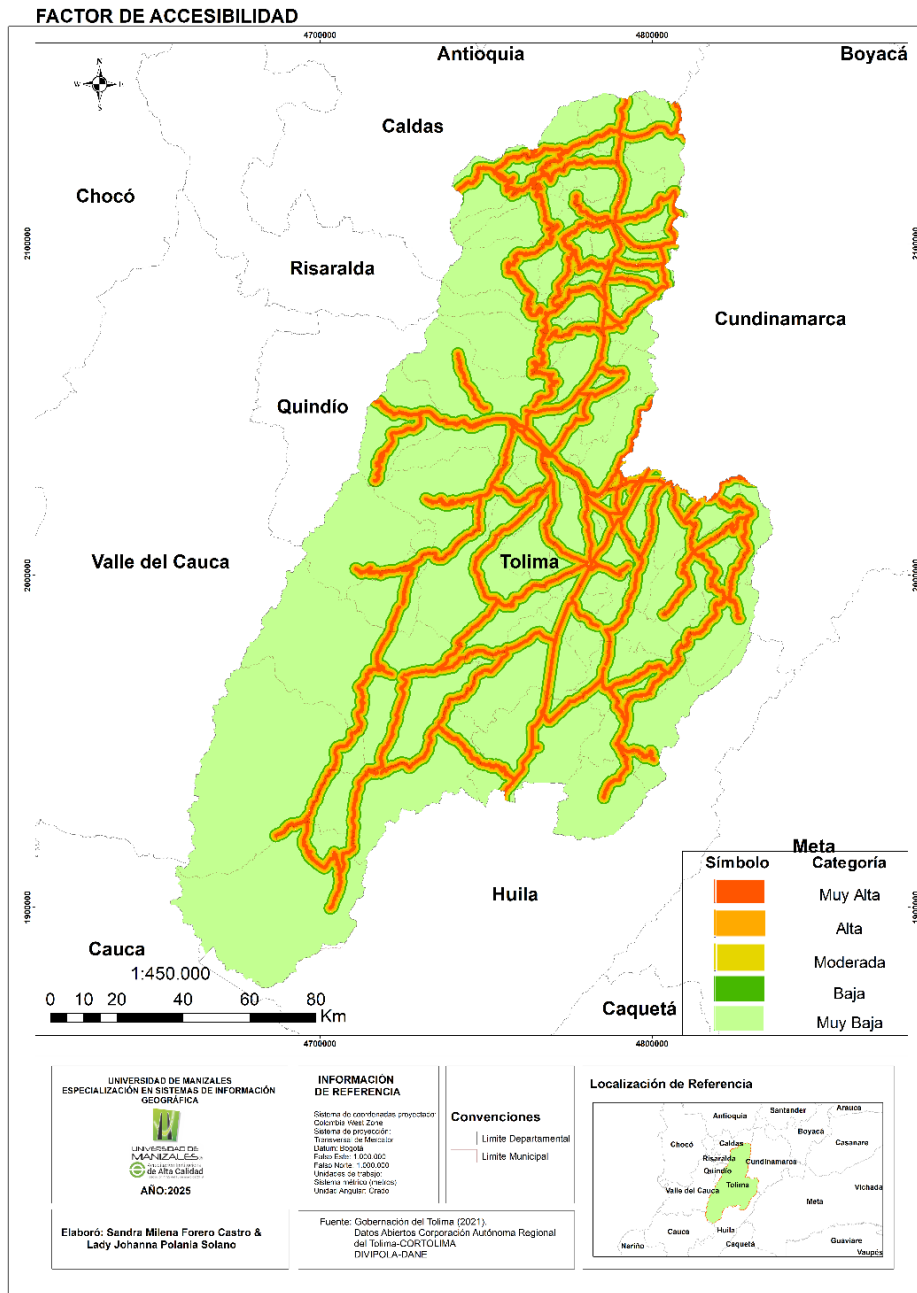
Área perteneciente a cada categoría de amenaza por accesibilidad

Distancia a la vía (ancho del buffer en m)	Calificación	Categoría de Amenaza	
>2000	1	Muy Baja	1632682.04
1500 – 2000	2	Baja	164968.27
1000 – 1500	3	Moderada	180821.43
500 – 1000	4	Alta	200347.98
0 – 500	5	Muy Alta	234334.24

Nota. Adaptado IDEAM (2011).

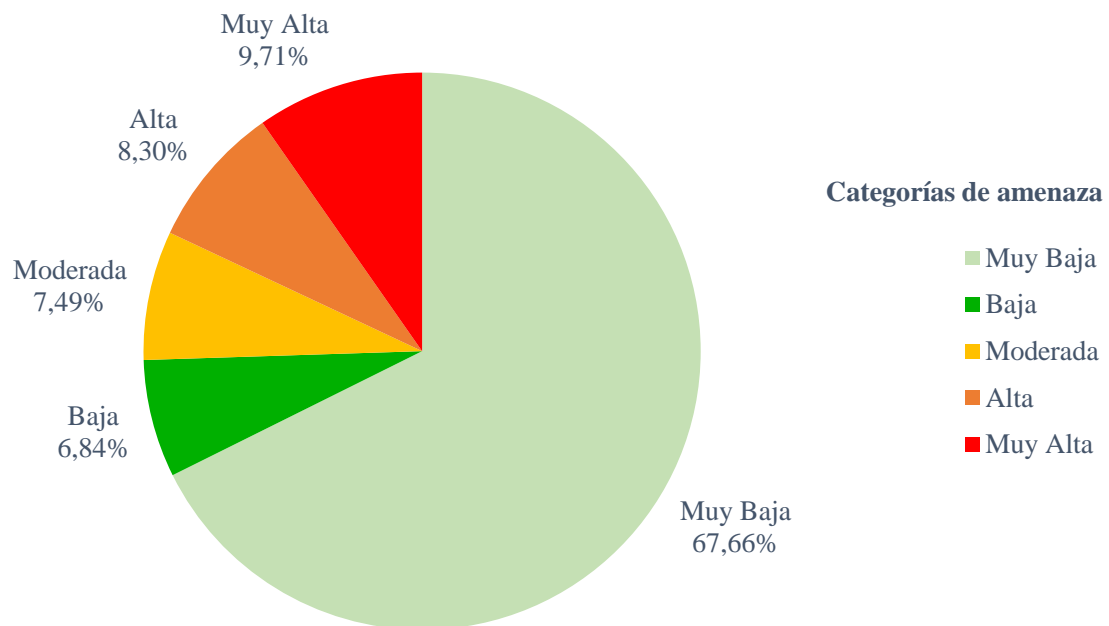
Figura 31

Mapa de amenaza por accesibilidad



Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 32
Grado de amenaza por accesibilidad



Nota. Fuente Elaboración propia

7.3.6. Amenaza Total

El mapa de amenaza total constituye el resultado final del modelo automatizado desarrollado en este estudio, integrando de manera ponderada los factores de susceptibilidad de la vegetación, condiciones climáticas, relieve, accesibilidad y antecedentes históricos. Por medio de este insumo es posible identificar y delimitar las áreas del departamento con mayor o menor riesgo potencial de ser afectadas por incendios forestales, según su comportamiento espacial.

Los resultados de este estudio muestran que cerca del 50,92 % del territorio del Tolima se encuentra en la categoría de amenaza Moderada, lo que indica que más de la mitad del departamento presenta condiciones combinadas de amenaza. Esta categoría predomina en las zonas de transición entre las vertientes montañosas y las planicies intermedias (Figura 33).

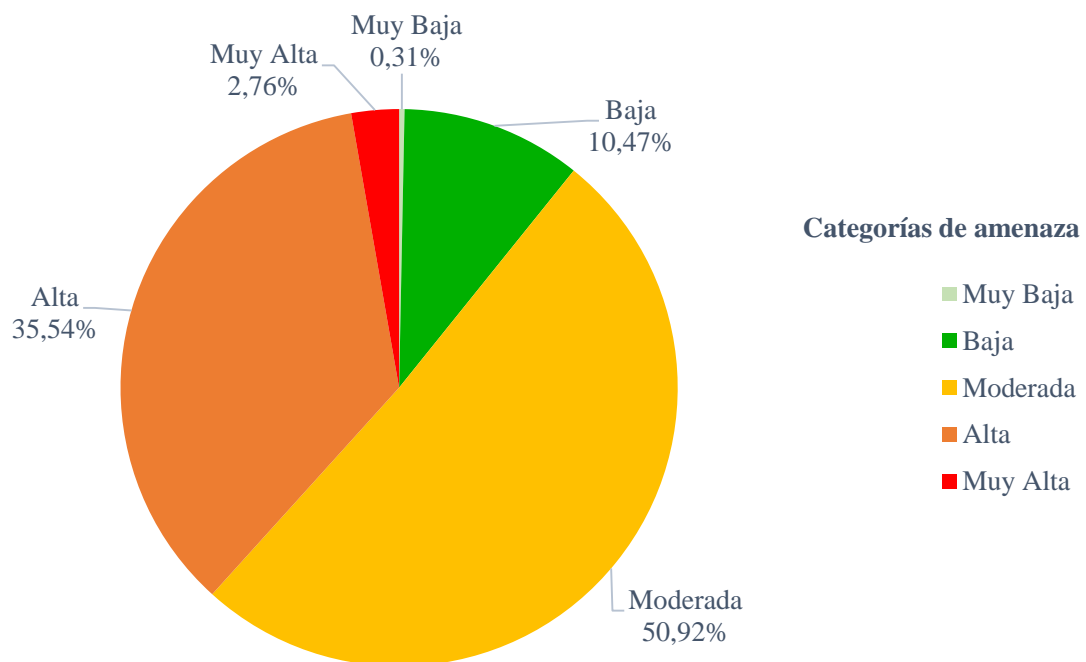
Le sigue la categoría de amenaza Alta, que abarca el 35,54 % del territorio. Estas áreas se concentran principalmente en el valle del río Magdalena, una región caracterizada por temperaturas elevadas, baja precipitación, alta accesibilidad y predominio de coberturas vegetales altamente combustibles. Adicionalmente, un 2,76 % del área se clasifica como de amenaza Muy alta, localizada también en sectores del valle del río de Magdalena con condiciones críticas de riesgo.

En conjunto, estas dos últimas categorías —Alta y Muy alta— representan aproximadamente el 38 % del territorio, evidenciando una porción significativa del departamento con alta susceptibilidad a incendios forestales, lo que requiere atención prioritaria en términos de prevención y monitoreo (Figura 34).

En contraste, el 10,74 % del territorio se clasifica en la categoría de amenaza Baja, y solo el 0,31 % en la categoría Muy baja. Estas zonas corresponden a áreas de alta montaña, particularmente en la vertiente oriental de la Cordillera Central, como en la región del páramo de Los Nevados, donde factores como las bajas temperaturas, alta humedad y menor intervención humana reducen significativamente el riesgo de ocurrencia de incendios (Tabla 30).

Figura 33

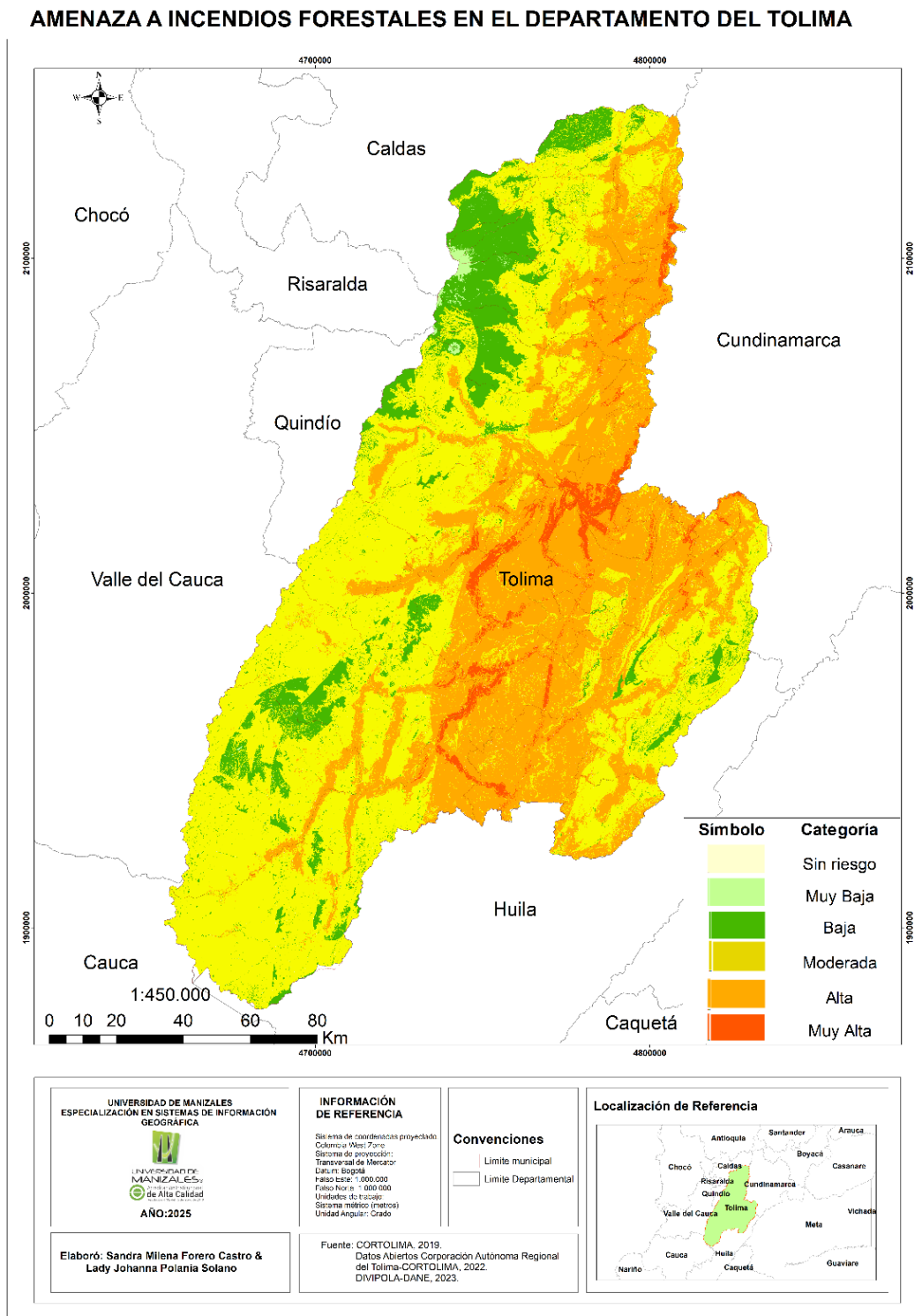
Grado de amenaza total por incendios en la cobertura vegetal



Nota. Fuente Elaboración propia

Figura 34

Mapa de amenaza total para el departamento del Tolima



Nota. Fuente Elaboración propia

Tabla 32

Área perteneciente a cada categoría de amenaza total

Índice de frecuencia de Amenaza	Calificación	Categoría de Amenaza	
1.680 - 2.226	1	Muy Baja	7573.99
2.226 - 2.772	2	Baja	252129.04
2.772 - 3.318	3	Moderada	1226462.36
3.318 - 3.864	4	Alta	855962.35
3.864 - 4.410	5	Muy Alta	66455.20

Nota. Fuente Elaboración propia

Mediante la zonificación de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima se evidencia una alta concentración de áreas clasificadas con niveles de amenaza “muy alta” y “alta”. De los 47 municipios que conforman el departamento, 22 municipios (equivalente al 46,8 % del total territorial) presentan zonas con estos niveles de riesgo, lo que indica una proporción considerable del territorio bajo amenaza potencial (Tabla 31).

El análisis espacial revela que los municipios más afectados se encuentran en la zona centro-este del departamento, principalmente en cercanía con el valle del río Magdalena. En esta región se destacan Coello, Flandes, El Espinal, Carmen de Apicalá, Guamo y Valle de San Juan, los cuales registran proporciones muy significativas de su superficie total con amenaza alta y muy alta.

Tabla 33

Área y porcentaje de área en categorías Muy alta y Alta para *municipios más susceptibles a incendios en el departamento del Tolima*.

Municipio	Área municipio (Ha)	Categorización amenaza				% total de amenaza
		Muy alta		Alta		
		Área (Ha)	% amenaza	Área (Ha)	% amenaza	
Espinal	21589.14	4179.88	19.4%	16681.84	77.3%	96.6%
Coello	34333.38	9160.21	26.7%	23785.60	69.3%	96.0%
Ambalema	23750.27	3251.44	13.7%	18969.62	79.9%	93.6%
San Luis	41047.08	4450.53	10.8%	32904.08	80.2%	91.0%
Coyaima	67575.86	6407.03	9.5%	54912.05	81.3%	90.7%
Natagaima	85898.23	2916.97	3.4%	74901.54	87.2%	90.6%
Guamo	50603.87	4365.39	8.6%	41318.00	81.7%	90.3%
Carmen de Apicala	18863.32	888.74	4.7%	15943.60	84.5%	89.2%
Flandes	9667.81	1023.11	10.6%	7529.84	77.9%	88.5%
Suarez	19055.89	809.31	4.3%	15857.95	83.2%	87.5%
Melgar	20174.89	1355.92	6.7%	16231.60	80.5%	87.2%
Piedras	35424.36	617.34	1.7%	29564.54	83.5%	85.2%
Saldaña	19258.07	389.81	2.0%	15320.49	79.6%	81.6%
Venadillo	33477.12	1640.93	4.9%	25189.46	75.2%	80.1%
Valle de San Juan	19846.00	3003.16	15.1%	12824.64	64.6%	79.8%

Armero	44021.13	2166.01	4.9%	30229.07	68.7%	73.6%
Ortega	95451.48	9717.73	10.2%	57094.29	59.8%	70.0%
Icononzo	21448.68	147.06	0.7%	9466.73	44.1%	44.8%
Ataco	99657.70	3419.22	3.4%	38986.98	39.1%	42.6%
Rovira	74091.92	1274.16	1.7%	23408.84	31.6%	33.3%
Ibagué	137023.62	798.98	0.6%	38106.41	27.8%	28.4%
Chaparral	210058.28	1948.84	0.9%	42634.43	20.3%	21.2%

Nota. Fuente Elaboración propia

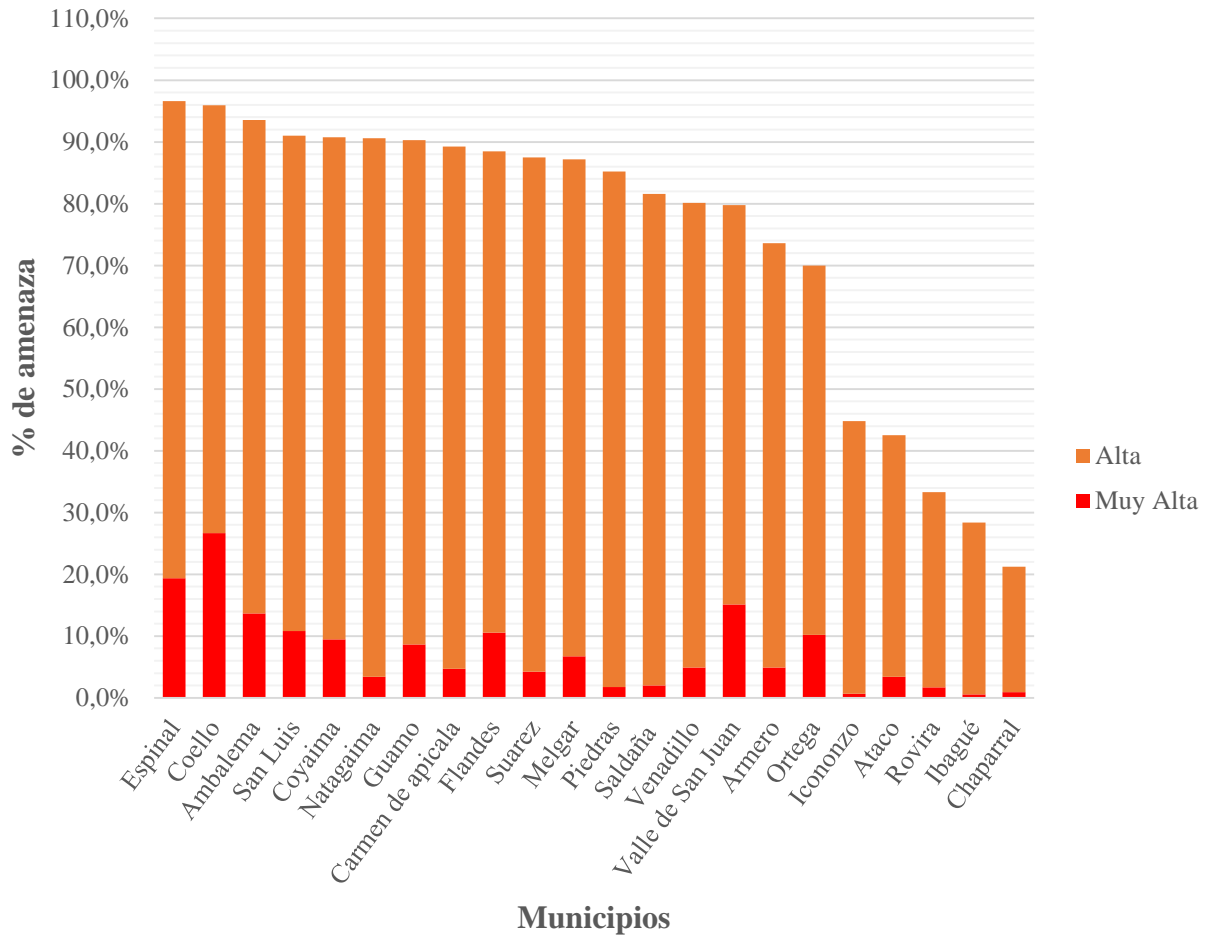
Por ejemplo, Coello presenta la mayor proporción del territorio en condición de amenaza, con un 95,96 % de su superficie afectada, distribuida en 26,68 % de amenaza muy alta y 69,28 % de amenaza alta. Le sigue El Espinal, con un 96,63 % de cobertura en estas categorías (19,36 % muy alta y 77,27 % alta), posicionándolo como uno de los municipios con mayor exposición a incendios forestales (Figura 35).

En la zona norte, municipios como Ambalema (93,56 %) y Armero Guayabal (73,59 %) también presentan niveles preocupantes, destacando que en Ambalema un 13,69 % del territorio se encuentra en categoría de amenaza muy alta. Por su parte, en la zona sur, los municipios de Natagaima y Coyaima registran una afectación del 90,59 % y 90,74 % respectivamente, lo cual refleja una distribución amplia y constante de áreas vulnerables en diversas regiones del departamento.

Los resultados obtenidos a través de la ejecución del modelo automatizado, demuestra la importancia de contar con una herramienta técnica para la identificación y priorización de las zonas críticas, y para el apoyo en la toma de decisiones en gestión del riesgo para el departamento del Tolima. A partir de estos productos, en el siguiente apartado se realizará la discusión de estos resultados respecto a estudios previos realizados en el departamento, y se plantean las consideraciones sobre los alcances y limitaciones del modelo desarrollado.

Figura 35

Porcentaje de amenaza Muy Alta y Alta de los municipios más susceptibles a incendios en el departamento del Tolima



Nota. Fuente Elaboración propia

8. Discusión

En este capítulo se realizará la discusión en interpretación de los resultados obtenidos a partir de la ejecución del modelo automatizado para la zonificación de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima, teniendo como base el protocolo diseñado por el IDEAM (2011). A través de este análisis se busca valorar cada uno de los factores que hace parte de la evaluación de la amenaza por incendio forestales, y cómo se relaciona con las características del territorio. Finalmente se determinará la utilidad del producto final como una herramienta de apoyo para la gestión del riesgo.

8.1. Interpretación del mapa de amenaza y su relación con el territorio Tolimense

Para la realización de la zonificación de amenaza por incendios forestales, es necesario revisar primero las relaciones entre los factores de susceptibilidad y de amenaza. De acuerdo con van der Werf et al. (2008), uno de los factores más determinantes a evaluar es el clima, ya que influye tanto en la distribución de la vegetación como en las características de los regímenes de incendios que la afectan.

En primer lugar, se identificó que cerca del 88,83 % del área del departamento del Tolima presenta una susceptibilidad alta a los incendios forestales. Esta situación se explica, en gran medida, por la vocación agropecuaria del territorio, caracterizada por coberturas como pastos, cultivos de arroz, cultivos transitorios y permanentes, las cuales se asocian con una categoría muy alta de susceptibilidad por tipo de combustible. A esto se suma el uso de prácticas tradicionales como las quemadas para el acondicionamiento de suelos, que aún persisten en algunas zonas del departamento (Cortolima, 2014), lo cual incrementa el riesgo de ocurrencia de incendios forestales.

Durante el periodo 2017–2018, según el IDEAM (2019), se reportaron cerca de 6.213 hectáreas de cobertura vegetal afectadas por incendios en el Tolima, posicionándose como el quinto departamento con mayor área impactada a nivel nacional. Esta cifra se ve respaldada por el trabajo de Pérez-Pineda (2021), quien documentó que entre 2010 y 2014 se reportaron 14.302,1 hectáreas afectadas, mientras que entre 2015 y 2020 la cifra ascendió a 47.938,6 hectáreas, representando un incremento del 335,2 %.

Por su parte, Perea Ardila, Leal Villamil y Alvarado (2024) analizaron la relación entre focos de calor y coberturas vegetales, encontrando que los bosques representaron el 16,06 % de los

focos, mientras que los mosaicos de pastos concentraron el 75 %. Estos resultados se correlacionan con el presente estudio, donde el 37,58 % del territorio del Tolima está cubierto por bosques densos y abiertos, y el 26,13 % por pastos limpios y enmalezados.

Respecto a los factores climáticos, la temperatura juega un papel determinante en la ocurrencia de incendios. El 36,31 % del Tolima presenta una amenaza muy alta asociada a temperaturas superiores a 24 °C, especialmente en el valle del río Magdalena. Esta región presenta una temperatura media anual de 26,8 °C y una precipitación entre 831 y 2.268 mm (Sánchez-Azofeifa et al., 2014), condiciones típicas del Bosque Seco Tropical (bs-T), el cual ocupa el 47,5 % del área nacional de este ecosistema dentro del Tolima (Díaz-Timoté, 2020).

Díaz-Timoté (2020) identificó un hotspot de incendios entre los municipios de Ortega y Coello, donde a pesar de existir mayores niveles de precipitación, también se registran las temperaturas máximas más altas. Durante la estación seca, el aumento de biomasa generado en la época húmeda se convierte en combustible disponible, favoreciendo la ignición (Argañaraz et al., 2015). Estas condiciones, sumadas a eventos climáticos como El Niño, elevan el riesgo de propagación de incendios debido a la disminución de la humedad y el aumento de temperaturas (Díaz-Timoté, 2020).

Urrego-Pereira et al. (2023) analizaron los datos climatológicos del Tolima entre 1980 y 2020 y concluyeron que, debido a la variabilidad climática, el departamento presenta zonas con clima tropical con invierno seco y zonas húmedas subtropicales con verano frío, en municipios como Saldaña y Santa Isabel. En un escenario de cambio climático, se pronostican aumentos significativos de temperatura para el año 2040, en algunos casos superiores a los 5 °C, lo que incrementaría la sensibilidad de las coberturas vegetales al fuego. Por ejemplo, se estima que municipios como Purificación e Ibagué tendrían aumentos de 3,22 y 3,58 °C, mientras que Melgar podría alcanzar un aumento de 6,98 °C, siendo uno de los escenarios más críticos del departamento.

La precipitación también es un factor clave. Este estudio evidenció que el 71,36 % del territorio tolimese se encuentra bajo amenaza alta, en rangos de precipitación anual entre 1.000 y 2.000 mm. Según Jaramillo y Chaves (2000), la región del alto Magdalena constituye uno de los núcleos secos del país, con precipitaciones cercanas a los 1.000 mm. Esta dinámica está determinada por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), que regula los flujos de aire húmedo en la región.

Además, Perea Ardila, Leal Villamil y Alvarado (2024) identificaron que los focos de calor se concentran en dos periodos: enero-marzo y julio-octubre, siendo febrero y septiembre los meses con mayor recurrencia. Los autores señalan que existe un desfase temporal entre la disminución de precipitaciones y la ignición, ya que la biomasa requiere entre uno y dos meses para alcanzar condiciones de inflamabilidad.

En cuanto a los resultados espaciales, este estudio evidencia que aproximadamente el 46,8 % del territorio del Tolima se encuentra bajo una amenaza alta o muy alta. Las zonas más críticas se localizan en la región centro-oriental, especialmente en Coello, El Espinal, Flandes, Carmen de Apicalá, Guamo y Valle de San Juan, que registran los mayores porcentajes de superficie afectada. Asimismo, se identifican niveles de amenaza preocupantes en el norte del departamento, donde Ambalema presenta un 93,56 % del territorio en estas categorías, y en el sur, Natagaima y Coyaima superan el 90 % de superficie bajo amenaza.

Estos resultados se relacionan estrechamente con el análisis de focos de calor de Perea Ardila, Leal Villamil y Alvarado (2024), quienes encontraron que la zona sur concentró el 33,91 % del total de focos, mientras que la provincia de Ibagué representó el 27,75 %, acumulando entre ambas el 61,66 % de los eventos. Asimismo, según reportes de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), durante el segundo semestre de 2024 los principales focos se localizaron en Natagaima, Alpujarra, Coello y Ortega, coincidiendo con la zonificación obtenida.

No obstante, la zonificación también permitió identificar nuevas áreas en riesgo, es decir, municipios que históricamente no habían presentado alta incidencia de incendios, pero que actualmente se clasifican con niveles altos o muy altos de amenaza. Este hallazgo es relevante, ya que evidencia un proceso de expansión territorial del riesgo, posiblemente asociado a cambios en el uso del suelo, el incremento de actividades antrópicas no reguladas o los efectos del cambio climático.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Armenteras et al. (2018), quienes señalan que los ecosistemas de bs-T presentan una alta presión antrópica, favoreciendo su degradación y vulnerabilidad a incendios forestales. Dicha presión está estrechamente relacionada con la facilidad de acceso humano, dado que estas áreas presentan bajas pendientes y alta accesibilidad. En esta misma línea, Vargas-Sanabria y Campos-Vargas (2020) concluyen que la expansión agropecuaria no solo genera pérdida de cobertura natural, sino que incrementa su susceptibilidad al fuego.

Finalmente, se identificó que, entre 1970 y 2020, cerca del 22,85 % de los eventos reportados en Tolima carecían de información sobre el área afectada (Pérez-Pineda, 2021), lo cual evidencia vacíos en el sistema de monitoreo y subraya la necesidad de fortalecer la gestión del riesgo por incendios forestales. Como señalan Penagos-Chavarrío y López-Rozo (2022), la mayoría de medidas en Colombia están enfocadas en la atención de desastres, por lo que es necesario articularlas con acciones preventivas, como la generación de conocimiento del riesgo y la participación activa de las comunidades.

Estas condiciones, sumadas a un régimen de precipitación bimodal (junio-agosto y diciembre-febrero) y temperaturas superiores a 28 °C en el valle del río Magdalena (IDEAM, 2015), configuran un escenario territorial altamente vulnerable, que demanda intervenciones integrales, preventivas y sostenibles para la mitigación del riesgo por incendios forestales.

8.2. Modelo automatizado para la zonificación de amenaza

El modelo automatizado desarrollado para la zonificación de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima integra, en su diseño, los geoprocursos y datos espaciales requeridos, organizados de manera sistemática y estructurada. Cada uno de los factores incluidos en el análisis cuenta con su respectiva valoración y ponderación, las cuales son normalizadas y representadas mediante capas ráster. Posteriormente, estas capas se integran mediante un proceso de suma ponderada para obtener el mapa de amenaza final.

Este modelo se constituye en una herramienta valiosa para la gestión del riesgo, ya que facilita la identificación de zonas prioritarias de intervención, y puede ser empleado en actividades de prevención, preparación y planificación territorial. Como se detalló en este estudio, su estructura incorpora la integración de múltiples factores: bióticos, como las coberturas vegetales; climáticos, incluyendo temperatura, precipitación, radiación solar y velocidad del viento; físicos, como la pendiente del terreno; antrópicos, representados por la accesibilidad vial; e históricos, mediante el análisis de focos de calor detectados en el territorio.

En el Anexo 4 se presenta el modelo completo implementado en ModelBuilder, donde es posible visualizar cada uno de los procesos utilizados y las capas de entrada, organizadas en grupos y subgrupos según su naturaleza. Esta organización permite, además, extraer y guardar módulos independientes, en función de los intereses específicos del análisis, lo que otorga al modelo un carácter modular y reutilizable.

La sistematización del proceso reduce la posibilidad de errores humanos y mejora la eficiencia operativa. Asimismo, el modelo permite ajustar con facilidad las capas de entrada en caso de que se actualicen o se modifiquen sus clasificaciones o escalas de valoración, manteniendo la consistencia en los resultados.

El tiempo de ejecución total del modelo depende de las características del procesador del equipo utilizado; sin embargo, su configuración está optimizada para trabajar con capas ráster a una resolución espacial de 12.5 metros. En caso de requerirse una resolución distinta, es necesario adaptar previamente los parámetros del modelo para mantener la integridad del procesamiento.

Desde una perspectiva operativa, el modelo permite reducir considerablemente los tiempos requeridos para la elaboración de mapas de amenaza, ya que, una vez se disponga de la información actualizada, solo es necesario normalizar los valores e iniciar la ejecución. Esta funcionalidad resulta especialmente útil en contextos institucionales donde se requiere generar insumos actualizados para la toma de decisiones de manera ágil.

Los mapas generados por este modelo son coherentes con los patrones identificados en la literatura científica, y proporcionan información espacialmente explícita que fortalece el conocimiento sobre las zonas más susceptibles a incendios forestales en el departamento del Tolima.

Su diseño flexible y replicable posibilita la aplicación de esta metodología en otras regiones del país, contribuyendo a la estandarización de procedimientos para la evaluación del riesgo. No obstante, es importante reconocer ciertas condiciones para su ejecución efectiva. Por ejemplo, para la generación del mapa de susceptibilidad de la vegetación, se requiere previamente identificar los tipos de cobertura presentes en el área de estudio y asignar las calificaciones correspondientes a los subfactores: tipo de combustible, duración del combustible y carga total.

Por último, si bien el modelo es técnicamente viable, se recomienda una evaluación periódica de sus entradas y parámetros, así como una validación con datos reales de ocurrencia, para asegurar su precisión y aplicabilidad en contextos diversos.

9. Conclusiones

Los resultados de este estudio evidenciaron que la implementación de un modelo automatizado para la zonificación de amenaza por incendios forestales en el departamento del Tolima, basado en el protocolo técnico del IDEAM (2011), permitió identificar con precisión las áreas clasificadas en cinco niveles de amenaza: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja. Específicamente, se estableció que el 2,76 % del territorio presenta amenaza muy alta, el 35,54 % amenaza alta, el 50,92 % amenaza moderada, el 10,47 % amenaza baja y el 0,31 % amenaza muy baja. En conjunto, un 38,3 % del departamento se encuentra bajo un nivel alto de amenaza, lo cual resalta la urgencia de priorizar estas zonas en la revisión, actualización y formulación de instrumentos de planificación y gestión del riesgo, tales como los Planes Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD), las Estrategias Municipales para la Respuesta a Emergencias (EMRE) y los fondos locales de gestión del riesgo.

El mapa generado permitió identificar municipios con proporciones alarmantes de su superficie en categorías de amenaza alta y muy alta, como Espinal (96,6 %), Coello (96,0 %), Ambalema (96,6 %), San Luis (91,0 %), Coyaima (90,7 %), Natagaima (90,6 %) y Guamo (90,3 %). La mayoría de estos municipios se ubican en la región centro-oriental del departamento, próxima al valle del río Magdalena, una zona que combina temperaturas elevadas, baja precipitación, alta accesibilidad y predominio de coberturas vegetales altamente combustibles, lo cual configura condiciones críticas de riesgo ante incendios forestales.

La automatización del modelo mediante la herramienta ModelBuilder facilitó la estructuración lógica y operativa de los geoprosesamientos necesarios, integrando variables clave como la cobertura vegetal, condiciones climáticas (temperatura, precipitación, radiación solar y viento), relieve, accesibilidad y antecedentes históricos. Este modelo, diseñado bajo un enfoque modular, demostró ser replicable, adaptable a otros territorios del país y compatible con distintas resoluciones cartográficas, lo que contribuye a la estandarización de metodologías para la gestión del riesgo por incendios forestales en Colombia.

Entre los hallazgos más relevantes se destaca que el 88,83 % de las coberturas vegetales del departamento presentan una alta susceptibilidad a incendios, siendo los pastos y cultivos de bajo porte —como el arroz— los que presentan mayor riesgo por sus características combustibles y su amplia distribución. Sin embargo, el modelo no arrojó un patrón espacial homogéneo por

municipio, lo cual sugiere la pertinencia de incorporar nuevas variables explicativas, como los usos actuales del suelo y las prácticas antrópicas predominantes (e.g., ganadería extensiva y uso del fuego en labores agropecuarias), para enriquecer futuros análisis.

Asimismo, los resultados espaciales reflejan una alta correspondencia entre las zonas clasificadas con amenaza alta o muy alta y aquellos municipios donde confluyen altas temperaturas, bajas precipitaciones, coberturas vegetales susceptibles y una frecuencia histórica elevada de incendios. Esta relación valida la metodología implementada y respalda la fiabilidad del modelo en la generación del mapa de amenaza.

Pese a no contar con información georreferenciada proveniente de los reportes de atención a emergencias por parte de los cuerpos de bomberos, esta limitación fue superada mediante el uso de registros satelitales provistos por la plataforma FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA, con datos de focos de calor entre 2014 y 2024. Esta fuente fortaleció el análisis del componente histórico y evidenció el valor de las plataformas abiertas para la integración de datos precisos, actualizados y georreferenciados, mejorando la confiabilidad del modelo y facilitando su actualización continua.

10. Recomendaciones

Se recomienda la elaboración de un manual técnico del modelo automatizado, que describa detalladamente los insumos, procesos, herramientas y consideraciones metodológicas involucradas. Este documento permitiría facilitar su implementación en otros territorios, asegurar una correcta aplicación técnica y servir como insumo para procesos de capacitación institucional. Esta recomendación cobra especial importancia considerando que el producto final de este trabajo responde a una solicitud formal de CORTOLIMA, orientada a la generación de un mapa departamental de riesgo por incendios forestales.

Aunque el modelo automatizado presenta una estructura flexible y replicable, conforme a los lineamientos metodológicos del IDEAM (2011), es fundamental realizar una verificación previa de los datos de entrada, en especial de los procesos de normalización y categorización de variables. Se sugiere realizar una revisión técnica periódica de las capas temáticas utilizadas, así como de los parámetros definidos, para asegurar la pertinencia y precisión del modelo frente a las condiciones actuales del territorio.

Asimismo, es recomendable ajustar el modelo a las particularidades de cada zona donde se pretenda aplicar. Por ejemplo, si estudios locales evidencian que un ecosistema específico presenta un comportamiento más combustible que lo establecido en las clasificaciones estándar, dicha información debería ser integrada al modelo para mejorar la precisión en la categorización de susceptibilidad. Esto permitirá adaptar la herramienta a contextos ecológicos, sociales y productivos específicos.

Se sugiere promover el acceso a los productos generados por parte de los entes territoriales y cuerpos de bomberos municipales del departamento, con el fin de fortalecer sus capacidades en prevención, planificación y respuesta ante incendios forestales. La socialización de estos resultados puede traducirse en una mejor articulación interinstitucional y en la implementación de acciones más efectivas y oportunas.

Dado que el modelo fue desarrollado mediante la herramienta ModelBuilder del software ArcGIS Pro, su aplicabilidad se limita a entornos SIG con licencia. Por ello, como siguiente fase del estudio, se recomienda exportar la lógica del modelo a un script en Python, de modo que pueda ser adaptado y ejecutado en plataformas de software libre como QGIS. Este proceso requerirá

ajustes en la sintaxis, en las rutas de acceso a datos y en los algoritmos de geoprocésamiento, pero permitiría ampliar significativamente el acceso y la aplicabilidad del modelo.

Adicionalmente, se recomienda el diseño e implementación de campañas de sensibilización dirigidas a los sectores productivos más vulnerables, destacando que los incendios forestales no solo generan impactos ambientales, sino también afectan la productividad agropecuaria, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los medios de vida rurales.

Finalmente, se enfatiza la importancia de actualizar de forma periódica las variables utilizadas en la zonificación, especialmente las relacionadas con el clima. La creciente variabilidad y las anomalías climáticas derivadas del cambio climático pueden modificar significativamente los niveles de amenaza en el territorio. Por tanto, contar con datos actualizados es clave para mantener la vigencia, precisión y utilidad de los análisis y productos generados.

Referencias

- Argañaraz, J. P., Pizarro, G. G., Zak, M., & Bellis, L. M. (2015). Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecology*, *11*(1), 55–73. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1101055>
- Arias Murcia, K. Y. (2016). Zonificación de amenazas por incendios forestales en el sector rural del municipio de Tota Boyacá con el empleo de SIG.
- Armenteras, D., González, T., Meza, M., Ramírez-Delgado, J. P., Cabrera, E., Galindo, G., & Yepes, A. (2018). *Causas de degradación forestal en Colombia: Una primera aproximación*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Programa ONU-REDD.
- Benitez-Flores, D.P. (2023). Análisis de Amenazas por incendios forestales en el Parque Nacional Natural Paramillo.
- Camacho Reyes, M. A. Zonificación de amenaza por incendios forestales en el municipio de Yopal-Casanare.
- Castañeda-Quinchia, D. (2019). Como orientar la gestión del riesgo de desastres por incendios forestales a nivel municipal
- Castañeda-Quinchía, J. A. (2019). Gestión del riesgo contra incendios y atención de emergencias en el Alto Magdalena: análisis institucional e implementación de la política pública en el periodo 2012-2019. Universidad Nacional de Colombia.
- Centro de Estudios Agrarios y Ambientales [CEA] (2013). Zonificación de ecosistemas, de <http://www.ceachile.cl/zonificacion.htm>
- Centro de Estudios Agrarios y Ambientales. (2013). Zonificación de ecosistemas.
- Centro de Estudios Agrarios y Ambientales. (2013). Manual de zonificación de riesgos. Santiago de Chile.
- Chen, D., Zeng, A., He, Y., Ouyang, Y., Li, C., Tigabu, M., Wang, W., Ni, R., Zhang, J., & Guo, F. (2025). Study on Small-Scale Forest Fire Risk Zoning Based on Random Forest and the Fuzzy Analytic Network Process. *Forests*, *16*(1). <https://doi.org/10.3390/f16010097>
- Cochrane, M. A. (2003). Fire science for rainforests. *Nature*, *421*(6926), 913-919.
- Comisión Nacional Forestal (2010). Incendios Forestales, guía práctica para comunicadores. (Tercera edición), 6-8.

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). (2023, junio). *El cambio climático es uno de los principales factores de los grandes incendios forestales*. <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/el-cambio-climatico-es-uno-de-los-principales-factores-de-los-grandes-incendios-forestales>

Coral Chacón, F. R., & Chamorro Benavides, J. P. (2016). Zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Cauca.

Corporación Autónoma Regional del Tolima - Cortolima. (2024, 1 de julio). *4263 incendios forestales han afectado más de 10.000 hectáreas de bosque seco del Tolima*. <https://cortolima.gov.co/sala-de-prensa/noticias/4263-incendios-forestales-han-afectado-mas-de-10-000-hectareas-de-bosque-seco-del-tolima>

Corporación Autónoma Regional del Tolima, (Cortolima). (2014). *Atlas ambiental del Tolima. Corporación Autónoma Regional del Tolima*. <https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/atlas/>

Cunningham, C. X., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. J. S. (2024). Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 8(8), 1420–1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>

Del Campo Parra-Lara, Á., & Bernal Toro, F. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina*, (35), 67-81.

Díaz Timoté, J. J. (2020). *Descripción del régimen de incendios del bosque seco tropical de la cuenca alta del Río Magdalena y su relación con la variación climática* (Master's thesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia)).

Dwyer, A., Zoppou, C., Nielsen, O., Day, S., & Roberts, S. (2004). Quantifying social vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards. *Geoscience Australia*.

Elghazoli, H. J., Hosny, M. M., Elnaggar, A. M., & Elhelw, E. A. (2019). Utility Mapping using GIS: towards an automatic alert system using ArcGIS ModelBuilder. *Engineering Research Journal (Shoubra)*, 42(1), 145–151.

- ESRI, 2012. ¿Qué es model builder?. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#na/009t0000002000000/>
- ESRI, 2016. ARCGIS Pro. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/proapp/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>
- Esri. (2024a). ArcGIS Pro: Descripción general del producto. <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Esri. (2024b). ¿Qué es el geoprocésamiento? ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/proapp/latest/help/analysis/geoprocessing/basics/what-is-geoprocessing-.htm>
- Esri. (2024c). ¿Qué es ModelBuilder? ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/proapp/3.3/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>
- Esri. (2024d). Recorrido rápido por ModelBuilder. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/proapp/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/modelbuilder-quick-tour.htm>
- Esri. (2024e). Vocabulario de ModelBuilder. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/proapp/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/modelbuilder-vocabulary.htm>
- Esri. (2024f). Agregar, conectar y modificar datos y herramientas en un modelo. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/proapp/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/add-connect-and-modify-data-and-tools-in-a-model.htm>
- FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>
- Faramarzi, H., Hosseini, S. M., Pourghasemi, H. R., & Farnaghi, M. (2021). Forest fire spatial modelling using ordered weighted averaging multi-criteria evaluation. *Journal of Forest Science*, 67(2), 87-100. <https://doi.org/10.17221/50/2020-JFS>
- Fernández García, E. (2012). Ejemplos de aplicación de Model Builder de Arc Gis 10 en la gestión forestal. <http://hdl.handle.net/10651/4164>
- Florez Garnica, J. G. F., Benavides Solorio, J., Casillas Díaz, U. D., Hernández Navarro, M. Á., & Leal Aguayo, H. J. (2016). Manual para la elaboración de Mapas de Riesgo de Incendios Forestales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Forero Huertas, A. F. (2016) Identificación del Riesgo por Incendios Forestales en el Municipio de Villa de Leyva, Boyacá a Través de un Sistema de Información Geográfica y Percepción

Remota como Complemento al Plan de Atención y Prevención de Desastres y Gestión del Riesgo Municipal.

Forero Luque, L. S. Zonificación de Amenazas por Incendios Forestales en el Municipio de San Juan de Rioseco Cundinamarca Según Metodología IDEAM.

Fuenzalida, M., Cobs, V., & Guerrero, R. (2013). El territorio como unidad de análisis en estudios sobre las determinantes sociales de la salud. *Argos*, 30(59), 87-106. Retrieved from http://www.academia.edu/27985206/El_territorio_como_unidad_de_an%C3%A1lisis_en_estudios_sobre_las_determinantes_sociales_de_la_salud

Hidayat, D., & Andajani, S. (2018). Development Land Erosion Model Using Model Builder GIS (Case Study: Citepus Watershed). *MATEC Web Conf.*, 147, 3003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814703003>

Ideam, IAvH, Invemar, IIAP, & Sinchi. (2019). *Informe del estado del ambiente y los recursos naturales renovables*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2005). Atlas climatológico nacional.

IDEAM. (2011). Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000 / ajustado. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

IDEAM. (2011). Protocolo para la zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por incendios de la cobertura vegetal. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Bogotá. 97 pp.

IDIGER, S. (2017). Plan de Contingencia Distrital de Incendios Forestales.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Atlas interactivo de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/tolima_texto.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019). *Informe del estado del ambiente y los recursos naturales renovables, 2017-2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- Jaramillo, A., & Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé* 51(2): 102-113.
- Jing, X., Li, X., Zhang, D., Liu, W., Zhang, W., & Zhang, Z. (2024). Forecast Zoning of Forest Fire Occurrence: A Case Study in Southern China. *Forests*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/f15020265>
- Jones, M. W., Kelley, D. I., Burton, C. A., di Giuseppe, F., Barbosa, M. L. F., Brambleby, E., Hartley, A. J., Lombardi, A., Mataveli, G., McNorton, J. R., Spuler, F. R., Wessel, J. B., Abatzoglou, J. T., Anderson, L. O., Andela, N., Archibald, S., Armenteras, D., Burke, E., Carmenta, R., ... Xanthopoulos, G. (2024). State of Wildfires 2023–2024. *Earth System Science Data*, 16(8), 3601–3685. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024>
- Keipi, K., Mora, J., & Bastidas, S. (2005). Gestión del riesgo natural en América Latina y el Caribe: Avances y desafíos. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012. D.O. No. 48411
- Ley 599 de 2000. Por la cual se expide el Código Penal. 24 de julio de 2000. D.O No. 44097.
- MappingGIS, 2016. ModelBuilder o Phyton. Disponible en: <http://mappinggis.com/2015/06/model-builder-o-python/>
- Martinez, C. (2017). Automatización de la creación de mapas de isocoropletas a partir de la información raster en el atlas nacional de España https://oa.upm.es/47205/1/TFM_%20CLARA_MARTINEZ_DE%20IBARRETA_SORIANO.pdf
- https://oa.upm.es/47205/1/TFM_%20CLARA_MARTINEZ_DE%20IBARRETA_SORIANO.pdf (Accessed: 07 November 2024).
- Mejía Quesada, C. E. (2017). La zonificación de riesgos a incendios forestales en la cuenca del río Coello en el departamento del Tolima.
- Meyhuay, T. T., Vera, J. C., & Antúnez, R. B. (2018). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la zona urbana del distrito de Chiquián, utilizando el model builder del ArcGIS. *Aporte Santiaguino*, 11(2), 263-274.

- Morales-Salguero, J.R. (2017). Determinación del riesgo de ignición y propagación de incendios forestales en los cerros orientales de Bogotá a través del algebra de mapas y simulación. Universidad distrital francisco José de Caldas.
- Moreno, L. A., Andrade, G. I., & Ruíz-Contreras, L. F. (2016). Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. *Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, DC, Colombia.*
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858.
- Naderpour, M., Rizeei, H. M., & Ramezani, F. (2021). Forest Fire Risk Prediction: A Spatial Deep Neural Network-Based Framework. *Remote Sensing*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/rs13132513>
- Noticieros en línea. (2016, 15 de febrero). Colombia perdió unos 140 mdd por incendios forestales en 2015. <https://noticierosenlinea.com/internacional/2016/feb/15/colombia-perdio-unos-140-mdd-por-incendios-forestales-en-2015-5004.html>
- Oliveira, D. (2002). Zoneamento de risco de incêndios em Povoamentos Florestais no Norte de Santa Catarina. (Tesis de Posgrado). Universidad Federal de Paraná, Brasil
- Organización Mundial de la Salud. (2000). *Air quality guidelines for Europe: Carbon monoxide*. WHO Regional Publications.
- Páramo, G. (2007). Análisis, Diagnóstico y Elaboración del mapa de susceptibilidad a los incendios de la cobertura vegetal en Colombia. [https://www.corpamag.gov.co/archivos/riesgosAmbientales/2017_Doc07_Incendios .pdf](https://www.corpamag.gov.co/archivos/riesgosAmbientales/2017_Doc07_Incendios.pdf)
- Parra-Lara, A. del C., Armenteras, D., Bernal-Toro, F. H., Gonzáles-Alonso, F., Morales-Rivas, M., & Pabón-Caicedo, J. D. (2011). Incendios de la cobertura vegetal en Colombia (Vol. 1). Universidad Autónoma de Occidente. https://www.researchgate.net/publication/236211463_Incendios_de_la_cobertura_vegetal_en_Colombia
- Penagos Chavarrio, L., & López Rozo, M. A. (2022). Gestión del riesgo contra incendios y atención de emergencias en el Alto Magdalena: Análisis institucional e implementación de la política pública en el periodo 2012-2019. Universidad Externado de Colombia.

- Perea Ardila, M. A., Leal Villamil, J., & Alvarado, S. T. (2024). Análisis de focos de calor para el departamento del Tolima (Colombia). Una aproximación empleando MODIS. *LatArXiv*. <https://doi.org/https://doi.org/10.62059/LatArXiv.preprints.131.v2>
- Perea Ardila, M., & Murillo-Sandoval, P. (2024). *Tendencia de incendios forestales en el Tolima: Visión histórica usando imágenes satelitales*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11595.60964>
- Pérez Pineda, L. M. (2021). *Análisis cronológico y de riesgo por incendios forestales en páramos y bosques altoandinos en Colombia desde los años 70*. Universidad de los Andes.
- Prado Fajardo, M. (2014). Diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas en riesgo por incendios forestales en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/42020/1/822283.2014.pdf>
- Rocha Guzman, D. Y., & Valenzuela Olaya, D. (2021). Zonificación De Amenaza Por Incendios Forestales En El Municipio De Nimaima Cundinamarca.
- Sánchez Castillo, N. (2023). Identificación Espacial De Areas Con Amenaza De Incendio Forestal En Elmunicipio De Cota Cundinamarca, Empleando Sistemas De Informacion Geografica A Escala 1: 25.000.
- Sánchez-Azofeifa, A., Calvo-Alvarado, J., Espírito-Santo, M. M. Do, Fernandes, G. W., & Powers, J. (2014). *Tropical Dry Forests in the Americas*. <https://doi.org/doi:10.1201/b15417-2>
- SIGNatura, 2014. Model Builder Sextante (gvSIG, QGIS). Disponible en: <https://signatura21.wordpress.com/2014/11/13/model-buildersextante-gvsig-qgis/>
- Silalahi, F. E. S., & Hidayat, F. (2020). Modelbuilder and Unit Hydrograph for Flood Prediction and Watershed Flow Direction Determination at The West Branch of The Little River, Stowe, Lamoille County, Vermont, USA. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 6(2), 89-98. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.6.2.89-98>
- Smith, D. M., & Bradshaw, C. J. A. (2013). Impacts of wildfire on human populations. *Journal of Environmental Management*, 130, 162-169
- Stefanidis, S. P., Chatzichristaki, C. A., & Stefanidis, P. S. (2021). An ArcGIS toolbox for estimation and mapping soil erosion. 22(2), 689–696.
- Suárez, J. (2009). Zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. Colombia: Editorial Universidad Industrial de Santander.
- Talero Rodriguez, Y. A. (2021). Empleo de SIG en la zonificación de amenaza por Incendios de la cobertura vegetal en Cuítiva-Boyacá escala 1: 25000.

- Talero Rodriguez, Y. A. (2021). Empleo de SIG en la zonificación de amenaza por Incendios de la cobertura vegetal en Cuítiva-Boyacá escala 1: 25000. Universidad Antonio Nariño
- Tan, C., & Feng, Z. (2023). Mapping Forest Fire Risk Zones Using Machine Learning Algorithms in Hunan Province, China. *Sustainability*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15076292>
- Umaña, C. (2017). La zonificación del riesgo: una herramienta para la gestión territorial en contextos de vulnerabilidad. *Revista Gestión y Ambiente*, 20(1), 15–28.
- UNGRD. (2019). Lo que usted debe saber sobre incendios de cobertura vegetal. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>
- Urrutia Garcés, C. A. (2020). Zonificación de riesgos a incendios forestales en zona rural del municipio de Santiago de Cali.
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., et al. (2013). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires. *Frontiers in Environmental Science*.
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N., Dolman, A. J. (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*. 22 (3): 1-13. <https://doi.org/10.1029/2007GB003122>
- Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2020). Comparación multitemporal de áreas quemadas en un bosque seco tropical utilizando el índice de área quemada (IAQ). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 29-36. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i41.5280>
- Vega Hidalgo, M., & Díaz Raviña, M. (2023). *Impacto de los incendios forestales sobre la calidad del suelo*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). <https://digital.csic.es/handle/10261/329674>
- Yang, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2021). Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. *Forests*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/f12101299>
- Zandbergen, P. A. (2015). *Python scripting for ArcGIS*. Esri press.
- Zhu, X. (2010). *Piezoelectric ceramic materials: Processing, properties, characterization, and applications* (pp. 1-34). Hong Kong, China: Nova Science Publishers.

Anexos

Anexo 1. Insumos cartográficos y sus fuentes

Etapa	Información requerida	Descripción	Factor	Fuente
Preparación	Limites Político Administrativos	Límites oficiales de la Corporación del departamento y municipios del área a zonificar a escalas 1:25:000 (<i>LimiteMunicipal_25K_2022</i>)	Todos	CORTOLIMA
	Hidrografía	Cartografía de la red hidrográfica (ríos, quebradas, lagos, lagunas) escalas 1:25:000 (<i>Drenajes_Tolima_25K_MT</i>), (<i>Lagunas_MK_2023</i>)	Salidas graficas	IGAC
Análisis de susceptibilidad	Cobertura de la tierra CLC	Cartografía actualizada de coberturas de la tierra según la clasificación Corine Land Cover (CLC) AÑO 2019 clasificados al tercer nivel, Escala 1:25.000, (<i>CoberturaTierra_CLC_2019</i>)	Mapa de susceptibilidad por tipo de combustible; mapa de susceptibilidad por carga de combustible; mapa de susceptibilidad por duración del combustible	CORTOLIMA
Análisis de Amenazas	Vias_MK_Tolima	Cartografía de vías primarias, secundarias y terciarias, Escala MK (<i>Vias_Tolima_Gobern_MK_2021</i>)	Amenaza por Accesibilidad	GOBERNACION DEL TOLIMA
	Pendientes_	Cobertura Raster de pendientes del dpto. del Tolima utilizado en la actualización de PGOF año 2019 (<i>Pendientes</i>)	Amenaza por Pendiente	CORTOLIMA - UT
	Mapa de precipitación	Precipitación media anual y multianual en milímetros (Raster, <i>Precipitacion_anual</i>)	Amenaza por Precipitación	INSUMOS "ERA" FASE I
	Mapa de temperatura	Temperatura media anual y multianual en grados centígrados (<i>Raster Temperatura promedio anual</i>)	Amenaza por Temperatura	INSUMOS "ERA" FASE I

Estadística sobre Frecuencia y número de incendios y de la cobertura vegetal	Consolidación de incendios forestales años 2014-2024, plataforma NASA FIRMS	Amenaza por Frecuencia	NASA FIRMS
Mapa dirección y velocidad de vientos predominantes	Datos de medias anuales y multianuales de dirección y velocidad de los vientos predominantes (<i>VelViento_Anual_2000-2010</i>)	Amenaza por Vientos	IDEAM
Mapa de Radiación solar	Mapa que contiene las medias anuales y multianuales de radiación solar (<i>CN2_Rdcn_Solar_Global_ProAnual_Tolima</i>)	Amenaza por Radiación solar	IDEAM

Nota: Fuente Elaboración propia

Anexo 2. Características del combustible vegetal para las categorías del nivel 3 del sistema Corine Land Cover para Colombia (IDEAM, 2011).

Tipo de cobertura (Nivel 3)	Tipo de combustible	Calificación	Duración de combustible	Calificación	Carga total de combustible	Calificación
1.1.1. Tejido urbano continuo	Áreas urbanas	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Áreas urbanas	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.1.3 Construcciones Rurales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos	No combustibles asociados	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.2.4. Aeropuertos	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.2.5. Obras hidráulicas	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.3.1. Zonas de extracción minera	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.3.2. Zona de disposición de residuos	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
1.4.1. Zonas verdes urbanas	Pastos	5	1 hora	1	Menos de 1 ton	1
1.4.2. Instalaciones recreativas	Pastos	5	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
2.1.1. Otros cultivos transitorios	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.1.2. Cereales	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.1.4. Hortalizas	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.1.5. Tubérculos	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2

2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	Arbustos	3	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	Árboles	1	100 horas	3	más de 100 ton/ha	4
2.2.4. Cultivos agroforestales	Pastos	3	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
2.2.5. Cultivos confinados	Hierbas	4	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
2.3.1. Pastos limpios	Pastos	5	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
2.3.2. Pastos arbolados	Pastos	5	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
2.3.3. Pastos enmalezados	Pastos/hierbas	5	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
2.4.1. Mosaico de cultivos	Hierbas	4	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Pastos/hierbas	5	10 horas	2	1-50 ton/ha	2
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Pastos/hierbas/arbustos/árboles	3	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Pastos/hierbas/arbustos/árboles	3	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	Pastos/hierbas/arbustos/árboles	3	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
3.1.1. Bosque denso	Árboles	1	100 horas	3	más de 100 ton/ha	4
3.1.2. Bosque abierto	Arboles	1	100 horas	3	más de 100 ton/ha	4
3.1.3. Bosque fragmentado	Árboles	2	100 horas	3	más de 100 ton/ha	4
3.1.4. Bosque de galería y ripario	Árboles	1	100 horas	3	más de 100 ton/ha	4
3.1.5. Plantación forestal	Árboles	1	100 horas	3	más de 100 ton/ha	4

3.2.1. Herbazal	Hierbas	4	10 hora	2	1-50 ton/ha	2
3.2.2. Arbustal	Arbustos	3	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	Arboles/arbustos	2	10 horas	2	50-100 ton/ha	3
3.3.1. Zonas arenosas naturales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
3.3.4. Zonas quemadas	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
4.1.1. Zonas pantanosas	Hierbas	4	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
4.1.2. Turberas	Hierbas	4	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	Hierbas	4	1 hora	1	1-50 ton/ha	2
5.1.1. Ríos (50 m)	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
5.1.3. Canales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	No combustibles	0	No combustibles	0	No combustibles	0

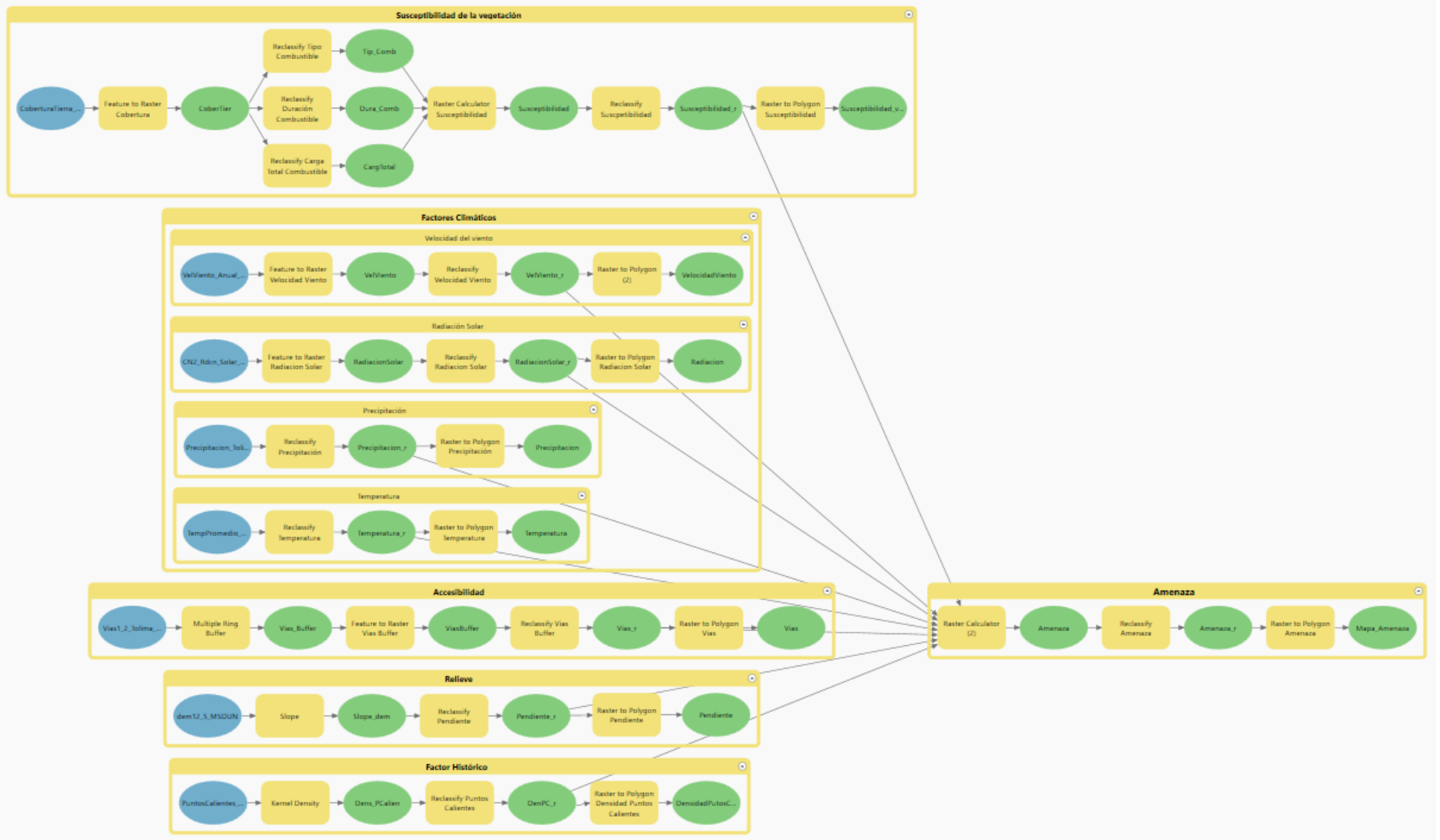
Nota: Fuente adaptado al protocolo del IDEAM (2011)

Anexo 3. Calificación y categorización de los factores de amenaza.

Factor	Rango	Calificación	Categoría Susceptibilidad
Susceptibilidad de la vegetación	0 - 5	1	Muy Baja
	5 - 6	2	Baja
	6 - 7	3	Moderada
	7 - 8	4	Alta
	8 - 9	5	Muy Alta
Precipitación Media Anual (mm)	>7000	1	Muy Baja
	3000 – 7000	2	Baja
	2000 – 3000	3	Moderada
	1000 – 2000	4	Alta
	0 – 1000	5	Muy Alta
Temperatura media anual (°C)	<6°	1	Muy Baja
	6° - 12°	2	Baja
	12° 18°	3	Moderada
	18° - 24°	4	Alta
	>24°	5	Muy Alta
Radiación media anual (KWh/m2/año)	<3,0	1	Muy Baja
	3,0 – 4,0	2	Baja
	4,0 – 5,0	3	Moderada
	5,0 – 6,0	4	Alta
	>6,0	5	Muy Alta
Velocidad media multianual del viento (m/s)	<2,0	1	Muy Baja
	2,0 – 3,0	2	Baja

	3,0 – 4,0	3	Moderada
	4,0 – 5,0	4	Alta
	>5,0	5	Muy Alta
Grados de pendiente	0 – 3,15	1	Muy Baja
	3,16 – 5,40	2	Baja
	5,41 – 11,25	3	Moderada
	11,26 – 33,75	4	Alta
	>33,76	5	Muy Alta
Estimación de Densidad Kernel (KDE)	< 0.0179	1	Muy Baja
	0.0179 - 0.0358	2	Baja
	0.0358 - 0.0538	3	Moderada
	0.05378 - 0.0717	4	Alta
	>0.0717	5	Muy Alta
Distancia a la vía (ancho del buffer en m)	>2000	1	Muy Baja
	1500 – 2000	2	Baja
	1000 – 1500	3	Moderada
	500 – 1000	4	Alta
	0 – 500	5	Muy Alta
Índice de frecuencia de amenaza	1.680 - 2.226	1	Muy Baja
	2.226 - 2.772	2	Baja
	2.772 - 3.318	3	Moderada
	3.318 - 3.864	4	Alta
	3.864 - 4.410	5	Muy Alta

Anexo 4. Modelo de automatización para la generación de la zonificación de amenaza por incendios de la cobertura vegetal.



Nota: Fuente Elaboración propia