

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI

POSGRADO



MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL CON MENCIÓN EN SOSTENIBILIDAD

“Estrategias para la prevención y control de incendios forestales en la Comuna La Esperanza, Provincia Carchi”

Trabajo de titulación previa la obtención del
Título de Magister en Gestión Ambiental con Mención en Sostenibilidad

Autora: Angie Daniela Escobar Portilla

Tutor: Msc. Diego Leopoldo Mejía Romo

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que la maestrante Escobar Portilla Angie Daniela con el número de cédula 1004813695 ha elaborado el trabajo de titulación: “Estrategias para la prevención y control de incendios forestales en la Comuna La Esperanza, Provincia Carchi”.

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuestas en el Reglamento de la Unidad de Titulación de Postgrado con RESOLUCIÓN N° 150-CSUP- 2020, por lo tanto, autorizo su presentación para la sustentación respectiva



f.....

Diego Leopoldo Mejía Romo

TUTOR

Tulcán, octubre de 2025

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente trabajo de titulación constituye un requisito previo para la obtención del título de Magister en Gestión Ambiental con Mención en Sostenibilidad.

Yo, Escobar Portilla Angie Daniela con cédula de identidad número 1004813695 declaro: que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.

f.....

Angie Daniela Escobar Portilla

AUTORA

Tulcán, octubre de 2025

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Escobar Portilla Angie Daniela declaro ser autora de los criterios emitidos en el trabajo de titulación: “Estrategias para la prevención y control de incendios forestales en la Comuna La Esperanza, Provincia Carchi” y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

f.....

Angie Daniela Escobar Portilla

AUTORA

Tulcán, octubre de 2025

AGRADECIMIENTO

A mi tutor Diego Mejía por su guía, apoyo y dedicación durante la investigación y a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi por brindarme un espacio en el que pude desarrollar mis competencias y continuar con mis estudios.

DEDICATORIA

A Dios, por las oportunidades que siempre me brinda para alcanzar mis metas, y a mis padres, con mucho cariño y amor, por su apoyo incondicional, por creer siempre en mí y acompañarme en cada paso de mi vida.

ÍNDICE

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
PROBLEMA	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Preguntas de Investigación o Hipótesis	2
1.3 Objetivos de Investigación	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4 Justificación	3
CAPÍTULO II.....	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
2.1. Antecedentes de Investigación	5
2.2. Marco Teórico	8
2.2.1. Importancia de los Ecosistemas de Páramo.....	8
2.2.2. Vulnerabilidad de los Páramos a los Incendios Forestales.....	9
2.2.3. Incendios Forestales.	10
2.2.4. Factores que Influyen en la Propagación de los Incendios Forestales	13
2.2.5. Riesgo de Incendios.....	15
2.2.6. Análisis Multicriterio Para la Evaluación del Riesgo de Incendio.....	16
2.3. Marco Legal.....	17
2.3.1 Constitución de la República del Ecuador 2008.....	17
2.3.2. Código Orgánico del Ambiente (COA).....	18

2.2.3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD).....	19
CAPÍTULO III	20
METODOLOGÍA.....	20
3.1. Descripción del Área de Estudio	20
3.2. Enfoque y Tipo de Investigación.....	24
3.2.1. Enfoque.....	24
3.2.2. Tipo de Investigación	25
3.3. Procedimientos	25
3.3.1. Materiales y Equipos	25
3.3.2. Recopilación y Procesamiento de Datos	25
3.3.3. Modelado Geoespacial de Susceptibilidad a Incendios.....	27
3.3.4. Diseño de Estrategias de Prevención y Control.....	29
CAPÍTULO IV	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Obtención de Cartografía Temática.....	32
4.2. Determinación de los Niveles de Peligro	39
4.3. Elaboración de Ponderaciones de Variables y Clases	41
4.4. Obtención del Mapa de Riesgo de Incendio.....	46
4.4.1. Validación del Modelo	50
4.5. Discusión	54
4.5.1. Ponderación y Resultados de la Cobertura Vegetal.....	54
4.5.2. Ponderación de Temperatura	56
4.5.3. Ponderación de la Precipitación	57
4.5.4. Ponderación de la Velocidad del Viento	58
4.5.5. Ponderación de la Pendiente.....	59

4.5.6. Ponderación de Accesibilidad	61
4.5.7. Orientación del Terreno.....	62
4.6. Mapa Final del Riesgo.....	63
CAPITULO V	65
PROPUESTA	65
5.1. Objetivos de la Propuesta	65
5.1.1 Objetivos Específicos	65
5.2. Diagnóstico.....	65
5.3. Estrategias de Prevención de Incendios Forestales	67
5.4. Estrategias de control de incendios forestales	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
6.2. Conclusiones.....	88
6.3. Recomendaciones	89
REFERENCIAS	90
ANEXOS	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	10
Tabla 2.	11
Tabla 3.	22
Tabla 4.	39
Tabla 5.	42
Tabla 6.	42
Tabla 7.	44
Tabla 8.	50
Tabla 9.	52
Tabla 10.	67
Tabla 11.	68
Tabla 12.	77
Tabla 13.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Factores Clave en Incendios Forestales	8
Figura 2. Mapa de ubicación de la comuna La Esperanza	21
Figura 3. Integración de capas ráster mediante superposición ponderada para generación de resultado final	28
Figura 4. Mapa de uso y cobertura del suelo en la Comuna La Esperanza.....	33
Figura 5. Mapa de condiciones climáticas: temperaturas promedio	34
Figura 6. Mapa de condiciones climáticas: precipitaciones anuales	35
Figura 7. Mapa de accesibilidad de vías.....	36
Figura 8. Mapa de pendiente del terreno en la Comuna La Esperanza	36
Figura 9. Mapa de orientación del terreno en la Comuna La Esperanza.....	37
Figura 10. Mapa de velocidades del viento	38
Figura 11. Mapa de zonificación de riesgo de incendios	48
Figura 12. Distribución espacial de incendios desde 2012 a 2021 obtenidos de FIRMS y base de datos de REEA.....	51
Figura 13. Organigrama visual de la cadena de mando.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Gráfico explicativo de funión de los cortafuegos ..	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Abstract firmado	98
Anexo B. Aval de traducción	99
Anexo C. Mapa interactivo de riesgo de incendios FIRMS de la NASA	100
Anexo D. Mapa interactivo de Global Wind Atlas para identificar dirección y áreas potenciales de vientos fuertes.	100
Anexo E. Registro Inicial y Ajustes en la Calculadora AHP-OS para el Análisis Jerárquico...100	
Anexo F. Configuración de Ponderaciones y Rangos en la Herramienta Weighted Overlay de ArcGIS.....	102
Anexo G. Histograma del ráster y la curva acumulada del IRI.....	103

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue diseñar estrategias de prevención y control de incendios forestales mediante un análisis geoespacial de susceptibilidad al fuego en el páramo de la comuna La Esperanza, provincia del Carchi, que contribuyan a la conservación del ecosistema y la sostenibilidad de sus servicios ambientales. El estudio fue de enfoque cuantitativo, de tipo investigación-acción. La investigación utilizó análisis geoespacial mediante ArcGIS y AHP, para diseñar estrategias de prevención y control de incendios. Los mapas identificaron áreas con diferentes niveles de riesgo. Dicha información facilita la identificación precisa de las áreas más vulnerables y orienta la implementación de medidas preventivas y estrategias de gestión de incendios. El análisis multicriterio proporcionó a los gestores de áreas protegidas, herramientas para la toma de decisiones informadas y la asignación de recursos. Los resultados identificaron que el riesgo Muy Alto abarca el 5,5% en el oeste, con vegetación seca y de fácil acceso. El riesgo Alto cubre el 55,9%, asociado a bosques nativos y páramos. El riesgo Medio ocupa 16,4% en el este, con pendientes menores, y el riesgo Bajo es mínimo asociado a las bajas temperaturas y vegetación menos propensa a la ignición. La validación del modelo con datos históricos confirma la coincidencia entre incendios previos y zonas de alto riesgo. Se elaboró un mapa de riesgo de incendios y se propuso un Plan de Prevención y Control de Incendios Forestales. El plan se enfocó en acciones preventivas que incluyen educación comunitaria, restricción de acceso a zonas vulnerables, construcción y mantenimiento de cortafuegos, y asignación de roles comunitarios. Para el control, se priorizó la detección temprana con sistemas de monitoreo, rápida movilización de brigadas, ejecución de contrafuegos y protección de zonas críticas. Estas medidas buscan fortalecer la gestión del fuego en la comunidad, mejorando su preparación y respuesta ante emergencias.

Palabras clave: análisis geoespacial, ArcGIS, incendios forestales, páramo, prevención.

ABSTRACT

The objective of the research was to design strategies for preventing and controlling forest fires through a geospatial analysis of fire susceptibility in the páramo of the La Esperanza commune, Carchi Province, thereby contributing to ecosystem conservation and the sustainability of its environmental services. The study adopted a quantitative approach and was of the action research type. The research used geospatial analysis with ArcGIS and AHP to design fire prevention and control strategies. The maps identified areas with different levels of risk. This information facilitates the precise identification of the most vulnerable areas and guides the implementation of preventive measures and fire management strategies. Multi-criteria analysis provided protected area managers with tools for informed decision-making and resource allocation. The results identified that the Very High risk covers 5.5% in the west, with dry, easily accessible vegetation. High risk covers 55.9%, associated with native forests and páramos. Medium risk covers 16.4% in the east, where slopes are gentler, and low risk is minimal, associated with low temperatures and vegetation less prone to ignition. Model validation using historical data confirms the alignment between past fires and high-risk areas. A fire risk map was developed, and a Forest Fire Prevention and Control Plan was proposed. The plan focused on preventive actions, including community education, restricting access to vulnerable areas, constructing and maintaining firebreaks, and assigning community roles. For control, early detection through monitoring systems, rapid deployment of fire crews, the use of backfires, and the protection of critical areas were prioritized. These measures aim to strengthen fire management in the community, improving its preparedness and response to emergencies.

Keywords: Geospatial analysis, ArcGIS, forest fires, páramo, prevention.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Los incendios representan una grave amenaza para los ecosistemas naturales, especialmente para los frágiles páramos del Ecuador que albergan una rica biodiversidad y son fuente de agua para millones de personas. Estas prácticas, cada vez más frecuentes, alteran el equilibrio ecológico ocasionando graves daños a la biodiversidad, los recursos hídricos y las comunidades rurales (Sarango *et al.*, 2019).

En el año 2023 Ecuador experimentó una ola de incendios forestales, un total de 3.571 eventos afectaron a 21 provincias, 118 cantones y 525 parroquias, consumiendo la alarmante cifra de 33.146,34 hectáreas de cobertura vegetal. Entre las provincias más afectadas se encuentran Loja, Imbabura, Carchi, Azuay, Pichincha, Cotopaxi, Chimborazo y Guayas (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias [SNGR], 2023). Específicamente, la provincia del Carchi, ubicada en el norte del país, no está exenta de este riesgo. De acuerdo con el Informe de Reporte de Situación (SITREP) – Incendios forestales N° 57, entre el 1 de enero y el 16 de noviembre de 2023, se registraron 97 incendios forestales en la región, devastando 3.803,5 hectáreas de páramos, lo que representa el 11,47% del total nacional de hectáreas quemadas (SNGR, 2023).

De acuerdo con Cáceres Lazo (2022) estos eventos, tanto accidentales como intencionales, se han convertido en un fenómeno frecuente que arrasa con la cobertura vegetal, altera el equilibrio ecológico y genera un impacto devastador en el medio ambiente, la economía y las comunidades locales. Estas prácticas alteran la capacidad del suelo para retener agua haciéndolo más vulnerable a la erosión y disminuyendo la disponibilidad hídrica para las plantas. Además, las quemaduras modifican las propiedades químicas del suelo, aumentando su pH, conductividad eléctrica, y afectando el contenido de carbono.

Los incendios forestales en Ecuador se generan debido a una compleja interacción entre factores naturales y socioeconómicos. Según el estudio de Ríos Hervas (2023) las

condiciones climáticas, como la sequía, las altas temperaturas y la acumulación de material vegetal seco, son las principales causas del origen de los incendios forestales. A esto se le añade acciones como el uso inadecuado del fuego, especialmente para la eliminación de residuos agrícolas y quemas agrícolas realizadas por campesinos para preparar el suelo para los cultivos.

El páramo de la comuna La Esperanza, ubicado en la provincia del Carchi, Ecuador, también enfrenta la problemática de los incendios forestales, puesto que, según Vásquez (2019) la zona se caracteriza por su rica biodiversidad y su importancia como fuente de agua lo que la conduce a estar bajo una presión creciente debido a diversas actividades humanas, además de sus condiciones climáticas propicias para la ocurrencia de incendios y una alta vulnerabilidad debido a la presencia de bosques andinos y pastizales, ya que limita con la Reserva Ecológica El Ángel donde ya se ha presentado un histórico de incendios por sus características propias del ecosistema.

1.2 Preguntas de Investigación o Hipótesis

¿Cuáles son las áreas de la comuna La Esperanza con mayor susceptibilidad a incendios forestales?

¿Qué medidas de prevención y control de incendios forestales se pueden implementar en la comuna La Esperanza?

1.3 Objetivos de Investigación

1.3.1. Objetivo General

Proponer un Plan de Prevención y Control de Incendios Forestales para la comuna La Esperanza, provincia del Carchi, que contribuyan a la conservación del ecosistema y la sostenibilidad de sus servicios ambientales.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un mapa de riesgo de incendios forestales utilizando técnicas de análisis geoespacial.
- Diseñar estrategias efectivas de prevención con base a un análisis geoespacial de la susceptibilidad a incendios forestales en el páramo de la comuna La Esperanza, provincia del Carchi, que contribuyan a la conservación del ecosistema y la sostenibilidad de sus servicios ambientales.

1.4 Justificación

La necesidad de estudiar a fondo el riesgo de incendios en la comuna es urgente debido a la importancia ecológica y la vulnerabilidad de sus ecosistemas frente a los incendios forestales. La comuna la Esperanza se caracteriza por poseer un ecosistema de páramo predominante, que influye en su entorno puesto que estos brindan servicios clave como agua potable, forraje y materiales (Vergara y De Pellegrin, 2025; Pazmiño *et al.*, 2024); regulan el agua, el carbono, el suelo y la biodiversidad; y aportan valores culturales, educativos y espirituales esenciales para las comunidades.

La presencia de páramos demuestra que existen áreas muy delicadas y se encuentran expuestas a una mayor susceptibilidad a los incendios forestales, una amenaza intensificada por una combinación de factores naturales y antropogénicos. Características del entorno, como las altas temperaturas, la velocidad del viento y los niveles de humedad variables crean un entorno propicio para la rápida propagación del fuego. Además, las prácticas agrícolas que involucran quemas de campos aumentan significativamente el riesgo, sumando combustible a la ya inflamable ecología del páramo (Gobierno Autónomo Descentralizado del Carchi, 2019, p. 154).

Según Rodríguez Ascuntar (2018) la comuna La Esperanza cuenta con una sección de páramo protegida, la cual se divide en varios estratos dentro de las parroquias de Tufiño y Maldonado. El más destacado de estos estratos es el páramo de frailejones, que consiste en una vegetación herbácea de altura, caracterizada por una densa comunidad vegetal que se desarrolla típicamente a una altitud superior a los 3.200 m.s.n.m. Este ecosistema también hace parte de la reserva El Ángel y abarca un área de 5.491 hectáreas, representando el 30,2% del territorio de la parroquia. Acorde a dicha investigación, la problemática de los incendios en el páramo de la comuna La Esperanza se ve arraigada en prácticas ancestrales como lo es la quema de áreas vegetación con el propósito de promover el rebrote de pastos para el ganado, este proceso ha dejado áreas de páramos y pastizales quemados en recuperación y los residentes no comprenden completamente el impacto negativo de estas prácticas en el ecosistema.

En relación con lo anterior, la presente investigación contribuye de manera decisiva a comprender mejor los factores que contribuyen a la ocurrencia de incendios, a la

identificación de áreas de mayor riesgo y al desarrollo de estrategias efectivas para la prevención y el manejo de incendios mediante la zonificación geoespacial. Para ello, se aplica una metodología basada en el análisis geoespacial, utilizando imágenes satelitales, variables ambientales y el método de Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) para modelar la susceptibilidad a incendios en la comuna La Esperanza. Los resultados obtenidos sobre el riesgo de incendios en la comuna proporcionarán información valiosa para la toma de decisiones por parte de sus beneficiarios quienes serían las autoridades locales, las comunidades y las organizaciones ambientales y pueden ser utilizados para desarrollar e implementar planes de manejo de incendios forestales, asignar recursos de manera efectiva para la prevención y el combate de incendios, educar a la comunidad sobre las prácticas de manejo del fuego, y promover la conservación del páramo y la protección de sus servicios ecosistémicos. De esta forma, la presente investigación además de generar conocimientos, contribuirá a empoderar a la comunidad al buscar prevenir desastres ambientales y sociales antes de que sea demasiado tarde.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Dentro de este capítulo se comprenden los elementos necesarios que configuran la problemática de los incendios forestales en los páramos, con un enfoque particular en la comuna La Esperanza, Carchi. Para ello, se revisan los antecedentes más relevantes de investigaciones previas en el ámbito nacional e internacional, con el fin de ofrecer una perspectiva sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas a los incendios forestales y discutir los aspectos clave sobre los mismos, tanto su clasificación como los efectos ecológicos, sociales y económicos que conllevan. Este análisis servirá como base para comprender los procesos de gestión del fuego en el contexto de la región y las implicaciones que tiene para la sostenibilidad del ecosistema.

2.1. Antecedentes de Investigación

Las regiones del litoral y los andes de Ecuador son las zonas más afectadas por incendios forestales según Cisneros, Calahorrano y Manzano (2023) mientras que la Amazonía presenta la ocurrencia más baja. Las reservas ecológicas son las áreas protegidas más vulnerables, y las tierras agropecuarias junto con la vegetación arbustiva y herbácea representan aproximadamente el 5% de su extensión total con historial de quemas. Este contexto se revela un importante desafío en la gestión del fuego a nivel nacional.

Un estudio similar demuestra el grave problema causado por los incendios forestales en ecosistemas extremadamente vulnerables, como los páramos de la comunidad de Pesillo en el cantón Cayambe, Ecuador, dicho trabajo realizado por Gualan y Orbe (2019) revelaron que el cambio más notable después de la quema de áreas se observa en la materia orgánica del suelo, con un incremento en las zonas afectadas por el fuego. Además, se identificó una reducción de micronutrientes y se estima que cada hectárea afectada produce aproximadamente 24 toneladas de CO₂, lo cual representa un impacto significativo en el cambio climático.

En el trabajo de Guerrero (2023) se comparó varias investigaciones sobre incendios forestales en ecosistemas de páramo en Ecuador, en la que se determinó que afectan en menor escala a la textura del suelo, y en mayor medida altera el contenido de humedad, en el caso del pH, en algunos casos, tiende a convertir suelos ácidos en alcalinos y la conductividad eléctrica tiene variaciones dependiendo de la intensidad del incendio, lo

que refleja cambios químicos en los suelos quemados, la materia orgánica, por su parte, experimenta cambios en la mayoría de los suelos afectados por incendios. Acorde a Bisikalova (2025) En bosques donde los incendios no son frecuentes, los árboles pueden regenerarse y formar robledales secundarios. Sin embargo, en zonas donde los incendios son recurrentes, especialmente aquellas cubiertas por pastizales como los páramos de carrizo azul, la regeneración natural de árboles es prácticamente imposible. En estos casos, la reforestación artificial bajo supervisión forestal es la única opción viable para recuperar la vegetación leñosa. Además, las áreas más propensas al fuego suelen estar cerca de poblaciones y tierras agrícolas, por lo que la necesidad de restauración debe evaluarse según el uso previsto del terreno.

El estudio reciente de Bill *et al.* (2023) sobre el efecto de la dinámica del fuego en el contenido del carbono orgánico del suelo, después de un incendio forestal este disminuye y su recuperación depende del tipo de ecosistema afectado. En zonas secas, aunque el suelo se quema más, la capa orgánica se recupera con el tiempo y vuelve a acumular carbono. En cambio, en zonas muy húmedas, donde al principio se conserva más carbono porque el fuego no penetra tanto, esa reserva no se recupera ni siquiera después de un siglo. De igual forma, otro impacto de naturaleza negativa es el deterioro de las propiedades físicas de la madera, ya que, según la investigación de Sarango *et al.* (2019) los árboles que sufren quemaduras tienen una alteración en las propiedades anatómicas y de recubrimiento.

El reporte elaborado por Carlos Boada y Jorge Campaña (2008) estudia al páramo del Artesón de la comuna La Esperanza en la provincia del Carchi, el cual enfrenta desafíos que ponen en riesgo su ecología y servicios ambientales. Entre los principales se menciona a la deforestación y la caza furtiva. Sin embargo, mencionan que tanto la quema y tala de bosques en el límite inferior de la comuna son prácticas recurrentes que generan erosión considerable y afectan negativamente la vegetación, especialmente el pajonal. Esta presión ejercida sobre el bosque tiene un grave impacto, ya que los árboles, especialmente los de la especie *Polylepis sp.*, tienen un lento crecimiento y no se recuperan rápidamente. El reporte resalta que esta reducción de la extensión de bosques se limita a las áreas más húmedas, como el borde de arroyos y peñas, lo que disminuye el hábitat de las especies de fauna asociadas y que la presencia de árboles introducidos como el pino no contribuye a la conservación del área debido a su inadecuación al ecosistema.

El reporte elaborado por Boada y Campaña (2008) analiza el estado ecológico del páramo del Artesón, en la comuna La Esperanza, advirtiendo sobre amenazas como la deforestación, la caza furtiva y, especialmente, la quema y tala en los límites inferiores del bosque, las cuales generan una fuerte erosión y afectan la vegetación nativa, en particular al pajonal. Este tipo de presión reduce la cobertura forestal, restringiéndola a zonas más húmedas como arroyos y peñas, lo que compromete el hábitat de especies asociadas. Además, los autores señalan que especies como *Polylepis* sp., de lento crecimiento, no logran regenerarse fácilmente tras estas alteraciones, y que la presencia de árboles introducidos como el pino no favorece la conservación del ecosistema.

Estos hallazgos siguen siendo respaldados por estudios actuales. Zimmermann et al. (2021) demostraron que los bosques de *Polylepis* en los Andes presentan una recuperación muy lenta luego de incendios o disturbios, y que la composición de especies cambia, afectando su biodiversidad.

Según la Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del cantón Tufiño (2020) que incluye a la Comuna La Esperanza, la economía está firmemente arraigada a las actividades primarias, destacando la ganadería como su pilar fundamental. Aproximadamente el 49% de los jefes de hogar se dedica a la ganadería, lo que señala una dependencia de la producción animal. Además, la agricultura complementa esta economía, con un 36% de los hogares involucrados en cultivos destinados tanto al autoconsumo como a la venta, reflejando una estrecha relación de los residentes con la tierra y sus recursos naturales. La actividad agrícola está dominada por la producción de papa, en la cual el 94% de los agricultores están implicados. Además, un 32,23% de las familias diversifica sus ingresos gracias al comercio local y un 6% trabaja en el sector público.

Por otro lado, el turismo en Tufiño también presenta un potencial considerable, con diversos atractivos naturales y culturales que incluyen Aguas hediondas, cerro Chiles, Artesón, y Lagunas verdes. La dependencia económica de la ganadería y la agricultura, combinada con el uso intensivo del suelo, puede aumentar el riesgo de incendios, la expansión de áreas agrícolas y ganaderas a menudo implica la quema de vegetación, lo que contribuye a la vulnerabilidad del páramo a incendios forestales.

2.2. Marco Teórico

En este capítulo se desarrolla el marco teórico de la investigación, donde se proporcionarán los fundamentos conceptuales y científicos que sustentan el análisis de la investigación. A continuación, en la Figura 1 se describe los temas a tratar que engloban los incendios forestales dentro del marco de la zona de estudio.

Figura 1.

Factores clave en incendios forestales



2.2.1. Importancia de los Ecosistemas de Páramo.

Los páramos son ecosistemas muy frágiles, estos están caracterizados por tener una vegetación predominantemente herbácea y arbustiva, se encuentran a altitudes que oscilan entre los 3.000 y 5.000 m.s.n.m. y están situados entre los bosques cerrados y las nieves perpetuas (Brück, 2023). Se extienden a lo largo de los Andes húmedos, abarcando países como Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, llegando hasta Costa Rica y Panamá. En Ecuador, los páramos cubren aproximadamente el 6% del territorio nacional, lo que equivale a alrededor de 1.250.000 hectáreas que están distribuidas principalmente entre comunidades indígenas (40%), zonas protegidas (40%), y haciendas (20%), donde habitan cerca de 500.000 personas (Lozano *et al.*, 2016).

La importancia del ecosistema paramuno para la economía nacional y la ecología se puede ver afectada por la pérdida de este mismo ecosistema, como en el estudio de Pazmiño *et al.* (2024), donde la pérdida del páramo en la subcuenca Chambo refleja cómo las

actividades productivas, al modificar el uso del suelo, reducen tanto su valor económico como sus servicios ambientales esenciales, como la retención de agua y el almacenamiento de carbono. Esta tendencia, proyectada a empeorar hacia 2030, evidencia que sin una adecuada valoración económica del ecosistema y sin inversión en su conservación, se compromete la sostenibilidad de los recursos que sustentan a las comunidades andinas.

2.2.2. Vulnerabilidad de los Páramos a los Incendios Forestales

Los páramos son ecosistemas particularmente vulnerables a los incendios debido a diversas características de su vegetación y condiciones ambientales. Estos ecosistemas suelen ser bajamente inflamables debido a la composición y estructura de su vegetación, así como a las condiciones de humedad que típicamente inhiben la ignición y propagación del fuego. Sin embargo, esta resistencia puede cambiar drásticamente debido a varios factores.

Uno de los principales factores que aumenta la susceptibilidad de los páramos a los incendios es la acumulación de necromasa en las macollas y rosetas, es decir, hojas muertas que se acumulan en el suelo, las áreas con alta densidad de frailejones que acumulan necromasa en la base son propensas a la ignición, la principal fuente de combustible en estos ecosistemas son las hojas muertas (Ocampo-Zuleta & Parrado-Rosselli, 2023). Se estima que aproximadamente el 80% de la biomasa superficial en las macollas puede consistir en material muerto. Otro factor crucial es el bajo contenido de humedad tanto en la vegetación como en el suelo durante la época seca. Bajo condiciones de sequía extrema, el alto contenido orgánico de los suelos puede facilitar la ignición y la propagación de incendios subterráneos (Armenteras *et al.*, 2020).

Además de la acumulación de necromasa y el contenido de humedad en la vegetación, otro factor que aumenta la vulnerabilidad de los páramos es la erosión del suelo, Fernández, Merchán y Sánchez. (2025) explican que la pérdida de suelo se triplica después de un incendio y dificulta su recuperación, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas. A medida que el suelo se vuelve más árido, la propagación de incendios se facilita, ya que la vegetación circundante pierde la capacidad de actuar como una barrera natural contra el fuego.

La introducción de cultivos, como la papa y la siembra de especies intrusivas, como el pino, alteran significativamente la composición y estructura del páramo, esta conversión

de páramo a cultivos disminuye la concentración de carbono asociado a los agregados del suelo, y la fracción de materia orgánica particulada se reduce del 20% en páramo a solo 12-14% en suelos agrícolas (Vargas y Vizúete, 2020). Esta pérdida de carbono y estructura afecta la fertilidad y la capacidad del suelo para retener agua, lo que puede acelerar la degradación y erosión. Estos cambios comprometen la regulación hídrica, la biodiversidad y la capacidad de almacenamiento de carbono, funciones esenciales de los páramos (Anzoateguía, Gil Leguizamón, y Sanabria Marín, 2023), debilitando su resistencia frente a las llamas, ya que las áreas afectadas son más propensas a incendiarse y permitir la rápida expansión del fuego.

2.2.3. Incendios Forestales.

Los incendios forestales son las principales amenazas de la naturaleza, provocan pérdida de biodiversidad y alteran los ciclos hidrológicos. Es necesario comprender su dinámica, en ese contexto, la clasificación de los incendios forestales es esencial, ya que permite comprender mejor su comportamiento y las estrategias más adecuadas para su prevención y control. Según Ubeda *et al.* (2022) “Los incendios forestales (IF) son eventos no deseados de fuego que escapan al control de la sociedad. Los IF ocasionan daños ecológicos, económicos y sociales y pueden ser superficiales, aéreos o de corona, y subterráneos”.

A continuación, en la tabla 1 se describen las características y afectaciones de acuerdo al tipo de incendio:

Tabla 1.

Caracterización de tipos de incendios forestales

Tipo de incendio	Superficial	Corona	Subterráneo
Estrato	Sotobosque, hojarasca y leños en superficie	Desde la superficie hasta las copas	A nivel del mantillo y raíces del suelo
Tipo de vegetación	Arbustiva, herbácea y forestal	Arbustiva y forestal	Materia orgánica

Velocidad de propagación	Variable: lenta a rápida	Rápida	Lenta
Amplificadores	Clima seco, dirección del viento, relieve, naturaleza y estado de la vegetación.		
Atenuantes	Humedad del suelo, clima húmedo, dirección del viento, naturaleza y estado de la vegetación, accidentes naturales.		

Nota. Adaptado de Gestión de los incendios forestales en el Páramo y las Yungas de la Reserva de Biosfera Gran Pajatén (Ubeda et al., 2022), Fundación Amazonia Viva.

Para evaluar el comportamiento del fuego en diferentes tipos de vegetación, se utiliza el modelo de combustibles, el cual clasifica los combustibles según el tiempo requerido para su ignición, un aspecto clave para evaluar la capacidad de propagación del fuego en la vegetación. Este tiempo actúa como un indicador indirecto del nivel de riesgo que puede representar un incendio. Al ser la vegetación el principal combustible, se evidencia en la tabla 2 que los combustibles con ignición rápida generan incendios de difícil manejo, ya que la vegetación se consume rápidamente, incrementando el daño en las áreas afectadas. Por otro lado, los combustibles con un tiempo de ignición prolongado facilitan el control del fuego, lo que puede reducir el impacto si se aplican medidas de manejo adecuadas.

Tabla 2.

Duración de combustión según tipo de material vegetal en incendios forestales

Tipo de combustible predominante	Duración (horas)
Árboles	100
Arbustos	1
Arbustos y árboles	10
Hierbas	100
Hierbas	1
No combustibles	-

Pastos	1
Pastos/Hierbas	1

Nota: Adaptado de Incendios de la cobertura vegetal en Colombia (Parra L. et al., 2011), Universidad Autónoma de Occidente.

Sin embargo, en términos de los servicios y beneficios que brindan los ecosistemas, el efecto del fuego no está directamente relacionado con la duración de la ignición, sino con factores como la biodiversidad, la fragilidad y la capacidad del ecosistema para resistir y recuperarse.

Efectos Ecológicos, Sociales y Económicos de los Incendios Forestales.

Los incendios forestales en los páramos tienen efectos devastadores que trascienden el tema ambiental. Las consecuencias que generan estos impactos fueron estudiadas por Castillo *et al.* (2003) el estudio indicó que las llamas no solo arrasan la vegetación nativa, sino también la microfauna y la capa orgánica del suelo, que son fundamentales para la retención de agua y la fertilidad. Esta destrucción acelera la erosión, con la consiguiente pérdida de nutrientes y una disminución significativa en la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo. La escorrentía superficial y la recarga de acuíferos disminuye, reduciendo la disponibilidad de agua potable y para riego, especialmente crítica en épocas secas y vital para las comunidades locales. Además de su función hidrológica, los páramos albergan una biodiversidad única, con numerosas especies endémicas. La quema fragmenta hábitats y afecta cadenas alimentarias con consecuencias negativas para el equilibrio ecológico y la subsistencia de las comunidades locales, privándolas de recursos naturales y culturales esenciales. Además, la destrucción de estos ecosistemas podría alterar patrones climáticos, con impactos potenciales en la agricultura, la salud humana y la economía.

A nivel social, la desaparición de recursos naturales esenciales afecta gravemente a actividades tradicionales como la agricultura, la ganadería, el turismo y la pesca, socavando los medios de vida de las comunidades locales y aumentando la migración y pobreza. Acorde a Castillo *et al.* (2003) la alteración del ciclo del agua por la quema de páramos no solo reduce la producción agrícola y ganadera, sino que también puede desencadenar conflictos por el agua, afectando la estabilidad social. Además, la pérdida de biodiversidad y el deterioro del paisaje disminuyen el atractivo turístico, impactando

negativamente en la economía local. Y en términos de salud pública, los incendios en páramos deterioran la calidad del agua al aumentar la erosión y contaminar las fuentes con sedimentos y productos químicos, que potencialmente podrían causar enfermedades gastrointestinales y respiratorias. El humo y las partículas contaminantes liberadas durante los incendios también incrementan los problemas respiratorios, especialmente entre los más vulnerables como niños y ancianos. Estos impactos ambientales y socioeconómicos no solo comprometen la salud física, sino que también afectan el bienestar psicosocial de las comunidades locales, generando estrés y ansiedad debido a la pérdida de recursos naturales y la incertidumbre sobre el futuro.

2.2.4. Factores que Influyen en la Propagación de los Incendios Forestales

La propagación de incendios forestales está influenciada por diversos factores interrelacionados, que son clave en la determinación del Índice de Riesgo de Incendio (IRI), una herramienta crucial para predecir y gestionar el riesgo de incendios en áreas vulnerables.

Un estudio realizado por Sivrikaya y Kucuk (2021) para determinar el IRI, estableció como variables para la iniciación del riesgo de incendios la vegetación, la topografía y los factores humanos, donde las variables de vegetación se clasificaron en los tipos de vegetación según sus características de combustión, tales como la composición del rodal, el cierre de copas y la etapa de desarrollo. Igualmente, la topografía se agrupó en términos de insolación y pendiente, mientras que los factores humanos se analizaron en función de la distancia a carreteras, asentamientos y tierras agrícolas. En dicho estudio, se estableció que la topografía afecta la temperatura del bosque, la humedad y el comportamiento del viento y que las pendientes más pronunciadas presentan un mayor riesgo de incendio en comparación con las pendientes más suaves, además, las zonas orientadas al sur sufren mayor estrés hídrico, lo que incrementa la probabilidad y extensión de los incendios y los asentamientos cercanos o dentro de áreas boscosas, puesto que, los habitantes pueden causar incendios accidentales (p. 190). Por ello, la distancia a los asentamientos y tierras agrícolas es un factor clave para predecir la posibilidad de incendios forestales. Del mismo modo, Angulo (2019) identificó que la cobertura y uso del suelo son factores determinantes para la generación de los niveles de susceptibilidad alta y susceptibilidad muy alta, que son impulsados principalmente por las características del tipo de combustible. La vegetación herbácea es considerada como un combustible de rápida

ignición debido a su bajo contenido de humedad y poca área foliar, lo que hace que el control del fuego sea más difícil, ya que la cobertura se quema más rápido y el impacto en términos de áreas afectadas es mayor, mientras el páramo de frailejón por sus características de contenido de humedad alto, su ignición es más lenta pero su duración para quemarse es mayor, por el tiempo que emplea para que el contenido de humedad se equilibre con la humedad del aire. Así mismo, Newberry *et al.* (2022) establecen en su estudio que la propagación de incendios forestales está fuertemente influenciada por el tipo de cobertura vegetal en un área determinada, ya que, cuando el dosel forestal es escaso, permite que una mayor cantidad de luz llegue a las capas inferiores de la vegetación y al suelo, e incluso bajo una sequía prolongada, hasta el bosque de dosel cerrado puede volverse inflamable. Esto favorece el crecimiento de una densa cobertura herbácea, que, en condiciones climáticas secas, actúa como un combustible altamente inflamable, aumentando el riesgo de incendios. Otro gran riesgo de incendios forestales se observa en áreas con baja precipitación y altas temperaturas, y en las zonas con alta densidad de población. Por otro lado, aunque se podría esperar que la proximidad a carreteras y ríos aumente la susceptibilidad al fuego, en este caso de estudio, la mayoría de los incendios ocurrieron lejos de estas entidades. Este hallazgo sugiere que, la distancia a carreteras y ríos no es un factor significativamente determinante en la susceptibilidad al fuego, contradiciendo estudios previos que indican lo contrario, esto debido a que según Pradeep *et al.* (2021) la proximidad a un río o arroyo representa humedad tanto en plantas como en el suelo.

Por su parte, se lleva a cabo en el estudio de Makumbura *et al.* (2024) donde se identifican que la topografía juega un papel crucial, ya que las pendientes más pronunciadas, por ejemplo, pueden facilitar la rápida expansión de un incendio, mientras que la orientación y la altura del terreno influyen en la exposición al sol y, por lo tanto, en la temperatura y humedad de la vegetación. Otro factor determinante es la temperatura de la superficie terrestre, ya que áreas con temperaturas más elevadas son más propensas a la ignición y propagación del fuego. Adicionalmente, la proximidad a carreteras y asentamientos urbanos aumenta la probabilidad de que se inicien incendios, ya sea de manera accidental o intencional. De igual forma, en la investigación de Djabri *et al.* (2023) se observó que la mayoría de los incendios ocurridos en 2021 se distribuyeron en áreas con pendientes pronunciadas y en las laderas orientadas al sur. Esto confirma que los factores de la estructura del bosque, el relieve, la actividad humana y el clima estimulan la

vulnerabilidad a los incendios forestales. Igualmente, Butler *et al.* (2017) en un estudio para identificar cómo afecta los grados de pendiente en la propagación de un incendio, establecieron que la inclinación del terreno es un factor determinante en la velocidad de propagación de un incendio forestal, demostrando que, a mayor pendiente, el incendio se propaga con mayor rapidez. Esto se debe a varios factores, entre ellos, la mayor transferencia de calor hacia el combustible ubicado en la parte superior de la pendiente y la influencia del flujo de aire caliente generado por el fuego. Es decir que, las pendientes empinadas actúan como rampas que aceleran el avance de las llamas, lo que dificulta considerablemente el control de los incendios forestales en terrenos montañosos.

En cuanto a los factores climáticos, Jain *et al.* (2022) establecieron que la temperatura influye de forma indirecta sobre el comportamiento de los incendios, donde el contenido máximo de vapor de agua en la atmosfera depende de la temperatura del aire, se plantea que la humedad atmosférica es un elemento clave en la determinación de las condiciones de un potencial incendio. Asimismo, la velocidad y dirección del viento pueden avivar las llamas y transportar brasas a nuevas áreas y la precipitación regula la disponibilidad de material combustible. En conjunto, estas variables climáticas determinan el nivel de riesgo y la intensidad de los incendios forestales en un territorio.

2.2.5. Riesgo de Incendios

Según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST, 2001) el riesgo de incendio, al igual que cualquier otro riesgo de accidente, se determina en base a dos aspectos fundamentales: los daños potenciales que puede ocasionar y la probabilidad de que ocurra. Para determinar el índice de riesgo de incendio, según Sivrikaya y Kucuk (2021) se asigna una clasificación de riesgo de incendio a cada variable (extremo, alto, moderado o bajo) según su potencial de riesgo de incendio. Luego, cada clase de riesgo se le ordena en una escala del 1 al 5, asignándoles su ponderación y se superponen todas las capas. Una calificación más alta indica una mayor influencia sobre el riesgo de incendio. Finalmente, todas las capas se integran mediante herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) y la fórmula del IRI se calcula mediante la sumatoria de la ponderación de cada variable identificada.

Probabilidad de Inicio del Incendio. La determinación de la peligrosidad está influenciada por las medidas de prevención que no se han implementado, específicamente

por la coincidencia en espacio, tiempo e intensidad suficiente entre el combustible disponible y el origen de la ignición.

- **Combustible.** La peligrosidad de un incendio depende principalmente de su estado físico (sólido, líquido o gas), así como de otros aspectos relacionados con sus propiedades físico-químicas, su grado de división o fragmentación, entre otros factores asociados. (INSST, 2001)

Consecuencias. En el INSST (2001) se define que una vez que se inicia el incendio, si no se interviene a tiempo y con los recursos adecuados, es probable que se propague y resulte en daños materiales y afecte a las personas presentes. Para evaluar la gravedad de estas consecuencias, se consideran las medidas de protección contra incendios, las cuales se clasifican en medidas de protección pasiva y medidas de protección activa. Las medidas de protección pasiva dependen de su mera existencia y no actúan directamente sobre el fuego, pero pueden dificultar o incluso prevenir su propagación. Por otro lado, las medidas de protección activa son aquellas destinadas a combatir directamente el incendio.

2.2.6. Análisis Multicriterio Para la Evaluación del Riesgo de Incendio

Según estudios recientes, la metodología AHP integrada con SIG sigue siendo ampliamente utilizada para evaluar el riesgo de incendio. Por ejemplo, Pallikarakis y Konstantopoulou (2024) aplicaron este enfoque en Grecia para generar mapas de riesgo actuales y proyectados, incorporando variables topográficas, sociales y ambientales. De manera similar, Nuthammachot y Stratoulis (2021) utilizaron AHP/SIG en Tailandia para modelar el riesgo de incendios en áreas pantanosas, demostrando que los resultados se ajustan a eventos reales ocurridos y su empleo en la evaluación del riesgo de incendio debido a su capacidad integral para unir y ponderar variables que afectan tanto la ocurrencia como la propagación de incendios forestales.

Este tipo de investigaciones son integradas en un modelo de decisión multicriterio dentro del SIG, lo que resulta en la generación de mapas de riesgo detallados para cada una de las capas objetivo. En el trabajo de Mariscal, Ríos y Soria (2020) generaron un mapa de riesgo en una reserva boliviana aplicando cinco variables relevantes, consolidando la clasificación en cinco niveles. De igual forma, Arias Muñoz *et al.* (2024) realizaron un análisis en la región andina de Ecuador con siete variables, encontrando que el 82 % del área estudiada presenta susceptibilidad entre Alta y Muy alta. Estos casos confirman la

vigencia del enfoque multicriterio basado en SIG, validando su utilidad para identificar zonas vulnerables y orientar estrategias de prevención y gestión del riesgo de incendios.

Los mapas identifican áreas con diferentes niveles de riesgo, desde Muy alto hasta Muy bajo. Dicha información facilita la identificación precisa de las áreas más vulnerables y orienta la implementación de medidas preventivas y estrategias de gestión de incendios.

La aplicación del análisis multicriterio en este contexto proporciona a los gestores de áreas protegidas, herramientas efectivas para la toma de decisiones informadas y la asignación de recursos, mejorando así la capacidad de respuesta ante incendios forestales y reduciendo los riesgos ambientales y socioeconómicos asociados.

2.3. Marco Legal

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador 2008

A continuación, se enumeran algunos de los artículos de la Constitución de la República del Ecuador que establecen las normas esenciales para proteger los derechos y libertades individuales, así como para organizar el Estado y las instituciones democráticas, fomentando además el desarrollo económico, social y ambiental.

Art. 14.- Las personas y comunidades tienen derecho al buen vivir, entendido como un conjunto integral de satisfacciones humanas, tanto básicas como superiores, que permitan garantizar la dignidad, la libertad, la igualdad y la inclusión y la realización de todos sus derechos.

Este artículo establece un marco fundamental para la protección de los páramos desde la perspectiva de los derechos de las comunidades locales. Es importante reconocer que estas comunidades son las que mejor conocen y dependen de estos ecosistemas, por lo que deben ser actores centrales en su conservación y manejo sostenible.

Art. 71.- La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos.

Este artículo no solo busca proteger la naturaleza, sino también promover su restauración y regeneración. Esto implica un compromiso con la restauración de ecosistemas degradados y la recuperación de procesos ecológicos esenciales.

Art. 389.- El Estado protegerá a las personas, las colectividades y la naturaleza frente a los efectos negativos de los desastres de origen natural o antrópico mediante la prevención ante el riesgo, la mitigación de desastres, la recuperación y mejoramiento de las condiciones sociales, económicas y ambientales, con el objetivo de minimizar la condición de vulnerabilidad.

2.3.2. Código Orgánico del Ambiente (COA).

Los siguientes artículos describen el compromiso del COA con los ecosistemas de páramo:

Art. 5.- Derecho de la población a vivir en un ambiente sano. El derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado comprende: - 2. El manejo sostenible de los ecosistemas, con especial atención a los ecosistemas frágiles y amenazados tales como páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos, manglares y ecosistemas marinos y marinos-costeros

Art. 40.- que establece una base legal sólida para la protección de los páramos, reconociendo su fragilidad, importancia ecológica y servicios ecosistémicos, y brindando herramientas para su declaratoria como áreas protegidas.

Art. 99.- Conservación de páramos, moretales y manglares. Será de interés público la conservación, protección y restauración de los páramos, moretales y ecosistema de manglar. Se prohíbe su afectación, tala y cambio de uso de suelo, de conformidad con la ley.

Art. 101.- Planes e instrumentos para el ecosistema páramo. La elaboración de los planes e instrumentos de manejo y conservación del ecosistema páramo se realizarán de la siguiente manera.

Art. 318.- Infracciones muy graves. Las siguientes infracciones se considerarán muy graves y se les aplicará, además de la multa económica, las siguientes: - 4. La quema, destrucción o afectación al ecosistema de bosque natural y ecosistemas frágiles tales como páramos, humedales, manglares, moretales, ecosistemas marinos y marinos costeros.

Dichos artículos justifican la urgencia de analizar los riesgos en los ecosistemas de la comuna La Esperanza, con el fin de proteger la salud ambiental y el bienestar de la población, respalda la importancia de crear estrategias específicas de conservación y

manejo. Además, dictaminan que cualquier actividad que pueda poner en riesgo los ecosistemas, como la quema y destrucción de ecosistemas, son considerados infracciones graves y deben ser prevenidos y controlados con firmeza, para ello es clave el uso de herramientas geoespaciales que ayuden a anticipar el riesgo, estableciendo zonas de vigilancia, educación, control y si es necesario denunciar actividades ilegales.

2.2.3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD).

Art. 140.- Ejercicio de la competencia de gestión de riesgos. - La gestión de riesgos que incluye las acciones de prevención, reacción, mitigación, reconstrucción y transferencia, para enfrentar todas las amenazas de origen natural o antrópico que afecten al cantón se gestionarán de manera concurrente y de forma articulada con las políticas y los planes emitidos por el organismo nacional responsable, de acuerdo con la Constitución y la ley.

Esta normativa establece el marco legal que obliga a las autoridades locales a actuar frente a amenazas como los incendios forestales, que pueden tener origen natural o humano, dando validez institucional y operativa al estudio.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Descripción del Área de Estudio

La elección de la Comuna La Esperanza como área de estudio responde a su alta representatividad ecológica y vulnerabilidad frente a los incendios forestales. Se trata de un territorio de páramo y bosque andino que provee servicios ambientales estratégicos — agua, regulación hídrica, captura de carbono y biodiversidad—, pero que a la vez se encuentra sometido a presiones antrópicas. Entre ellas destacan las prácticas agropecuarias tradicionales como la quema de pastizales, que incrementan la degradación y el riesgo de propagación del fuego (Cruz-García et al., 2017; GADC, 2019). Adicionalmente, existen antecedentes de incendios en los frailejones y herbazales de altura, donde factores naturales como los vientos, la humedad variable y las bajas temperaturas potencian la susceptibilidad al fuego (Rodríguez Ascuntar, 2018). Vasques (2019) proporciona un análisis de esta área, señalando que:

“La Comuna La Esperanza es una organización de base reconocida legalmente por el Ministerio de Agricultura y Ganadería con el Acuerdo Ministerial No. 740 del 1 ° de agosto de 1938. Está ubicada en Ecuador, en el noroccidente de la provincia de Carchi, en las parroquias Tufiño y Maldonado del cantón Tulcán. Su territorio tiene una extensión de 14.325 hectáreas de las cuales más del 60% (8.621,7) son páramo y bosque andino bajo conservación mediante el Programa Socio Bosque” (P. 37)

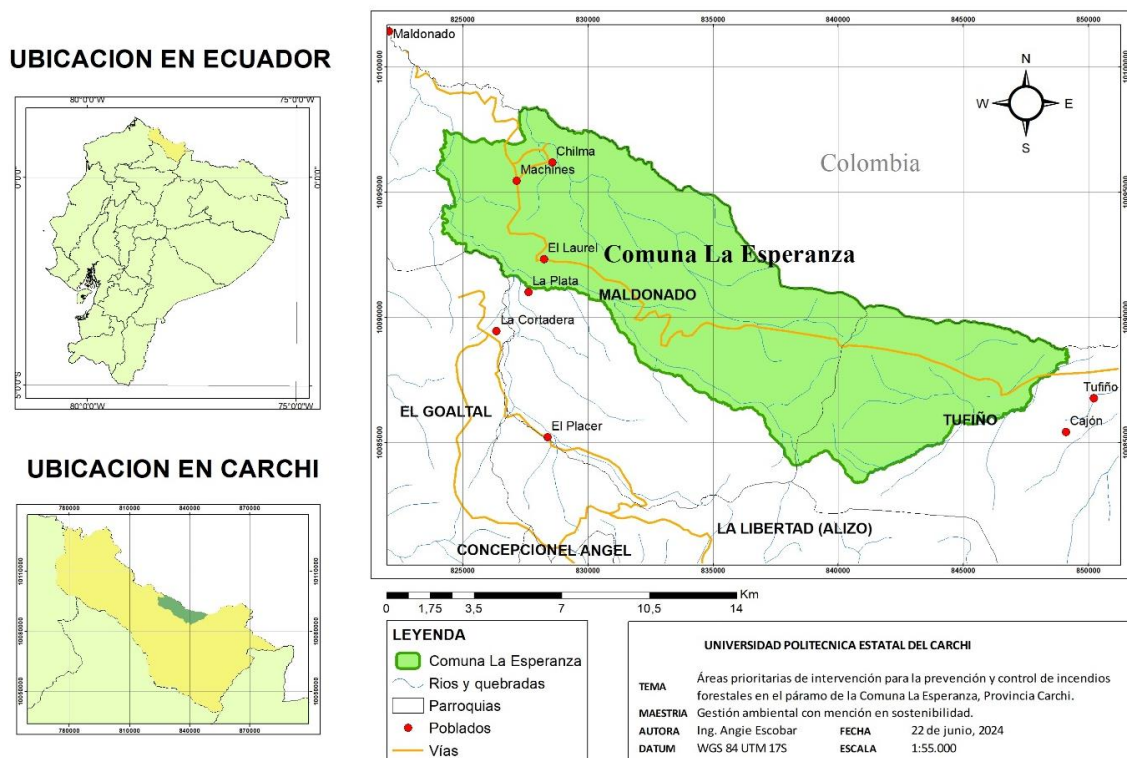
Según Paspuel (2020) la comuna La Esperanza se unió al Proyecto Socio Bosque (PSB) en 2009 y, desde entonces, ha recibido compensaciones del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) por la protección de 8.621 hectáreas de páramos y bosques primarios. Sin embargo, la comuna espera que el municipio de Tulcán y Emelnorte, como principales beneficiarios, también contribuyan económicamente para la conservación de este delicado ecosistema y sobre todo, para invertir en proyectos productivos que mejoren la calidad de vida de las familias comuneras. Teniendo en cuenta lo anterior, conforme a Nieto (2017) la razón por la cual se estableció el sitio como área de conservación fue porque el PSB establecido el 14 de noviembre de 2008 buscaba conservar los bosques nativos, páramos y otras formaciones vegetales del país, para

reducir las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la deforestación y mejorar las condiciones de vida de las comunidades rurales en esas áreas. Este proyecto opera mediante incentivos económicos otorgados dos veces al año (mayo y octubre) a los participantes, quienes deben proteger y conservar los recursos naturales de su territorio. El convenio tiene una duración de 20 años, renovable por igual periodo si no se notifica lo contrario con al menos un año de anticipación.

De acuerdo a Vásquez (2019) las tierras de propiedad comunal forman parte de la cordillera noroccidental con un rango altitudinal que varía entre los 1.640 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en Santa María hasta los 4.720 m.s.n.m. en el Volcán Chiles. Esta área se caracteriza por su variada topografía y variedad de ecosistemas, que van desde zonas de bosque tropical húmedo hasta páramos de alta montaña. Además, alberga una gran diversidad de flora y fauna, con muchas especies endémicas y de importancia ecológica.

Figura 2.

Mapa de ubicación de la comuna La Esperanza



Nota: La figura representa la ubicación de la comuna la esperanza, ubicada en el Carchi-Ecuador, compartida por las parroquias Maldonado y Tufiño, y los límites con territorio colombiano.

La delimitación espacial se realizó a partir de un shapefile oficial proporcionado por la Reserva Ecológica El Ángel el 22 de octubre de 2024. El polígono fue procesado en ArcGIS 10.8 bajo el sistema de referencia geográfico WGS84 (EPSG:4326), con datum WGS84. La superficie calculada asciende a 14.438,02 ha (144,38 km²). En la Tabla 3 se presentan los límites extremos de latitud y longitud que enmarcan el área de la comuna.

Tabla 3.

Coordenadas geográficas de la comuna La Esperanza

Coordenadas	Valor (° decimales)
Latitud mínima (Ymin)	0.753401°
Latitud máxima (Ymax)	0.888941°
Longitud mínima (Xmin)	-78.089513°
Longitud máxima (Xmax)	-77.863124°

Nota: Elaboración propia, las coordenadas corresponden al bounding box (límites extremos en latitud y longitud) del polígono de la comuna La Esperanza. El área total es de 14.438,02 ha (144,38 km²), proporcionado por la Reserva Ecológica El Ángel.

En el trabajo de Herrera (2017) se afirma que “Las partes altas corresponden al piso altitudinal del páramo seco, páramo de frailejones, páramo herbáceo, bosque siempreverde montano alto; mientras que, las zonas bajas presentan las formaciones vegetales de bosque siempreverde montano bajo y bosque de neblina montano”.

Las condiciones climáticas varían significativamente entre dos áreas específicas: la parte baja correspondiente a Maldonado y la parte alta desde Tufiño hasta el Volcán Chiles. En la parte baja, que abarca Maldonado, el clima es subhúmedo con un ligero déficit de agua, de tipo mesotérmico templado frío, con temperaturas oscilando entre 14 y 18 °C y precipitaciones anuales que van de 500 a 700 mm. En contraste, la parte alta desde Tufiño hasta el Volcán Chiles presenta un clima húmedo también con ligero déficit de agua,

clasificado como mesotérmico semifrío, con temperaturas más bajas entre 8 y 10 °C y un rango de precipitaciones anuales más amplio, de 750 a 1.250 mm (Herrera, 2017).

En el mismo documento se señala que la agricultura desempeña un papel central. Los cultivos tradicionales varían según las características climáticas y geográficas de la zona, con cultivos como papa, haba y mellocos predominando en la zona de la sierra de Tufiño, y plátano, yuca, maíz y frutas en la zona tropical en la parroquia de Maldonado. Además, una parte significativa del área total de la comuna se destina a pastizales en la zona subtropical. La extensión de tierra dedicada a la agricultura dentro de la comuna La Esperanza es considerable, abarcando aproximadamente el 21,9% de su área total, que asciende a 9.891,1 hectáreas. Esto subraya la importancia económica y cultural de la agricultura para la comunidad, proporcionando una base sólida para su sustento y desarrollo local.

En cuanto a la cobertura vegetal de la zona entre bosque y páramo, según Hofstede et al. (2014) establecen que este tipo de paisajes en Ecuador se caracterizan por vegetación de árboles, arbustos y pajonales de géneros como *Polylepis*, *Gynoxis*, *Buddleja*, *Miconia*, *Calceolaria*, *Chuquiragua*, *Hypericum*, *Rubus*, *Calamagrostis*, *Festuca* y helechos como *Polystichum*, *Hypolepis* y *Thelypteris*, asociados principalmente a los bosques nativos, los cuales representan el 34,54% del área comunal y se caracterizan por una carga de combustible alta debido a la presencia de estratos arbóreos y sotobosque. En el páramo, 47,48% del territorio, la vegetación predominante incluye pajonales de *Calamagrostis* y *Festuca*, y los frailejones (*Espeletia pycnophylla*) se encuentran en Carchi. Otros géneros presentes en el páramo son *Puya* y *Blechnum*, así como *Gentianella*, *Halenia*, *Senecio*, *Lupinus*, *Baccharis*, *Gaultheria*, y géneros de almohadillas como *Plantago*, *Eryngium*, *Distichia* y *Werneria*. Se calcula que los páramos ecuatorianos cuentan con cerca de 628 especies de plantas endémicas, lo que equivale al 15% de la flora endémica nacional y al 4% del total de su flora. Del total de especies endémicas, el 75% están en peligro y solo el 48% están protegidas en áreas designadas.

Además de los factores biofísicos, se incluyeron variables antrópicas vinculadas a la presión humana sobre el páramo. Según el VIII Censo de Población y Vivienda (INEC, 2022), las parroquias de Tufiño y Maldonado —que integran la comuna La Esperanza— presentan densidades poblacionales de 15 hab/km² y 10 hab/km² respectivamente, lo que evidencia una baja pero significativa ocupación territorial. A nivel de infraestructura, el

PDOT de Tufiño (2020) reporta que el acceso vial en la parroquia se realiza por vías lastradas y adoquinadas, pero al adentrarse las vías presentan limitaciones que dificultan la movilidad y la gestión de emergencias. Estas vías, aunque precarias, representan corredores de accesibilidad que incrementan el riesgo de ignición, ya que facilitan el ingreso de personas y el uso del fuego en actividades agrícolas.

En cuanto a las prácticas locales, se destaca que el 18% de la población entierra o quema sus residuos domésticos y agroquímicos, lo que constituye un factor de ignición recurrente (PDOT Tufiño, 2020). Asimismo, la presión sobre los ecosistemas nativos proviene de la ampliación de áreas agrícolas y ganaderas, el consumo de leña y la falta de empleo, generando un avance de la frontera agropecuaria sobre bosques y páramos (PDOT Tufiño, 2020). Estos procesos se vinculan directamente con el historial de incendios registrado en la zona (RAE, 2012–2021). De esta manera, los factores socioterritoriales permiten contextualizar la dinámica humana que, sumada a las condiciones biofísicas, explica los patrones de ignición y propagación de incendios forestales en la comuna.

3.2. Enfoque y Tipo de Investigación

3.2.1. Enfoque

La presente investigación se la cataloga de enfoque cuantitativo puesto que, durante su desarrollo se requirió de la recolección y análisis de datos numéricos provenientes de información geoespacial (pendiente, altitud, orientación, precipitación, temperatura, uso del suelo, entre otros). Dichas variables fueron estandarizadas y ponderadas mediante el método de Análisis Jerárquico de Procesos (AHP), con el fin de construir un índice compuesto de susceptibilidad a incendios forestales, lo que implica la transformación de datos categóricos en escalas comparables que posteriormente se integran en un modelo espacial, permitiendo clasificar el territorio en niveles de susceptibilidad (muy baja, baja, media, alta, muy alta), justificando el enfoque cuantitativo por ser de carácter objetivo, medible y replicable en los procedimientos empleados. Según Carrillo *et al.* (2019) en una investigación cuantitativa, el enfoque se basa en la evaluación de variables a partir de valores numéricos, considerando su magnitud, alcance o cantidad. Es decir, su desarrollo implica la recopilación, clasificación y análisis de datos mediante procedimientos como el conteo y la tabulación, permitiendo obtener resultados medibles y precisos.

3.2.2. Tipo de Investigación

Este trabajo se enmarca dentro del tipo de investigación-acción dado que parte de la identificación y recolección de datos sobre la susceptibilidad a los incendios, para luego analizarlos e interpretarlos con el fin de proponer estrategias de prevención y control que puedan ser implementadas por las autoridades pertinentes en un futuro. Asimismo, posee un diseño de tipo transversal descriptivo, ya que se analizan variables de datos geoespaciales en un único corte temporal con el propósito de describir la susceptibilidad a incendios forestales en la comuna La Esperanza.

3.3. Procedimientos

3.3.1. Materiales y Equipos

Materiales

- Cartas topográficas.
- Imagen satelital Landsat 8 (sensor OLI/TIRS), adquirida a través de la plataforma Earth Explorer (USGS). La imagen corresponde al paso del satélite del junio del 2024.

Equipos

- Software ArcGis 10.8
- Computadora portátil

3.3.2. Recopilación y Procesamiento de Datos

3.3.2.1. Consecución de la Información. Este paso es esencial para obtener los materiales necesarios para llevar a cabo el mapa de riesgos. Aquí se incluyó la siguiente información:

- Imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Earth Explorer (obtenida en 2024).
- Topografía: modelo digital de elevación (DEM), pendiente y orientación del terreno, generados mediante ArcGIS 10.8 a partir de datos del DEM (obtenida en 2024).
- Cobertura vegetal y uso del suelo obtenidos del Geoportal del Instituto Geográfico Militar IGM (información del año 2021).
- Datos climáticos: isotermas (datos de 2009) e isoyetas (datos de 1985–2015) proporcionados por el INAMHI, y velocidad del viento obtenida de

la plataforma Global Wind Atlas (2024).

- Infraestructura y actividades humanas (red vial y asentamientos) obtenidos del Geoportal del IGM (datos de 2021).
- Datos de validación: focos de calor e incendios registrados por la Reserva Ecológica El Ángel (RAE) en el periodo 2012–2021.

3.2.2.2. Etapa de Preparación. La información recopilada en la fase anterior debe ser preparada para las siguientes etapas. Esto incluye procesar los datos obtenidos para generar los insumos necesarios para desarrollar cada variable. El objetivo de esta etapa fue crear las siguientes capas con su respectiva información lista para ser tratada y ponderada en función de su nivel de riesgo:

- Pendiente
- Redes viales
- Temperatura
- Precipitación
- Cobertura vegetal
- Velocidad del viento
- Orientación del terreno

El análisis espacial de cada una de las capas se trabaja sobre un tamaño de celda ráster de 15 x 15 m. La unidad espacial de reporte para las mismas corresponde al polígono comunal de La Esperanza, que abarca parte de las parroquias Tufiño y Maldonado, en el cantón Tulcán. El estudio utilizó exclusivamente datos de carácter ambiental y territorial, sin involucrar información sensible. El shapefile comunal y los registros históricos de incendios fueron proporcionados por la Reserva Ecológica El Ángel (RAE) con fines académicos, asegurando el uso responsable de la información y los datos de fuentes públicas (IGM, INAMHI, Earth Explorer, Global Wind Atlas) fueron empleados conforme a las condiciones de uso de cada institución. Tanto las isotermas como las isoyetas fueron suministradas ya interpoladas por el INAMHI, mientras que la información de velocidad del viento provino de la malla interpolada del Global Wind Atlas, con resolución de 1 km reprocesada a la escala comunal, el análisis de precipitación se realizó con base en precipitación total.

3.3.3. Modelado Geoespacial de Susceptibilidad a Incendios

3.3.3.1. Ponderación de Variables Mediante el Método AHP. Para realizar el modelo de riesgo de incendios del área de estudio, se utilizó las ponderaciones de los factores topográficos y climáticos para formular la ecuación de susceptibilidad a incendios. En este punto se realizó el análisis espacial y se generaron capas temáticas que representen factores de riesgo como la pendiente, orientación de terreno, densidad de vegetación, accesibilidad. Para establecer los coeficientes de la ecuación se utilizó el método de análisis multicriterio Saaty, el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) creado por Thomas L. Saaty, que consiste en la construcción de jerarquías, la asignación de prioridades y la coherencia lógica. Los pasos fueron los siguientes:

a. Identificación de Variables. Se identificaron las variables que influyen en la susceptibilidad a incendios forestales en el entorno específico a ser estudiado basándose en estudios similares e información bibliográfica acerca de los factores de riesgo.

b. Asignación de Pesos. A cada variable se le asignó un peso en función de su relevancia y contribución al riesgo de incendio. Los pesos asignados variaron de 1 a 5, en donde la cercanía a 1 implica menor riesgo y a 5 es el mayor riesgo. Asimismo, dentro de cada variable se estableció rangos para identificar cuando la presencia o ausencia de dicho factor implicaría un mayor o menor riesgo.

c. Formulación de la Ecuación. Se desarrolló la ecuación que combine las variables ponderadas para calcular un índice de susceptibilidad. El cálculo del IRI se realizó mediante la fórmula tomada de la metodología de Mora-Vhanson:

$$IRI = [CV * 0,45] + [T^{\circ} * 0,19] + [P * 0,04] + [D * 0,07] \\ + [VV * 0,17] + [OT * 0,04] + [V * 0,04]$$

donde CV es la cobertura vegetal, T° la temperatura, P la precipitación, D la pendiente, VV la velocidad del viento, OT la orientación del terreno y V la proximidad a vías. Los valores de cada variable corresponden a las ponderaciones asignadas según el nivel de riesgo clasificado previamente.

3.3.3.2. Modelamiento de Susceptibilidad a Incendios Forestales. Una vez obtenido las ponderaciones de cada variable que incide en la susceptibilidad a incendios mediante la aplicación del método Saaty (1992) se procedió a aplicar la ecuación para

generar el mapa con zonas de susceptibilidad. Los procedimientos involucrados en este punto son:

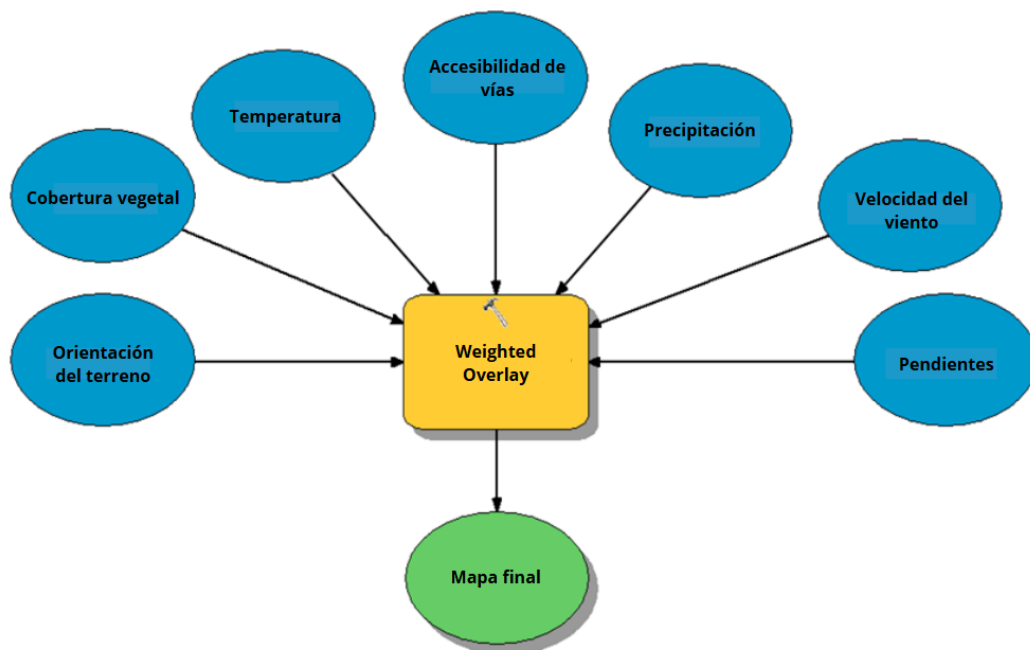
a. Implementación de la Ecuación en ArcGIS. La ecuación formulada se integró en ArcGIS utilizando las herramientas de análisis ráster del software.

b. Cálculo del Índice de Riesgo. Se calculó el índice de riesgo para el área de estudio, generando una capa ráster que representa la susceptibilidad a incendios forestales.

c. Sistematización del Proceso Mediante la Herramienta Model Builer. El proceso permitió optimizar el flujo de trabajo, mejorar la eficiencia y reproducibilidad de los análisis, como se puede observar en la Figura 3, donde se observa el proceso aplicado en Model Builer.

Figura 3.

Integración de capas ráster mediante superposición ponderada para generación de resultado final



Nota: Tomado de la herramienta Weighted Overlay de ArcGIS 10.8

Validación del Modelo. Se realizó una comparación del modelo con datos históricos de incendios en la zona para evaluarlo mediante la superposición de los mapas de riesgo obtenidos con los datos de los focos de calor (*hotspots*) del software del

servidor *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS) de la NASA, el cual permite compilar bases de datos sobre desastres, además de complementar con datos proporcionados por el Ingeniero Damián Ponce responsable de la Reserva Ecológica El Ángel. Para el presente trabajo, correspondió al período 2012-2023, se seleccionaron los *hotspots* y utilizando el software ArcGIS, se identificó la tasa de aciertos del modelo al comparar las áreas de alto riesgo predichas con las ubicaciones de los *hotspots*. Se aplicó la herramienta Spatial Join, uniendo los puntos de incendios con el polígono del mapa de riesgo, empleando la opción JOIN_ONE_TO_ONE y la condición INTERSECT, con el fin de identificar la cantidad de puntos que coincidían espacialmente con cada clase de riesgo. A partir de esta información, se calculó el porcentaje de coincidencia de incendios en cada categoría de riesgo. De esta manera, se estimó la tasa de aciertos del modelo al comparar las zonas clasificadas con alto y muy alto riesgo con las ubicaciones reales de los incendios. Este procedimiento permitió evaluar la correspondencia espacial entre los resultados del modelo y los eventos históricos, garantizando una validación cuantitativa y objetiva de la predicción (Makumbura *et al.*, 2024).

Generación del Mapa de Susceptibilidad a Incendios. Se definió el mapa de susceptibilidad a incendios forestales, utilizando categorías de susceptibilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, empleando la calculadora Ráster del programa ArcGIS.

3.3.4. Diseño de Estrategias de Prevención y Control.

En esta fase se detalló el protocolo de actuación y la propuesta de prevención y control para el desarrollo del Plan de Prevención y Control de Incendios Forestales en la comuna La Esperanza, centrado en estrategias de mitigación y preparación. Las variables consideradas en el modelamiento (pendiente, orientación, cobertura vegetal, precipitación, temperatura, viento y accesibilidad) se articularon con las condiciones biofísicas y antrópicas propias del territorio. En particular, la cobertura de páramo y frailejones altamente inflamables, la práctica de quemas agrícolas y el pastoreo extensivo, así como la presencia de vías que facilitan el ingreso de personas a zonas frágiles, constituyen factores que explican los patrones de ignición y propagación. Esta conexión entre clima, uso del suelo y prácticas locales permitió que la propuesta de prevención y control responda de manera directa al objetivo del estudio, integrando la realidad ecológica y social de la comuna con la evidencia espacial obtenida en el análisis. Para

este estudio, se aplicó un método identificado en la tesis de Quistial Valencia (2016) el cual abarca los siguientes pasos:

3.3.4.1. Análisis de los Resultados del Modelamiento Geoespacial. Se analizaron a profundidad los resultados del modelamiento geoespacial realizado en la fase II para identificar patrones y factores críticos de riesgo que inciden en la susceptibilidad a incendios, prestando especial atención a las áreas con mayor susceptibilidad, buscando comprender las causas subyacentes y los escenarios de mayor riesgo.

Desarrollo de las Propuestas de Prevención

a. Protocolos de Alerta Temprana y Respuesta Rápida. En este punto se detalló el procedimiento que debe seguirse en caso de cualquier quema, conato o incendio forestal. Aquí se define el Puesto de Mando Central y se establecen las instituciones involucradas y las funciones de sus integrantes.

- **Estrategia de prevención e información – acciones.** Se diseñaron acciones específicas basadas en la evaluación de riesgos y el análisis geoespacial. Esto incluye la implementación de programas educativos y campañas de concienciación destinadas a la comunidad local, con el fin de promover prácticas seguras y responsables frente a incendios forestales.
- **Aviso de incendio.** Se estableció un protocolo claro para la detección y notificación temprana de incendios forestales. Esto involucra la coordinación con las autoridades competentes para una respuesta rápida y efectiva.
- **Arribo al evento de incendio.** Se definió un procedimiento operativo estándar para la llegada rápida y segura de los equipos de respuesta a los lugares afectados por incendios forestales, asegurando una acción coordinada y eficiente.
- **Registro de información.** Se estableció un sistema de registro detallado para documentar las características de cada incidente de incendio forestal, incluyendo datos relevantes sobre la magnitud, la duración y las condiciones ambientales.

b. Programas de educación ambiental y sensibilización comunitaria. Se planteó realizar programas continuos de comunicación y educación comunitaria, dirigidos a incrementar la conciencia pública sobre la prevención de incendios forestales y las prácticas de respuesta adecuadas.

Desarrollo de las Propuestas de Control

a. Estrategias de Manejo del Combustible Vegetal

- ***Planes de quema.*** Se desarrolló estrategias de quema controlada como herramienta preventiva, basadas en estudios de comportamiento del fuego y condiciones meteorológicas favorables.
- ***Construcción de áreas cortafuegos.*** Se propuso la creación y mantenimiento de áreas cortafuegos estratégicamente ubicadas, con el objetivo de reducir la propagación potencial de incendios.

b. Mecanismos de Monitoreo y Evaluación Continua. Se propuso la instalación de infraestructuras de control estructural y sistemas de vigilancia avanzados para detectar incendios en etapas tempranas y facilitar una respuesta inmediata.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención de Cartografía Temática

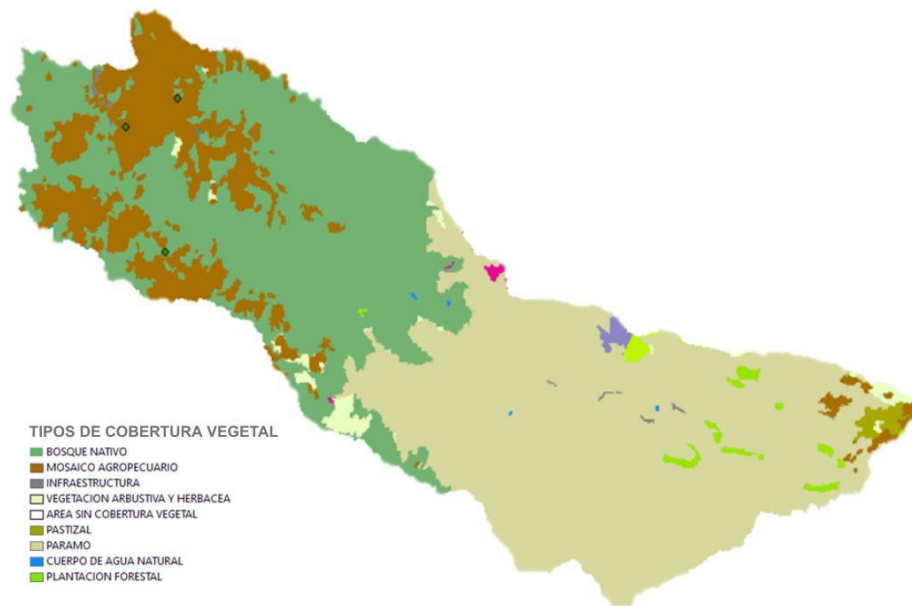
Esta sección presenta los mapas temáticos elaborados a escala 1:140.000, que permiten analizar diferentes factores de riesgo de incendios en la comuna La Esperanza. Estos mapas incluyen la cobertura vegetal, temperatura, precipitación, accesibilidad, pendientes, orientación del terreno y velocidad del viento. Cada uno de estos factores contribuye a evaluar la susceptibilidad de la zona al riesgo de incendios forestales.

Mapa de Cobertura Vegetal. El mapa de cobertura vegetal se generó a partir de datos obtenidos en el Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM). La información fue descargada en junio de 2024, correspondiente a la versión de actualización de 2021, con una escala original 1:100.000. Los datos cuentan con licencia de uso público conforme al Geoportal del IGM. La capa fue trabajada bajo el sistema de referencia WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618) garantizando precisión temática y posicional.

Para procesar esta información, se aplicó la herramienta *Extract by Mask* de ArcGIS empleando el método de remuestreo Nearest Neighbor y ajustando los datos de cobertura vegetal a los límites de la comuna (Figura 4). Posteriormente, se clasificaron los tipos de cobertura según su susceptibilidad a incendios, tomando como referencia las características propias de cada una, como la densidad y estructura de la vegetación, el tipo de material combustible presente y su nivel de sequedad. Esta clasificación permitió identificar las coberturas más propensas a la propagación del fuego. Las coberturas identificadas en esta zona incluyen el páramo que constituye la cobertura predominante con un 47,48% del área, seguido por el bosque nativo (34,54%) y el mosaico agropecuario (14,43%). En menor proporción se encuentran vegetación arbustiva y herbácea (1,30%), pastizales (0,54%), plantaciones forestales (0,74%), áreas sin cobertura (0,74%), infraestructura (0,16%) y cuerpos de agua (0,06%).

Figura 4.

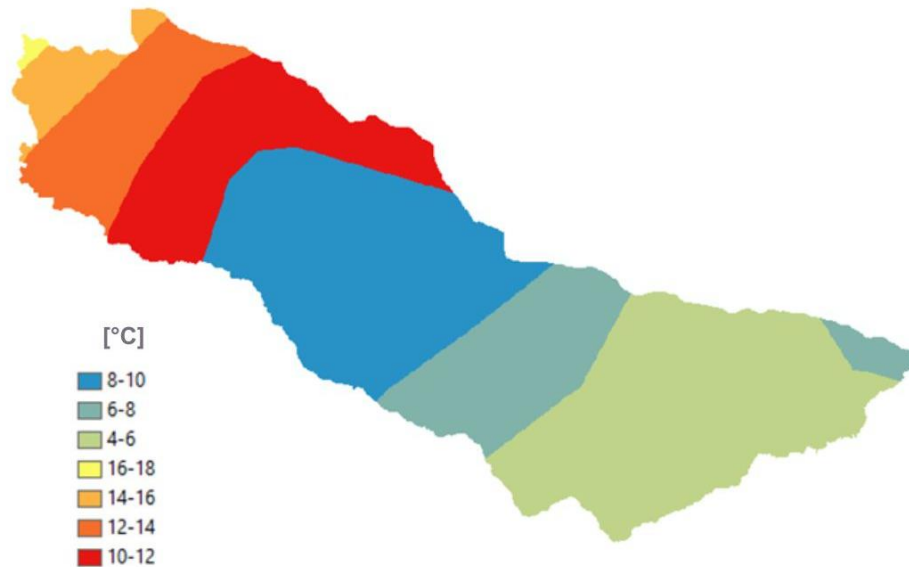
Mapa de uso y cobertura del suelo en la Comuna La Esperanza



Mapa de Temperaturas. Para el análisis del mapa de la variación de temperatura en la comuna, se obtuvo la información de una capa vectorial de polígonos de isothermas (zonas con igual temperatura promedio) en formato *shapefile* (SHP) del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI a escala original de 1:250 000. Los datos fueron descargados en mayo de 2024, con base en la climatología del año 2009, resolución espacial de 15 m, y versión institucional vigente al momento de descarga y el uso está autorizado bajo licencia abierta de datos públicos INAMHI, Se mantuvo el sistema de referencia común WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618). Para su tratamiento en el programa ArcGIS, primero se realizó un corte para darle forma a la capa con la de la comuna mediante la herramienta *Clip*, obteniendo así la capa de variación de temperatura como se observa en la figura 5. Posteriormente, se transformó la capa a formato *Raster* utilizando la herramienta *Polygon to Raster* en ArcGIS, asignando el valor del atributo principal de temperatura a cada celda, con resolución de 15 m dado que los datos eran de tipo vectorial continuo, el método de remuestreo empleado fue *Nearest Neighbor* y se procedió a clasificar los datos en función del riesgo a incendio de cada rango de temperatura.

Figura 5.

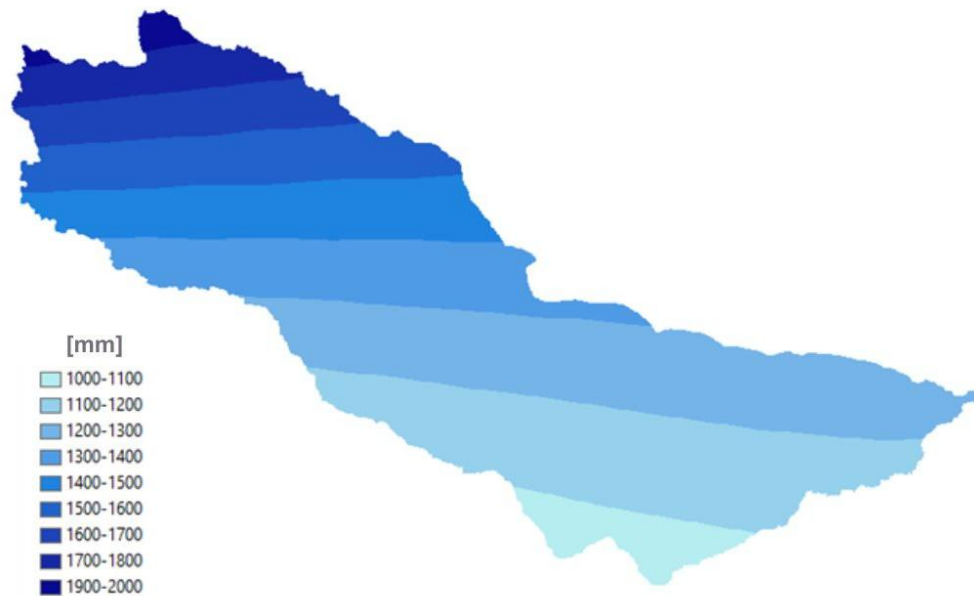
Mapa de condiciones climáticas: temperaturas promedio



Mapa de Precipitación. Para el análisis de la precipitación anual en la comuna La Esperanza, se utilizó información de isoyetas disponible en el formato SHP del INAMHI. (periodo base 1985–2015) con escala original de 1:250.000, los datos fueron descargados en mayo de 2024, en formato SHP y su licencia corresponde a uso académico abierto según las condiciones del INAMHI. La proyección empleada fue WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618), manteniendo coherencia espacial con las demás capas. Después de delimitar la capa mediante la herramienta *Clip* y convertirla a formato *Raster Raster* utilizando la herramienta *Polygon to Raster* en ArcGIS (Figura 6),, asignando el valor del atributo principal de precipitación a cada celda, con una resolución espacial definida de 15 metros por píxel dado que los datos eran de tipo vectorial continuo, el método de remuestreo empleado fue *Nearest Neighbor*, se procedió a clasificar los datos de precipitación en función de su susceptibilidad a incendios, reconociendo que menores niveles de precipitación crean condiciones propicias para la acumulación de biomasa seca, un factor clave en la combustión de incendios forestales.

Figura 6.

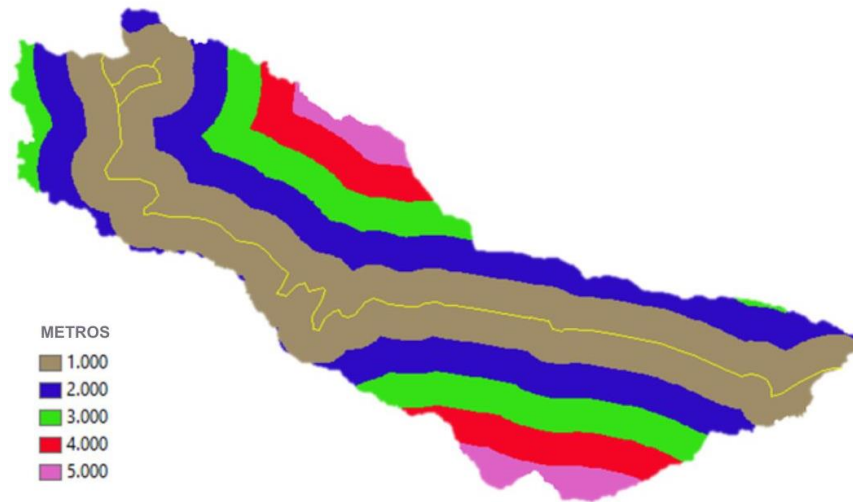
Mapa de condiciones climáticas: precipitaciones anuales



Mapa de Accesibilidad. Para incorporar el factor de accesibilidad en la evaluación del riesgo de incendio, se utilizó un mapa de red vial descargado del Geoportal del IGM (junio de 2024), la capa cuenta con una escala original 1:25.000, licencia de uso público según la política del IGM y se reproyectó al sistema WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618). En primer lugar, se realizó un corte de la capa utilizando la herramienta *Clip* en ArcGIS para ajustarla a los límites de la comuna. Posteriormente, se empleó la herramienta *Multiple Ring Buffer* para generar corredores de accesibilidad alrededor de las vías principales a diferentes distancias, específicamente a 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 y 5.000 metros. Esta herramienta permitió establecer zonas con diferentes niveles de proximidad a las vías, lo que es un factor determinante en la rapidez con la que un incendio puede ser controlado, ya que facilita el acceso de los equipos de respuesta rápida. Una vez creados los *buffers*, se transformó la capa resultante a formato Raster con una resolución espacial definida de 15 metros por píxel y empleando el método de remuestreo Nearest Neighbor (Figura 7) para su análisis y clasificación dentro del modelo de evaluación del riesgo de incendio con la ayuda de la herramienta *Model Builer*.

Figura 7.

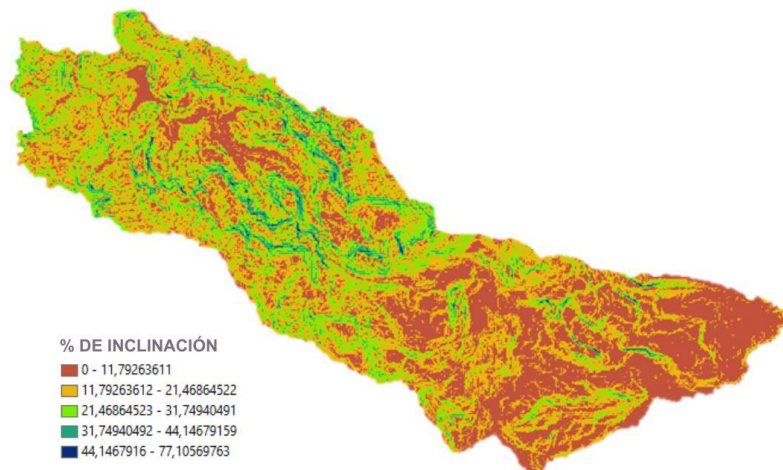
Mapa de accesibilidad de vías



Mapa de Pendientes. El mapa de pendientes se desarrolló a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de la plataforma Earth Explorer (USGS), la descarga se realizó en abril de 2024, a partir del producto SRTM de 30 m de resolución, reprocesado a 15 m mediante resampling bilineal, la licencia de uso corresponde a datos abiertos de la NASA/USGS y se re proyectó a WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618). Modelo de Elevación Digital (DEM), para su tratamiento en ArcGIS se empleó la herramienta *Slope* para obtener los valores de inclinación del terreno. Se usó este factor en la evaluación del riesgo de incendio obteniéndolo directamente del mapa de la página *Earth Explorer*.

Figura 8.

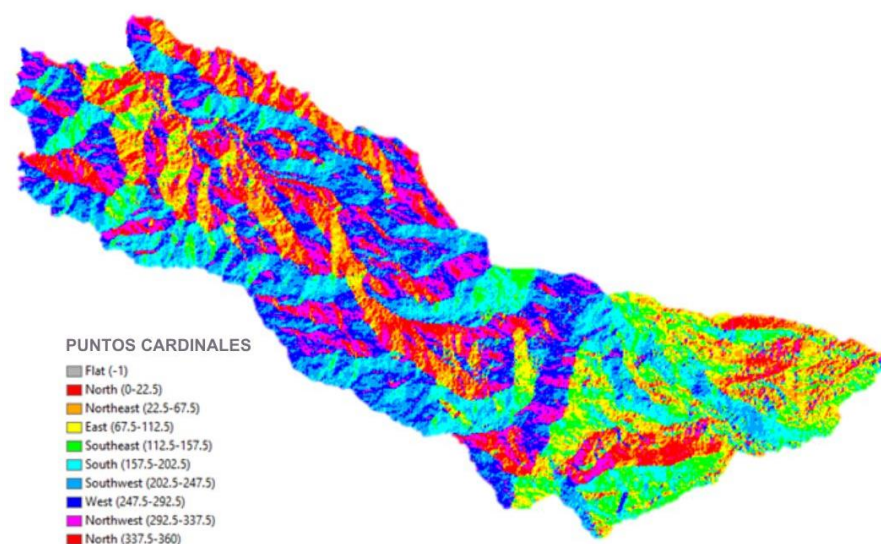
Mapa de pendiente del terreno en la Comuna La Esperanza



Mapa de Orientación de Terrenos. Para este análisis, se utilizó información proveniente de la plataforma *Earth Explorer (USGS)*, los datos corresponden al mismo DEM (descargado abril de 2024, resolución original 30 m, reprocesado a 15 m), la licencia de uso es abierta, bajo dominio público USGS y manteniendo el sistema de referencia WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618). El mapa de orientación de terrenos figura 9 fue generado a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) mediante la herramienta *Aspect*, la cual permite determinar las direcciones de exposición del terreno. La orientación del terreno se incluyó como una variable clave en la evaluación del riesgo de incendios forestales, considerando que la dirección en la que se expone una ladera influye significativamente en el comportamiento del fuego.

Figura 9.

Mapa de orientación del terreno en la Comuna La Esperanza



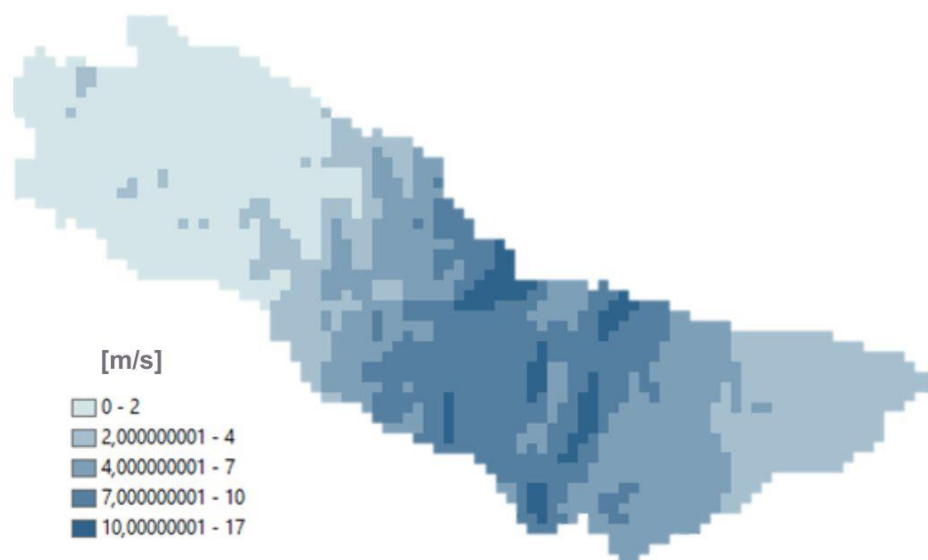
En este mapa, los valores de cada celda del ráster de salida indican la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación, esta dirección se mide en el sentido de las agujas del reloj, en grados desde 0° (norte) hasta 360° (norte nuevamente), formando un círculo completo. Por esta razón, se observa en la simbología una categoría de "North (0–22.5)" y otra de "North (337.5–360)", ya que ambas franjas bordean el norte absoluto. Las áreas planas que no presentan pendiente descendente tienen un valor de -1 y aparecen como "Flat" en el mapa. (Esri, s.f.)

Mapa de Velocidad del Viento. Para la elaboración del mapa de velocidad del viento en la comuna, se utilizó información proveniente de la plataforma *Global Wind Atlas*

(versión 3.4, 2024), la capa se descargó en mayo de 2024, con resolución espacial de 1 km reprocesada a 15 m, licencia CC BY 4.0 (uso y redistribución con atribución) y el sistema de referencia adoptado fue WGS 1984 UTM Zona 18N (SRID 32618), garantizando uniformidad con las demás capas. Esta fuente de datos permitió obtener una representación precisa de las velocidades del viento en el área de estudio. El procesamiento inicial consistió en recortar los datos a la forma de la comuna mediante la herramienta *Extract by Mask* en el programa ArcGIS empleando el método de remuestreo Nearest Neighbor, obteniendo así el *Raster* con una resolución espacial definida de 15 metros por píxel mostrado en la figura 10. Posteriormente, los datos fueron clasificados según su influencia en el riesgo de incendio forestal.

Figura 10.

Mapa de velocidades del viento



Todas las capas utilizadas en el modelamiento geoespacial fueron normalizadas espacialmente para garantizar su compatibilidad en el proceso de superposición. Se aplicó la herramienta Snap Raster tomando como referencia el modelo digital de elevación (DEM), lo que permitió alinear las celdas y asegurar la correspondencia exacta entre los rásteres generados. Adicionalmente, se estableció como máscara de análisis el límite vectorial de la Comuna La Esperanza, de manera que todas las operaciones se ejecutaran dentro de su extensión territorial. El remuestreo se realizó mediante el método nearest

neighbor, con el fin de conservar los valores originales de las variables categóricas y evitar distorsiones en la reclasificación temática.

4.2. Determinación de los Niveles de Peligro

En el análisis para la zonificación de áreas susceptibles a incendios forestales, el índice de riesgo de incendio (IRI) obtenido tras la superposición ponderada fue reclasificado en cinco niveles ordinales de peligro, asignando valores de 1 a 5 en orden creciente de susceptibilidad (1 = Muy bajo, 2 = Bajo, 3 = Medio, 4 = Alto, 5 = Muy alto) ajustando la clasificación en natural breaks (Jenks) de 5 clases. Esta reclasificación se realizó de manera discreta para facilitar la interpretación cartográfica y la comparación entre variables se establecieron cuatro niveles de peligro: Muy bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy alto. Estas categorías se definieron tras la suma ponderada de las variables consideradas en el modelo, permitiendo una clasificación detallada del territorio según su susceptibilidad y las condiciones que facilitan la propagación de incendios forestales.

Para determinar los niveles de peligro, se asignó valores de ponderación específicos para cada variable, los cuales se establecieron de acuerdo a su influencia en la generación y propagación del fuego. Posteriormente, se asignó otros valores para los rangos de cada variable, que corresponden a condiciones físicas, biológicas y climáticas presentes en el área de estudio.

La tabla 4 incluye la clasificación detallada de los niveles de peligro, junto con los colores asignados a cada categoría para su representación en los mapas de riesgo. Estos colores facilitan la interpretación visual de los resultados, permitiendo identificar de manera inmediata las zonas críticas y priorizar acciones de prevención y control.

Tabla 4.

Asignación de color según los niveles de peligro

Nivel de peligro	Color
Muy alto	Rojo
Alto	Naranja
Medio	Amarillo

Bajo	Verde
Muy bajo	Verde oscuro

Nota: Elaboración propia

En donde la calificación del nivel de riesgo es la siguiente:

- **Muy alto:** En esta categoría se encuentran las áreas más críticas y vulnerables a los incendios forestales. Estas zonas combinan factores altamente favorables para la ignición y propagación del fuego, como vegetación densa y seca, altas temperaturas, bajas precipitaciones y pendientes muy pronunciadas. Además, suelen estar expuestas a fuertes vientos, lo que facilita la rápida expansión de los incendios. La influencia humana, como quemas no controladas, desechos inflamables o uso intensivo del suelo, es significativa. En estas áreas se requieren intervenciones urgentes y constantes, tanto en prevención como en control y monitoreo.
- **Alto:** Estas áreas presentan condiciones que aumentan considerablemente el riesgo de incendios forestales. Suelen estar caracterizadas por vegetación seca, como arbustos inflamables o pastizales en descomposición, que actúan como combustible. Las pendientes moderadas o pronunciadas contribuyen a una mayor velocidad de propagación, y las condiciones climáticas, como altas temperaturas o vientos predominantes, intensifican este riesgo. La actividad humana, incluyendo la agricultura extensiva o el turismo descontrolado, es más frecuente, lo que aumenta las fuentes de ignición.
- **Medio:** Las zonas con un nivel de riesgo medio presentan condiciones intermedias para que ocurran incendios forestales. Por lo general, la vegetación no es altamente inflamable, pero tampoco está exenta de actuar como combustible en ciertas situaciones, como pastizales o matorrales en estado de transición. Las pendientes son ser moderadas, lo que no facilita tanto la propagación rápida del fuego como en terrenos más inclinados, pero tampoco la limita por completo. Las condiciones climáticas en estas áreas pueden incluir periodos ocasionales de sequía o vientos moderados, que podrían incrementar el riesgo. Además, la actividad humana, como prácticas agrícolas o pequeñas quemas serian ser un factor de ignición si no se controla adecuadamente. Aunque no es una categoría

crítica, es importante implementar medidas preventivas y realizar monitoreos regulares para evitar que el riesgo aumente.

- **Bajo:** En esta categoría se incluyen zonas con una ligera predisposición a la ocurrencia de incendios, pero donde los factores de riesgo son moderados o están parcialmente controlados. Las áreas con vegetación intermedia, como pastizales húmedos o matorrales poco inflamables, son características de esta categoría. Las pendientes, aunque presentes, son leves y no facilitan una propagación rápida del fuego. Sin embargo, se pueden observar algunos factores de riesgo relacionados con actividades humanas, como pequeños asentamientos o prácticas agrícolas de bajo impacto.
- **Muy bajo:** Esta categoría agrupa zonas con condiciones altamente desfavorables para la ignición y propagación del fuego. Se trata de áreas donde predominan suelos húmedos, alta cobertura vegetal no inflamable y climas frescos con buena disponibilidad hídrica. La actividad humana en estas áreas suele ser mínima o está controlada, lo que disminuye significativamente el riesgo de incendios. Además, las pendientes suelen ser suaves o inexistentes, limitando la propagación del fuego. Estas áreas representan los puntos más seguros del territorio en términos de incendios forestales.

4.3. Elaboración de Ponderaciones de Variables y Clases

Una vez obtenidas y tratadas las capas a emplear en el mapa de riesgo de incendios, para determinar con precisión las zonas de mayor riesgo de incendios forestales, se desarrolló una matriz de ponderaciones en la que se asignó un peso relativo a cada variable y clase, basándose en su importancia en la propagación del fuego. Este proceso, fundamentado en la metodología de Análisis Jerárquico de Proceso (AHP), garantiza que las ponderaciones asignadas reflejen la relevancia de cada factor en el contexto específico de la comuna La Esperanza. El procedimiento consistió en los siguientes pasos:

Definición de Ponderaciones: Se asignaron valores porcentuales a cada variable, asegurando que la suma total de las ponderaciones alcanzara el 100%. Se realizó mediante la calculadora AHP-OS de Klaus D. Goepel. Este paso implicó la revisión de estudios previos como base y ejemplo para determinar la influencia relativa de cada variable en la generación y propagación de incendios forestales. A continuación, se muestra en la Tabla 5, los resultados de los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones

por pares, donde cada criterio se compara directamente con los demás para determinar su importancia relativa y asignar pesos numéricos a cada criterio según su importancia; y en la Tabla 6 la matriz de decisión, donde los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión usado para encontrar los pesos óptimos para cada criterio en la toma de decisiones.

Tabla 5.

Prioridades de las variables según el Análisis Jerárquico

#	VARIABLES	Prioridad	Rango
1	Velocidad del viento	18%	2
2	Precipitación	4%	4
3	Temperatura	18%	2
4	Vías	4%	5
5	Orientación del terreno	4%	5
6	Pendientes	8%	4
7	Cobertura vegetal	44%	1

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos en la calculadora AHP-OS

Tabla 6.

Matriz de decisión AHP

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.00	5.00	1.00	5.00	5.00	3.00	0.33
2	0.20	1.00	0.20	1.00	1.00	0.33	0.11
3	1.00	5.00	1.00	5.00	5.00	3.00	0.33
4	0.20	1.00	0.20	1.00	1.00	0.33	0.11
5	0.20	1.00	0.20	1.00	1.00	0.33	0.13
6	0.33	3.00	0.33	3.00	3.00	1.00	0.14
7	3.00	9.00	3.00	9.00	9.00	7.00	1.00

Nota: Adaptado de los resultados de la calculadora AHP-OS.

El valor propio máximo obtenido fue $\lambda_{\max} = 7.122$, con un índice de consistencia (CI) de 0.0203. Considerando un índice aleatorio (RI) de 1.32 para $n = 7$, el cociente de consistencia (CR) resultó de 0.015 (1.5%), valor inferior al umbral de 0.1 establecido por Saaty (1980). Por tanto, la matriz de comparaciones presenta una consistencia adecuada, y los pesos derivados se consideran válidos para el modelo de evaluación multicriterio. En el proceso de ponderación se aplicó la escala fundamental de Saaty (1–9) para las comparaciones por pares entre criterios, considerando valores impares (1, 3, 5, 7, 9) 1- Importancia igual, 3- Importancia moderada, 5- Importancia fuerte, 7- Importancia muy fuerte, 9- Importancia extrema y sus intermedios (2, 4, 6, 8). Los pesos derivados de esta matriz se utilizaron posteriormente para ponderar las capas temáticas, las cuales fueron reclasificadas en una escala ordinal de cinco clases (1–5) que representan niveles de susceptibilidad de Muy bajo a Muy alto. De esta manera, la escala AHP (1–9) definió la importancia relativa entre criterios, mientras que la escala temática (1–5) representó la variación espacial interna de cada factor, garantizando la coherencia jerárquica del modelo.

Clasificación de Clases: Dentro de cada variable, se identificaron subcategorías o clases, a las que se asignaron valores del 1 al 5. Este rango representa el nivel de riesgo asociado, donde más cercano a 1 es bajo riesgo de incendio y más cercano a 5 es alto riesgo de incendio. Para esta clasificación se elabora una matriz de ponderaciones, que integra todas las variables y clases, mostrando cómo contribuyen al mapa final de riesgo de incendios. En este proceso, se priorizaron factores como la vegetación inflamable, topografía, factores antropogénicos y las condiciones climáticas extremas, que presentan una influencia crítica en la ocurrencia de incendios.

Detalles de las ponderaciones:

- *Cobertura vegetal:* Representa la variable con mayor peso, debido a su relación directa con la disponibilidad de combustible. Las clases incluyen bosques secos, pastizales y páramos, con valores ascendentes según su inflamabilidad.
- *Temperatura:* Ponderada en segundo lugar, ya que las altas temperaturas reducen la humedad relativa y aumentan la inflamabilidad.

- *Velocidad del viento:* En el mismo puesto que la temperatura, dado que influye directamente en la propagación del fuego. Vientos más fuertes pueden acelerar la expansión de un incendio y dificultar su control.
- *Precipitación:* Considerada inversamente proporcional al riesgo de incendios. Las áreas con menor precipitación recibieron valores más altos.
- *Pendiente y orientación del terreno:* Estas variables determinan la velocidad de propagación del fuego, asignándose mayores valores a pendientes pronunciadas y orientaciones expuestas a vientos predominantes.
- *Accesibilidad:* Representa un factor indirecto pero relevante, dado que las actividades humanas, como el turismo y la agricultura, pueden generar fuentes de ignición.

En la Tabla 7, se detalla la matriz de ponderaciones elaborada, proporcionando un desglose de los valores asignados a cada variable y clase. Este instrumento es esencial para la construcción del mapa final de riesgo, ya que permite una integración coherente de los datos espaciales y su interpretación para la realización del mapa final.

Tabla 7.

Ponderación de variables y clases de riesgo de incendio

Variable	Peso	Clases	Ponderación	Categoría
Cobertura vegetal	44%	Cuerpo de agua	1	Muy bajo
		Infraestructura	1	Muy bajo
		Área sin cobertura vegetal	1	Muy bajo
		Plantación forestal	3	Medio
		Páramo	3	Medio
		Bosque nativo	4	Alto
		Vegetación arbustiva y herbácea	5	Muy alto
		Mosaico agropecuario	5	Muy alto
Temperatura	18%	Pastizal	3	Medio
		4 °C – 6 °C	1	Muy bajo
		6 °C – 8 °C	2	Bajo
		8 °C – 10 °C	2	Bajo
		10 °C – 12 °C	3	Medio

Variable	Peso	Clases	Ponderación	Categoría
Precipitación		12 °C – 14 °C	4	Alto
		14 °C – 16 °C	4	Alto
		16 °C – 18 °C	5	Muy alto
		1.000 -1.100 [mm/año]	5	Muy alto
		1.100-1.200 [mm/año]	5	Muy alto
		1.200-1.300 [mm/año]	4	Alto
		1.300-1.400 [mm/año]	4	Alto
	4%	1.400-1.500 [mm/año]	3	Medio
		1.500-1.600 [mm/año]	3	Medio
		1.600-1.700 [mm/año]	2	Bajo
		1.700-1.800 [mm/año]	2	Bajo
		1.900-2.000 [mm/año]	1	Muy bajo
	Velocidad del viento		0,7 – 1,9 [m/s]	1
		1,9 -2,8 [m/s]	1	Muy bajo
		2,8 -3,9 [m/s]	2	Bajo
		3,9 – 5,1 [m/s]	2	Bajo
18%		5,1 – 6,6 [m/s]	2	Medio
		6,6 -7,9 [m/s]	3	Medio
		7,9 – 9,2 [m/s]	3	Alto
		9,2 -11,1 [m/s]	4	Alto
Pendientes		11,2 – 17,1 [m/s]	5	Muy alto
		<12%	1	Muy bajo
		12-22%	2	Bajo
	8%	22%-32%	3	Medio
		32%-42%	4	Alto
Orientación del terreno		42%-77%	5	Muy alto
		Norte	4	Alto
	4%	Noreste	3	Medio
		Este	4	Alto

Variable	Peso	Clases	Ponderación	Categoría
Vías	4%	Sureste	1	Muy bajo
		Sur	2	Bajo
		Suroeste	5	Muy alto
		Oeste	5	Muy alto
		Noroeste	3	Medio
		Norte	4	Alto
		<1.000 m	5	Muy alto
		1.000 m – 2.000 m	4	Alto
		2.000 m – 3.000 m	3	Medio
		3.000 m – 4.000 m	2	Bajo
>5.000 m	1	Muy bajo		

Nota: Elaboración propia

4.4. Obtención del Mapa de Riesgo de Incendio

Para determinar el Índice de Riesgo de Incendio (IRI), se siguió un proceso que involucró varias etapas para integrar las diferentes variables de decisión relacionadas con la susceptibilidad a incendios forestales. En primer lugar, se asignó una clasificación de riesgo de incendio (Muy bajo, Bajo, Alto y Muy alto) a cada variable de acuerdo con su potencial para influir en la probabilidad de ocurrencia y propagación del fuego. Estas variables incluyen cobertura vegetal, temperatura, precipitación, pendiente, velocidad del viento, orientación del terreno y proximidad a vías. Posteriormente, las categorías de riesgo se escalaron a valores numéricos entre 1 y 5, donde 1 representa el menor nivel de riesgo y 5 el más alto, permitiendo así la ponderación de cada variable.

En la siguiente etapa, todas las capas de información geoespacial correspondientes a estas variables se superpusieron utilizando el programa ArcGIS 10.8. Esto permitió integrar las distintas capas para reflejar la interacción de los factores que afectan el riesgo de incendios. El cálculo del IRI se realizó mediante la fórmula tomada de la metodología de Mora-Vharson:

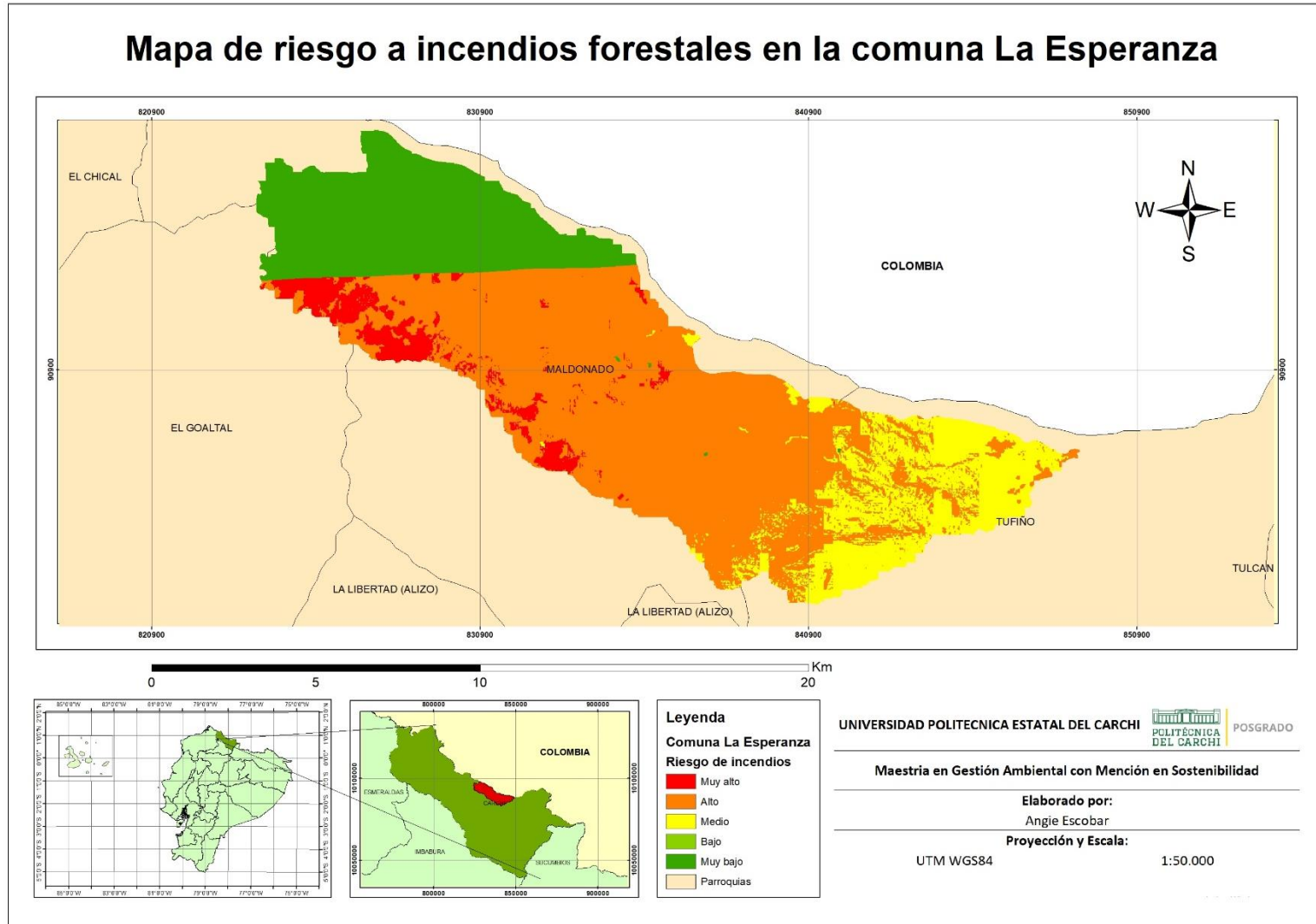
$$IRI = [CV * 0,44] + [T^{\circ} * 0,18] + [P * 0,04] + [D * 0,08] + [VV * 0,18] \\ + [OT * 0,04] + [V * 0,04],$$

donde CV es la cobertura vegetal, T° la temperatura, P la precipitación, D la pendiente, VV la velocidad del viento, OT la orientación del terreno y V la proximidad a vías. Los valores de cada variable corresponden a las ponderaciones asignadas según el nivel de riesgo clasificado previamente.

Finalmente, el mapa de riesgo de incendio se generó a partir de los valores obtenidos del IRI, que facilita la identificación visual de las zonas más críticas, proporcionando una herramienta efectiva para la planificación y gestión de medidas preventivas y de mitigación en la región de estudio. A continuación, en la Figura 11 se muestra el mapa final sobre el riesgo de incendios forestales en la Comuna:

Figura 11.

Mapa de zonificación de riesgo de incendios



En el mapa final de riesgo se resalta que, la categoría de riesgo Muy Alta abarca una extensión de 786,8 hectáreas, lo que representa el 5,44% del total de la zona de estudio. Esta zonificación se encuentra localizada en el oeste, dentro de la parroquia de Maldonado, colindante con el cantón Espejo. En toda la comuna, el riesgo Alto se concentra principalmente en la zona media, alcanzando un porcentaje del 55,86%, lo que equivale a 8.066,8 hectáreas, siendo la categoría más extensa en términos de riesgo identificado por incendios forestales, se debe a la mayor ponderación de la variable cobertura vegetal dentro del modelo AHP–SIG, lo que incrementa la influencia de esta capa en el resultado final. El histograma y la curva acumulada del IRI (Anexo G) confirman esta tendencia, mostrando una distribución asimétrica hacia valores altos. Aun así, el patrón coincide con las características ambientales del área, donde la presencia de vegetación continua y pendientes moderadas favorece la propagación del fuego. Estas áreas presentan una susceptibilidad muy alta debido a la combinación de la cobertura vegetal predominante, las características pirogénicas asociadas a las condiciones climáticas de la región, la facilidad de acceso por vías y pendientes moderadamente escarpadas. Esto evidencia la necesidad de implementar estrategias y acciones inmediatas para proteger el ecosistema presente.

Estas categorías de riesgo se relacionan en gran medida con el tipo de cobertura vegetal y la cercanía a vías de acceso. Entre los tipos de vegetación más representativos en estas áreas de riesgo se encuentran el bosque nativo, el mosaico agropecuario y el páramo. Además, el riesgo Muy alto se encuentra focalizado en un pequeño asentamiento poblado. Aunque la proporción de la categoría Muy Alta no es significativa en términos porcentuales, las consecuencias de un incendio forestal en estas áreas, sumado a la ausencia de soluciones preventivas eficaces, podrían resultar en costos incalculables tanto a nivel ecológico como económico.

Para el riesgo Medio, este representa 16,35% del área total, lo que representa 2.361,9 hectáreas totales, se presenta en la parte este de la comuna acercándose al cantón Tufiño y está asociada principalmente a regiones con pendientes menores en comparación con el resto del área de estudio.

Por otro lado, la categoría de riesgo Bajo abarca apenas 0,6 hectáreas de la comuna, lo cual, no muestra un porcentaje significativo puesto que las ponderaciones asignadas se mostraron más aplicables para el riesgo Muy bajo, este patrón se asocia con la homogeneidad de las variables ambientales consideradas y con la ponderación asignada a los factores topográficos y de cobertura, los cuales tienden a concentrar los valores en rangos superiores. Si bien la clase

“Bajo” presenta escasa representación espacial, su conservación responde a la estructura ordinal del índice y permite mantener la comparabilidad con modelos similares de susceptibilidad, en cuanto a la categoría de riesgo Muy Bajo, esta se localiza predominantemente en la zona noroeste de la parroquia Maldonado, siendo el 22,31%, es decir 3.222,5 hectáreas de la comuna. Estas áreas tienen las mayores precipitaciones de la región, combinadas con temperaturas más altas y tipos de cobertura que incluyen tierras desnudas, cuerpos de agua e infraestructura, factores que contribuyen a la baja susceptibilidad al riesgo de incendios forestales.

A continuación, en la tabla 8, se esquematiza la extensión los niveles de riesgo establecidos en el mapa final según su extensión y porcentaje:

Tabla 8.

Extensión de los niveles de riesgo en el área de estudio

Nivel de riesgo	Porcentaje del área total	Número de hectáreas
Muy alto	5.44%	786,8
Alto	55.86%	8.066,8
Medio	16.35%	2.361,9
Bajo	0.004%	0,6
Muy bajo	22.31%	3.222,5

Nota: Elaboración propia

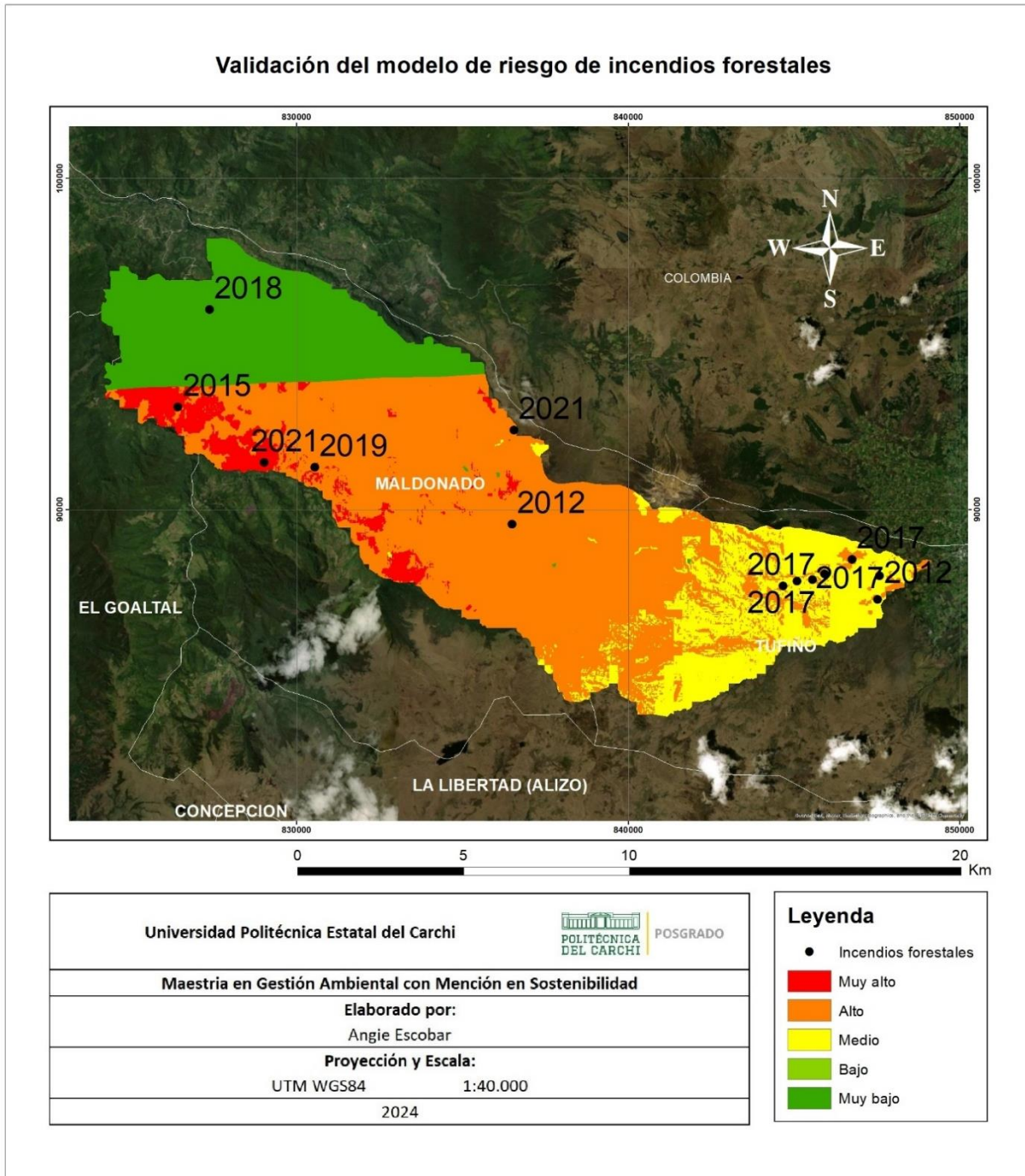
4.4.1. Validación del Modelo

Una vez obtenido el mapa final de riesgo de incendios forestales, se procede a su validación mediante la superposición del registro histórico de incendios forestales en la zona entre los años 2012 y 2023. Los registros se obtuvieron a partir de imágenes satelitales VIIRS/ NOAA-20 NRT [375m] para los años de 2018 en adelante y MODIS Terra [1km] desde el año 2012 en adelante que posee una confianza nominal (n) que indica detecciones fiables de incendios activos, libres de reflejos solares y considerándose eventos reales de fuego y son los más utilizados en el análisis de incendios; y bases de datos disponibles en la zona de estudio otorgadas por la Reserva Ecológica El Ángel. El objetivo principal es evaluar la concordancia entre las zonas de riesgo establecidas en el modelo y la presencia de incendios forestales

registrados. A continuación, en la Figura 12 se muestra la relación gráfica del mapa de riesgo con el registro de incendios:

Figura 12.

Distribución espacial de incendios desde 2012 a 2021 obtenidos de FIRMS y base de datos de REEA



Es importante considerar que los puntos de incendios provenientes de FIRMS presentan un error de geolocalización inherente asociado al sensor satelital. En el caso de VIIRS el error

posicional puede alcanzar hasta ± 375 m, mientras que para MODIS puede ser de ± 1 km. Este margen de incertidumbre espacial podría explicar algunas discrepancias puntuales entre las zonas clasificadas como de bajo riesgo y los registros de incendios observados en dichas áreas.

Para evaluar la correspondencia entre el mapa de riesgo de incendios y los eventos reales, se realizó una validación espacial en ArcGIS. Primero, el mapa de riesgo se convirtió a polígono y se unieron espacialmente con los puntos de incendios (provenientes de VIIRS y REEA) mediante la herramienta Spatial Join, usando las opciones JOIN_ONE_TO_ONE e INTERSECT. Posteriormente, se aplicó la herramienta Frequency para contar el número de puntos por clase de riesgo. Con esta información se calcularon los siguientes indicadores:

$$\% \text{ de puntos en cada clase} = \frac{n^{\circ} \text{ de puntos}}{13} \times 100$$

$$\% \text{ de área en cada clase} = \frac{\text{área de la clase}}{\text{área total}} \times 100$$

De esta forma se generó la siguiente tabla 9, donde se presentan los resultados del análisis de validación espacial del mapa de riesgo de incendios, donde se muestra la distribución de los puntos de incendio observados y el porcentaje de área correspondiente a cada clase de riesgo.

Tabla 9.

Frecuencia de los puntos de incendios

Valor	Clase de riesgo	Frecuencia (puntos)	% de puntos	Área (ha)	% del área total
1	Muy bajo	1	7.69	3,222.55	21.91
2	Bajo	0	0.00	0.62	0.00
3	Medio	5	38.46	2,631.94	17.89
4	Alto	4	30.77	8,066.07	54.84
5	Muy alto	3	23.08	786.83	5.35
Total	—	13	100	14,708.01	100

Nota: Elaboración propia

La validación espacial muestra que el 92,31 % de los incendios registrados ocurrieron en zonas clasificadas como de riesgo medio, alto o muy alto, mientras que solo el 7,69 % se localizaron en áreas de riesgo muy bajo, y ninguna ocurrencia se registró en zonas de riesgo bajo. Esto evidencia una coherencia espacial significativa entre los focos detectados y las zonas de mayor susceptibilidad, confirmando que el modelo de riesgo representa adecuadamente las áreas más propensas a incendios.

En el mapa se observa una clara relación entre las zonas de riesgo Muy alto y la presencia de incendios forestales históricos, particularmente, en el área central y occidental de la zona de estudio, donde se registraron incendios en años como 2012, 2019 y 2021. Esto confirma que dichas áreas presentan las condiciones más propicias para la ocurrencia y propagación de incendios, lo que valida la precisión del modelo en esta clasificación.

De igual manera, las zonas de riesgo Alto también muestran coincidencias con registros de incendios, destacando eventos en años como 2012 y 2017 en el sector oriental. Esto sugiere que, aunque estas áreas no son las más críticas, igualmente poseen factores ambientales y antrópicos que las vuelven susceptibles a los incendios forestales.

Por otro lado, las áreas clasificadas como de riesgo Medio también registran ciertos eventos de incendios, lo que indica que, aunque el riesgo sea moderado, aún existe la posibilidad de ocurrencia de incendios, probablemente debido a la actividad humana, como prácticas agrícolas o pecuarias.

Es importante destacar que las zonas de riesgo Bajo y Muy bajo muestran una menor incidencia de incendios, lo cual concuerda con la clasificación del modelo. No obstante, se registra un incendio aislado en una zona de riesgo Muy bajo (año 2018 en el sector norte), lo que evidencia que, si bien la probabilidad es mínima, ninguna zona está completamente exenta de la ocurrencia de incendios forestales. En este caso, factores externos como actividades humanas pudieron haber influido en la generación del evento.

Las capas explicativas empleadas en el modelo (pendiente, cobertura vegetal, temperatura, viento y precipitación) corresponden a variables de carácter estable y de comportamiento promedio en el tiempo, representativas de las condiciones ambientales estructurales del área de estudio. Los registros de incendios utilizados para la validación comprenden el periodo 2012–2023, lo que permite contrastar la susceptibilidad espacial estimada por el modelo con la distribución histórica de los eventos. De esta manera, la validación se centra en la correspondencia espacial entre las zonas de alta susceptibilidad y los incendios registrados,

fortaleciendo la consistencia del modelo en la identificación de áreas propensas a la ocurrencia de incendios forestales. Finalmente, el modelo demuestra una alta concordancia entre las zonas de riesgo Muy alto, Alto y Medio y los registros históricos de incendios, validando su precisión y utilidad para la prevención y el control de incendios forestales. La presencia de incendios en zonas de riesgo bajo resalta la necesidad de considerar factores adicionales, como la actividad antrópica, en futuros análisis.

4.5. Discusión

4.5.1. Ponderación y Resultados de la Cobertura Vegetal

El factor de la cobertura vegetal es quizá uno de los más determinantes en cuanto a la incidencia y propagación de incendios forestales, ya que está estrechamente relacionado tanto con la accesibilidad humana a estas zonas, lo que incrementa la posibilidad de ocurrencia de incendios, como con las características de las diferentes clases de cobertura, que afectan directamente la propagación del fuego. La vegetación actúa como un combustible, y su tipo y distribución pueden alterar significativamente el comportamiento de un incendio.

Se asignó la ponderación Muy bajo a los cuerpos de agua, infraestructuras y áreas clasificadas como “sin cobertura vegetal”, debido a que presentan escasa continuidad de combustible y, en consecuencia, una probabilidad reducida de propagación del fuego. No obstante, se reconoce que estos entornos no están completamente exentos de riesgo, ya que los bordes de caminos, taludes secos o márgenes de cuerpos de agua pueden actuar como puntos de ignición o de propagación secundaria. Esto se debe a que, en la zona de estudio, no hay una presencia significativa de poblados, y los cuerpos de agua actúan como barreras naturales que impiden la propagación del fuego. En este sentido, la baja ponderación asignada refleja la limitada capacidad de continuidad del fuego, más que una ausencia total de potencial de ignición.

En el caso del páramo, las plantaciones forestales y pastizales, se les asignó un nivel de riesgo medio. Aunque el páramo presenta condiciones favorables para la propagación del fuego, este riesgo aumenta dependiendo de la época del año, ya que las precipitaciones o la radiación solar pueden influir significativamente en época de estiaje, mientras que disminuirá radicalmente en época lluviosa. Además, el páramo y los bosques suelen ser ecosistemas mayoritariamente húmedos. Sin embargo, las plantaciones forestales son más propensas a incendios por su naturaleza, aunque su impacto en la zona es limitado, ya que solo ocupan un 0,7% del área total de estudio. Lo mismo ocurre con los pastizales, en particular, son altamente propensos a la

combustión debido a la naturaleza seca y ligera de su biomasa, lo que los convierte en el tipo de cobertura más vulnerable, sin embargo, en la zona de estudio representa apenas un 0,6% del área total. Es en base a esto que, tanto el ecosistema de páramo como la plantación forestal y el pastizal se les asigna un riesgo medio.

En cuanto al bosque nativo, se le asignó valores altos puesto que en el área de estudio representa 34,5% siendo el segundo tipo de cobertura más extenso del lugar. Presenta una cantidad significativa de materia vegetal propensa a arder, no obstante, estos riesgos son mitigados parcialmente por las condiciones climáticas de la zona, como la temperatura y la precipitación, especialmente en la parroquia de Maldonado, que posee mayor humedad en comparación con Tufiño.

Por otro lado, el mosaico agropecuario y la vegetación arbustiva y herbácea recibieron las mayores ponderaciones de riesgo. Esto se debe a su proximidad a zonas agropecuarias, donde se infiere una mayor incidencia de actividades antrópicas que pueden desencadenar incendios. Según lo expresado por la presidenta de la comuna La Esperanza, algunos incendios en la zona se han originado por prácticas culturales, como las quemadas intencionales con la expectativa de atraer lluvias o por quemadas de basura y residuos cerca de áreas secas con abundante vegetación. Y en cuanto a la vegetación arbustiva y herbácea se lo toma en cuenta como riesgo Muy alto debido a la mayor probabilidad de generación de incendios. Esto ocurre porque los arbustos y las plantas pequeñas están más expuestos a la radiación solar y a su composición más seca y altamente inflamable, las coberturas dominadas por pastos, así como aquellas mixtas de pastos y hierbas, fueron categorizadas con el nivel más alto de riesgo. Esto se debe a su estructura ligera y seca, que favorece la rápida propagación de incendios forestales.

Este criterio coincide con los resultados obtenidos en estudios como el de Forero Huertas (2016). En dicho trabajo, las áreas clasificadas como "no combustibles" y las "áreas urbanas" se asignaron a la categoría de "muy baja" susceptibilidad, con una calificación de 1, debido a la ausencia o mínima presencia de material vegetal inflamable. Las coberturas dominadas por árboles obtuvieron una calificación de 2 y fueron consideradas de "baja" susceptibilidad, ya que, aunque poseen biomasa vegetal, su alta humedad reduce la inflamabilidad. Las coberturas mixtas de árboles y arbustos presentaron una susceptibilidad "moderada" con una calificación de 3, debido a su combinación de estructuras vegetales que incrementan ligeramente el riesgo de propagación del fuego.

La capa de coberturas vegetales permite identificar los posibles combustibles presentes en la zona de estudio. De acuerdo con Castañeda Quinchía (2021) los combustibles vegetales incluyen cualquier material orgánico, vivo o muerto, que pueda entrar en combustión bajo la aplicación de calor. Este tipo de material presenta distintas características, como el contenido de humedad y la composición química, que afectan su facilidad de ignición.

Según Camargo Caicedo et al. (2025) las coberturas con hierbas y pastos son más susceptibles al fuego porque, aunque tienen menos material combustible, este se seca más rápido y se enciende con facilidad. En cambio, las áreas con árboles y arbustos, que tienen más material, son menos propensas a incendiarse, esto se debe a las propias características de la vegetación (Jiménez et al., 2016). En el caso del presente estudio, los tipos de cobertura con mayor susceptibilidad incluyen el bosque nativo, el mosaico agropecuario y la vegetación arbustiva y herbácea. Este último representa combustibles de rápida ignición, lo que dificulta el control del fuego, ya que estas áreas se queman rápidamente y pueden afectar grandes superficies. Por otro lado, coberturas el bosque nativo, debido a su alta humedad, tienen una ignición más lenta, pero pueden mantenerse en combustión durante periodos prolongados.

Aunque el pastizal y la vegetación herbácea deberían ser los más susceptibles al fuego, como sugieren estudios, la extensión de este tipo de cobertura en la comuna es relativamente pequeña, representando solo un 1,3% y un 0,5% del área total, respectivamente. En cambio, el bosque nativo y el páramo, que juntos abarcan el 83% del área (35% de bosque nativo y 48% de páramo), tienen una presencia mucho mayor en la comuna La Esperanza. Por otro lado, el mosaico agropecuario ocupa el 14% del área, lo que también representa una superficie considerable que puede ser susceptible a incendios, especialmente si se encuentra cerca de áreas con vegetación más inflamable.

4.5.2. Ponderación de Temperatura

En el área de estudio, se observan el rango de temperatura que oscila entre 4 °C y 18 °C, donde las temperaturas máximas están ubicadas en el noreste de la comuna, alcanzan hasta 18 °C, pero representan solo el 0,3% de la superficie total. Las zonas con temperaturas más bajas, que se encuentran en el sureste, oscilan entre 4 °C y 6 °C, abarcando un 29% del área total y corresponden a áreas de Media y Baja susceptibilidad al fuego. Otros rangos significativos incluyen áreas con temperaturas de 8-10 °C (26,8%), 10-12 °C (15,1%), y 6-8 °C (14,4%).

Las temperaturas más bajas, típicas de las zonas cercanas al páramo, donde predominan valores entre 4 y 6 °C, están asociadas a un riesgo de incendios Muy bajo. Esto se debe a que las bajas

temperaturas suelen estar acompañadas de mayor humedad en el suelo y menor radiación solar, factores que dificultan la ignición de biomasa. Sin embargo, a medida que las temperaturas aumentan hacia rangos de 6 a 10 °C, clasificados como de riesgo Bajo, la humedad del suelo se reduce progresivamente y la radiación solar aumenta.

En la zona media del área de estudio que comprende temperaturas entre 10 y 12 °C, clasificadas como riesgo Medio, la disminución significativa de los niveles de humedad facilita la acumulación de biomasa seca, incrementando el riesgo de ignición. Este efecto se intensifica en temperaturas altas, entre 12 y 14 °C, consideradas de riesgo alto, donde el estrés hídrico de la vegetación, junto con la baja humedad relativa del ambiente, genera un entorno propicio para la propagación del fuego, especialmente en áreas con alta carga de vegetación inflamable. Finalmente, en temperaturas muy altas, entre 16 y 18 °C, clasificadas como de riesgo Muy alto, la combinación de mayor radiación solar, baja humedad y estrés hídrico crea un ambiente más inflamable. Estas condiciones favorecen la rápida propagación de incendios forestales particularmente en regiones con vegetación densa.

Este análisis es similar y se basa en los hallazgos de Sadat Razavi *et al.* (2022) quienes señalan que, en ecosistemas como los bosques templados, incluso ligeros incrementos de temperatura (por ejemplo, 0,1 °C) pueden acelerar la inflamabilidad de la vegetación. Esto ocurre porque las temperaturas moderadas secan rápidamente combustibles como hojas y ramas, aumentando su susceptibilidad al fuego. Además, en estos ecosistemas, los ciclos estacionales de lluvia y la presencia de una vegetación mixta incrementan la sensibilidad a las fluctuaciones térmicas.

Estos patrones sugieren que, mientras que las bajas temperaturas y la alta humedad actúan como factores protectores. Estos patrones de temperatura influyen directamente en el comportamiento de la vegetación como combustible, ya que las temperaturas más elevadas tienden a reducir la humedad relativa, aumentando la inflamabilidad. Las áreas más cálidas, al tener menor humedad en la vegetación, pueden ser más propensas a la ignición y propagación rápida de incendios.

4.5.3. Ponderación de la Precipitación

La precipitación se considera un factor determinante en la probabilidad de propagación del fuego. La ausencia o escasez de lluvias incrementa significativamente las posibilidades de que un incendio, una vez iniciado, se expanda rápidamente y alcance una mayor intensidad. Por el contrario, precipitaciones moderadas o abundantes contribuyen a reducir o extinguir los incendios, dependiendo de su duración e intensidad. Con base en este principio, se establecieron

rangos de riesgo en función de la cantidad de precipitación anual. Para la categoría de riesgo muy alto, se consideraron los valores bajos de precipitación, entre 1.000 y 1.200 mm/año. Según Ángulo (2019) estas condiciones se aplican donde la vegetación tiende a ser altamente inflamable debido a la acumulación de material seco, debido a que la escasez de lluvias limita la capacidad del suelo para retener agua, disminuyendo así la resiliencia ecológica frente a los incendios.

En el rango de riesgo alto, correspondiente a precipitaciones entre 1.200 y 1.400 mm/año, se encuentran áreas de transición con lluvias moderadas. En estas regiones, las lluvias no logran mantener de manera constante niveles adecuados de humedad en los combustibles forestales, lo que favorece la propagación de incendios. Para el riesgo medio, con precipitaciones de entre 1.500 y 1.600 mm/año, predominan zonas donde existe un equilibrio entre humedad y sequedad. Aunque la probabilidad de incendios es menor, sigue siendo significativa durante épocas de sequía, cuando el material combustible se seca y aumenta el riesgo de ignición.

En contraste, las precipitaciones más altas, clasificadas como de riesgo bajo (1.600 a 1.800 mm/año) y Muy bajo (1.900 a 2.000 mm/año), se asocian a regiones húmedas, como los bosques tropicales lluviosos. Áreas como la Amazonía ecuatoriana o el Chocó biogeográfico presentan una constante presencia de lluvias que actúa como una barrera natural frente a la propagación de incendios. Estas precipitaciones mantienen tanto el suelo como la vegetación con altos niveles de humedad, reduciendo significativamente la probabilidad de que los combustibles lleguen al punto de ignición y limitando así el impacto de cualquier fuente de fuego.

En el área de estudio, la capa resultante mostró que se establecieron rangos para los valores de precipitación, los valores más bajos se presentaron en el sureste del área, con valores de precipitación entre 1.000 a 1.100 mm/año que corresponden al 4,8% del total del área, contrario a lo que sucede en la zona noroeste, donde gradualmente va aumentando la precipitación hasta llegar a ese punto, allí se presencia valores mayores de precipitación, 1.900 a 2.000 mm/año, que pertenece al 1% del área estudiada. Sin embargo, es importante mencionar que el mayor porcentaje de área (25%) corresponde a precipitaciones de 1.200 a 1.300 mm/año seguido de la segunda área más extensa (22%) con precipitaciones de 1.100 a 1.200 mm/año.

4.5.4. Ponderación de la Velocidad del Viento

En el área de estudio, las velocidades del viento oscilaron entre 0,7 m/s y 17 m/s. Los valores más bajos, correspondientes a velocidades de viento menores, predominan en el sector noroeste de la comuna y abarcan aproximadamente el 42% de la superficie total. Estas áreas se

caracterizan por un riesgo Muy bajo debido a la menor intensidad del viento. En contraste, los valores más altos, que alcanzan hasta 17 m/s, ocupan apenas el 1% del territorio y se localizan en el sureste de la zona, cerca de la Reserva Ecológica El Ángel, y en el norte, junto al volcán Chiles y la frontera con Colombia.

La inclusión de esta variable en el análisis se fundamenta en su influencia directa sobre la propagación de los incendios forestales, ya que, una vez iniciado el fuego, el viento actúa como un catalizador al acelerar el proceso de secado de los combustibles mediante la rápida evaporación de la humedad. Además, incrementa la provisión de oxígeno, favoreciendo la combustión y la expansión de las llamas (Pazmiño, 2019).

En el primer rango de velocidades de 0,7 a 2,8 m/s, el riesgo asignado es Muy bajo, ya que estas velocidades no generan un impacto significativo en la propagación del fuego. De forma similar, en las velocidades de 2,8 a 5,1 m/s se clasificaron como de riesgo Bajo, ya que, aunque al aumentar gradualmente las velocidades se va influyendo levemente en el proceso. En el extremo opuesto, las velocidades máximas registradas, entre 11,2 y 17,1 m/s, se consideran de riesgo muy alto. Según Özcan *et al.* (2024) estos niveles de velocidad no solo aceleran la propagación del fuego, sino que también complican significativamente las labores de extinción. El constante suministro de oxígeno intensifica el frente de las llamas, dificultando el acceso de los bomberos a las áreas afectadas.

Adicionalmente, Achu *et al.* (2021) destacan que, en regiones de mayor altitud, el efecto del viento es aún más crítico. En estos entornos, las llamas pueden propagarse rápidamente debido a la acción constante del viento, lo que incrementa la intensidad del fuego y dificulta su control. Esto refuerza la relación directa entre la velocidad del viento y el aumento del riesgo de propagación de incendios, subrayando su relevancia como factor determinante en los análisis de riesgo.

4.5.5. Ponderación de la Pendiente

Las pendientes son un factor muy importante en la ocurrencia de incendios ya que facilitan su propagación hacia arriba de la pendiente debido a la transferencia de calor por la continuidad vertical de la vegetación y su proximidad a los combustibles vegetales (Angulo, 2019). En este sentido, al existir una relación directa entre la velocidad de propagación con respecto a la pendiente, los rangos de susceptibilidad y ponderación se tomaron en cuenta asumiendo que el incremento en el porcentaje de inclinación del terreno incrementa la ocurrencia de incendios. En el área de estudio existen pendientes que van desde el 0 a 77% en su inclinación del terreno.

Por ello, en la ponderación las pendientes menores al 12% se clasificaron como de riesgo Muy bajo, mientras que las pendientes superiores al 71% se incluyeron en la categoría de riesgo Muy alto.

Las zonas con pendientes menos pronunciadas, inferiores al 12%, abarcan un 34% de la superficie total del área de estudio. Estas áreas están asociadas a un menor riesgo de propagación del fuego debido a las características planas del terreno, que reducen la velocidad de la transmisión del calor y del movimiento de la columna de convección. Las pendientes moderadas, entre el 12% y el 22%, representan el 39% de la superficie total, seguidas por pendientes entre el 22% y el 32%, que ocupan el 20% del área. Por su parte, las pendientes comprendidas entre el 32% y el 42% corresponden a sectores de riesgo alto, donde la inclinación del terreno puede favorecer el ascenso rápido de las llamas y la propagación del fuego cuesta arriba. Finalmente, las pendientes más pronunciadas, entre el 42% y el 77%, se concentran en cerca de un 5% de la superficie total y se clasifican como de riesgo muy alto, debido a su topografía abrupta y alta susceptibilidad a la propagación del fuego.

Esta clasificación responde al reconocimiento de que las pendientes pronunciadas intensifican la propagación del fuego al facilitar el transporte de calor y la preignición de los combustibles en zonas más elevadas. El efecto de la pendiente sobre la propagación del fuego ha sido fundamentado en estudios previos, y Innocent et al. (2023) confirman de forma experimental y mediante simulaciones a escala real que tanto la velocidad de propagación como la intensidad del fuego aumentan con el incremento de la inclinación del terreno, considerando pendientes de hasta 30° ($\approx 58\%$). De este modo, se respalda los estudios de Butler, Anderson y Catchpole (2007) que establecen que en pendientes superiores a 25° ($\approx 46\%$) de inclinación, la propagación del fuego se acelera significativamente debido a que el régimen de transferencia de energía cambia, pasando a estar dominado por procesos de convección. Dado que ArcGIS calcula la pendiente en porcentaje, los valores expresados en grados por la literatura fueron convertidos mediante la relación $\text{Pendiente (\%)} = \tan(\theta) \times 100$, asegurando la consistencia entre las fuentes bibliográficas y la reclasificación temática aplicada en el modelo de susceptibilidad. Estudios como los de Aiji, Loghin, Vinod y Jacob (2017) y Jiménez, Urrego y Toro (2016) han demostrado que el desarrollo del fuego es significativamente más lento en terrenos planos. Esto se debe a que la transmisión del fuego y el movimiento de la columna de convección son menos intensos en superficies con baja inclinación. En contraste, en terrenos inclinados, el fuego tiende

a propagarse con mayor velocidad hacia arriba, intensificándose en zonas con pendientes pronunciadas debido a la proximidad entre la vegetación y el calor ascendente.

4.5.6. Ponderación de Accesibilidad

En el análisis de la accesibilidad y su relación con la susceptibilidad a incendios forestales, se identificó que la proximidad a las vías de comunicación constituye un factor relevante principalmente en la probabilidad de inicio de los incendios, dada su asociación con la presencia y actividad humana. En la comuna de La Esperanza, una única vía de tercer orden atraviesa el área de estudio, lo que limita el acceso directo a ciertos sectores, pero concentra la movilidad y las prácticas humanas en una franja específica, aumentando potencialmente el riesgo de ignición en su entorno inmediato.

En este contexto, la variable de accesibilidad se consideró únicamente como factor de ignición y no como un componente de respuesta o control, dado que la misma vía que facilita el acceso para las labores de emergencia también incrementa la exposición del entorno a posibles fuentes antrópicas de fuego. Separar ambos efectos —probabilidad de inicio y capacidad de respuesta— permite mantener una interpretación más coherente del peso asignado a esta variable dentro del modelo de susceptibilidad.

La relación entre proximidad a vías y ocurrencia de incendios forestales ha sido ampliamente documentada. Estudios como el de Magalhães Neto y Evangelista (2022) demostraron que en el Pantanal brasileño, cerca del 60% de los incendios se registraron a menos de 5 km de carreteras, vías fluviales o ferrocarriles, lo que evidencia que la concentración de actividades humanas próximas a estas infraestructuras incrementa la probabilidad de ignición. Aunque el contexto territorial y cultural del Pantanal difiere del de La Esperanza, este umbral fue tomado como una referencia general, debido a la limitada disponibilidad de información local sobre puntos de ignición y a la ausencia de registros continuos de incendios georreferenciados.

Con base en ello, se definieron corredores de riesgo decreciente en función de la distancia a la vía principal: riesgo Muy alto dentro de los 1.000 metros, disminuyendo progresivamente hasta riesgo Muy bajo a los 5.000 metros de distancia. Este rango busca capturar el efecto espacial esperado de la influencia humana en torno a la única vía existente, reconociendo que la variable presenta una resolución limitada debido a la baja densidad vial del área, pero conserva valor explicativo como indicador de exposición antrópica.

Asimismo, investigaciones realizadas por Elia et al. (2020) en paisajes mediterráneos urbanizados reforzaron la relación entre cercanía a carreteras y aumento en la frecuencia de igniciones, indicando que más del 70% de los puntos recurrentes se localizan a menos de 200 m de las principales vías. Estos hallazgos, junto con la evidencia contextual de La Esperanza, respaldan que las áreas adyacentes a la vía de acceso concentran condiciones de mayor riesgo inicial, aunque la capacidad de respuesta también se vea favorecida en estas zonas.

Finalmente, se reconoce que la aplicación de umbrales definidos externamente introduce cierto grado de generalización; sin embargo, ante la ausencia de datos de ignición georreferenciada o estudios locales de densidad, esta aproximación constituye una alternativa razonable para representar el patrón espacial esperado de susceptibilidad asociado a la accesibilidad.

4.5.7. Orientación del Terreno

La ponderación de la orientación del terreno se consideró un factor relevante debido a su influencia en la exposición al sol y al viento, lo que puede afectar la probabilidad de inicio y propagación de incendios forestales. Acorde a CONAFOR (2010) generalmente, las orientaciones sur y suroeste favorecen la ocurrencia de incendios debido a la presencia de combustibles más ligeros, menores niveles de humedad y temperaturas más altas.

La orientación tiene un impacto notable porque las laderas expuestas al sol durante más tiempo alcanzan temperaturas más altas y experimentan una reducción de la humedad relativa en la vegetación que las cubre, lo que genera condiciones más propicias para la ignición, especialmente en terrenos inclinados, donde el fuego se propaga rápidamente a favor de la pendiente.

En el mapa generado (figura 9), se observa que las laderas orientadas hacia el oeste y sureste predominan en la zona de estudio, cubriendo aproximadamente el 30% de la superficie total. Estas áreas son las más expuestas a la radiación solar directa y al viento, por ende, presentan una mayor susceptibilidad a incendios debido a la reducción de humedad. Por otro lado, las orientaciones hacia el este y noreste son menos comunes, representando solo el 8% y 9% del área, respectivamente. Estas laderas, al recibir menos radiación solar directa, mantienen niveles de humedad más altos, lo que las hace menos favorables para la rápida propagación del fuego.

Sin embargo, no es posible asumir que las ponderaciones establecidas en otros estudios se aplican directamente al área de estudio. Investigaciones previas, como las de Sivrikaya y Kucuk (2021) y Makumbura *et al.* (2024), fueron realizadas en regiones del norte global, donde las

condiciones de exposición solar y la dirección de los vientos son diferentes a las de la zona ecuatorial. Por esta razón, se llevó a cabo un análisis específico del área de estudio utilizando la plataforma *Meteored*, con el objetivo de identificar las direcciones con mayor exposición a estos factores.

Los resultados mostraron que, de manera similar a los estudios mencionados, las orientaciones con mayor riesgo (clasificación de Muy alto) fueron oeste y suroeste. A estas les siguieron las direcciones norte y este, que se categorizaron con un riesgo Alto. En contraste, las orientaciones sureste y sur presentaron un menor riesgo, clasificado como Bajo y Muy bajo, respectivamente, debido a su menor exposición al viento y al sol. Este hallazgo contrasta con los estudios en los que la dirección norte se asocia a un riesgo mayor, lo que resalta la importancia de realizar análisis específicos para cada contexto geográfico.

4.6. Mapa Final del Riesgo

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que la comuna La Esperanza presenta un alto riesgo de incendios forestales, con un 5.44% del territorio clasificado como de muy alto riesgo y un 55.86% con riesgo alto. La cobertura vegetal fue identificada como el factor más determinante en la susceptibilidad a incendios, con una ponderación del 45% en el modelo. En particular, los ecosistemas de bosque nativo y páramo, que ocupan el 83% del área total, presentan condiciones que pueden favorecer incendios de larga duración una vez iniciados.

Los resultados de este estudio guardan relación con lo reportado por Ángulo (2019) en la Reserva Ecológica El Ángel (REEA), zona que colinda con el área de estudio. En la REEA, la cobertura vegetal también fue identificada como un factor clave en la susceptibilidad al fuego, junto con la precipitación, temperatura, pendiente y velocidad del viento. Ángulo, determinó que el 21% de la reserva presenta nivel medio de susceptibilidad al fuego, con un 39.33% en la categoría de alta susceptibilidad y un 39% en muy alta. Estos valores son comparables con los encontrados en la comuna La Esperanza, donde el 61.3% del área presenta un nivel alto o muy alto de riesgo. La coincidencia en los factores determinantes y los porcentajes de territorio en riesgo sugiere que ambos territorios comparten condiciones ecológicas y climáticas bastante similares que los hacen altamente vulnerables a los incendios forestales.

Por otro lado, el estudio de Arias (2016) en el municipio de Tota (Colombia) que presenta ecosistemas de páramo dentro de su área total, mostró una distribución diferente del riesgo, con una mayor proporción de áreas clasificadas como de susceptibilidad moderada (35%) y baja

(49%), mientras que las zonas de alto y muy alto riesgo fueron menores (16% y 0.6%, respectivamente). Esto contrasta con los hallazgos en la comuna La Esperanza, donde el riesgo alto es predominante. La diferencia en los resultados puede estar asociada a variaciones en los factores ambientales y en la dinámica de uso del suelo entre las regiones estudiadas.

Un aspecto relevante de este estudio fue la validación del modelo a través de registros históricos de incendios (2012-2023), lo que permitió comprobar la correlación entre las áreas clasificadas con riesgo alto y la ocurrencia real de incendios. Esto refuerza la fiabilidad del modelo empleado y su potencial para ser utilizado en estrategias de prevención en la zona. Además, se identificó que las áreas con mayor riesgo se encuentran principalmente en el oeste de la parroquia de Maldonado y en la zona media de la comuna, donde hay una mayor presencia de actividad humana y proximidad a vías de acceso. Este hallazgo coincide con estudios previos que han señalado la influencia de la actividad antrópica como un factor clave en la ocurrencia de incendios forestales.

CAPITULO V

PROPUESTA

5.1. Objetivos de la Propuesta

Elaborar una propuesta de plan integral de prevención y control de incendios forestales en la comuna La Esperanza que contribuya como referencia para el fortalecimiento de la gestión de emergencias relacionadas con el fuego.

5.1.1 Objetivos Específicos

- Analizar los factores de riesgo y las condiciones ambientales que influyen en la ocurrencia de incendios forestales en la comuna La Esperanza.
- Proponer estrategias para la integración del plan dentro de programas de gestión ambiental en el ámbito de la prevención de los incendios forestales.
- Identificar estrategias y medidas de control basadas planes de mitigación y metodologías utilizadas en otros estudios sobre gestión de incendios forestales, adaptándolas a las condiciones de la comuna La Esperanza.

5.2. Diagnóstico

La comuna La Esperanza se ubica en una zona montañosa caracterizada por ecosistemas de páramo y bosque nativo. El territorio presenta pendientes pronunciadas, variaciones climáticas significativas y diversos tipos de cobertura vegetal, factores que influyen directamente en la incidencia y propagación de incendios forestales. La región también cuenta con una importante interacción humana, caracterizada por actividades agropecuarias y culturales que, en algunos casos, pueden actuar como detonantes de eventos de fuego y a nivel histórico, se encontraron registros de 12 incendios forestales ocurridos entre el 2012 a 2021.

En el análisis de la cobertura vegetal se revela la presencia de tipos de vegetación altamente susceptibles al fuego, como los pastizales, plantaciones forestales y mosaicos agropecuarios que representan combustibles que facilitan la rápida ignición y propagación del fuego. En contraste, los bosques nativos y los ecosistemas de páramo, aunque menos inflamables debido a su mayor contenido de humedad, también pueden mantener el fuego durante largos periodos una vez iniciado. En cuanto a las temperaturas que se muestran en el mapa de isotermas, oscilan entre los 4 °C y los 18 °C, con zonas cálidas en el noreste que presentan mayor susceptibilidad

a incendios debido a la reducción de humedad en la vegetación. Asimismo, las precipitaciones varían entre 1.000 y 2.000 mm/año, donde las áreas más secas del sureste son las de mayor riesgo.

El área presenta pendientes pronunciadas, superiores al 32%, que representan un riesgo elevado debido a la propagación acelerada del fuego hacia arriba. Además, las laderas orientadas al oeste y sureste, expuestas a mayor radiación solar, presentan condiciones más propicias para la ignición. La proximidad de las vías principales incrementa el riesgo de ignición puesto que fomenta la cercanía a actividades humanas como quemas no controladas. No obstante, también facilita la respuesta rápida ante eventos de fuego, lo que destaca la necesidad de gestionar adecuadamente estas zonas. Finalmente, existen velocidades de viento superiores a 11 m/s, presentes en sectores del sureste que intensifican la propagación del fuego y dificultan las labores de extinción.

En cuanto a la preparación para emergencias ambientales la comuna todavía enfrenta varios desafíos, actualmente se cuenta con la contratación de dos guardabosques que tienen la tarea de vigilar el páramo y prevenir las acciones que puedan afectar en su entorno como es dejar basura, hacer fogatas o dañar el ecosistema en general. De igual forma, en el año 2023 se llevó a cabo unas capacitaciones para formar a un grupo como brigadistas comunitarios enfocándose en el manejo integral del fuego, esta formación es un paso significativo para la comunidad ya que les permite fortalecer las capacidades locales para las posibles emergencias. Sin embargo, cabe destacar que los guardabosques de la Reserva Ecológica el Ángel prestan su ayuda de manera ocasional, igualmente el cuerpo de bomberos que atiende las emergencias pero que no se encuentran establecidos en Tufiño sino en la cabecera cabtonal Tulcán lo que podría provocar retrasos en la respuesta cuando ocurra un incidente. Por ende, aunque existen esfuerzos puntuales para la protección contra incendios forestales en la comunidad se carece de un plan de prevención y control para incendios forestales y esta situación evidencia la necesidad de fortalecer este aspecto.

Tabla 10.

Resumen de características climáticas y geográficas del área de estudio.

Categoría	Datos
Extensión territorial	14.325 hectáreas
Rango altitudinal	1.640 - 4.720 m.s.n.m.
Ubicación geográfica	Latitud norte: 0° 45' 00'' - 0° 50' 00'' Longitud oeste: 78° 06' 28.8'' - 77° 47' 37.8''
Temperatura	4°C - 18°C
Precipitación anual	1.000 - 2.000 mm/año
Velocidad del viento	0,7 - 17 m/s
Pendiente	12% - 71%

Nota: Elaboración propia

5.3. Estrategias de Prevención de Incendios Forestales

Esta sección establece estrategias preventivas orientadas a evitar la ocurrencia de incendios forestales. A partir del conocimiento de las características de la zona de estudio y los potenciales impactos, se formulan las propuestas específicas para el plan de prevención. Para ello se realizó la revisión de dos planes de prevención: el plan de prevención, control y mitigación de incendios forestales para el área de compensación biótica y restauración ecológica del proyecto hidroeléctrico El Quimbo (huila) (Guevara Lozano *et al.*, 2016) y el Protocolo General de acción y respuesta para incendios forestales y de zacateras (Rodríguez Chávez, 2020). Y basándome en las metodologías de los siguientes estudios: Formulación de un plan de prevención de incendios forestales para un sector de la vereda chuntame, Cajicá (Bello Mora y Vidal Neira, 2021) y Metodología para la elaboración de planes comunitarios de prevención de incendios forestales (Alvarado Ojeda *et al.*, 2015). De los cuales se identifican ideas principales y acciones de prevención, las cuales pueden adaptarse al plan de la comuna.

Tabla 11.

Programas de prevención de incendios forestales

PROGRAMA 1. EDUCACIÓN Y SENSIBILIZACIÓN COMUNITARIA

Objetivo	Implementar la prevención de incendios forestales en la población mediante actividades educativas para la identificación de los impactos y los riesgos, así como medidas para prevenir los mismos.
Lugar	Escuelas de las parroquias Tufiño y Maldonado
Actividades	<p style="text-align: center;">Actividad 1. Programas escolares educativos</p> <p>Se organizarán talleres educativos, charlas de sensibilización y actividades lúdicas que conlleven a la toma de conciencia del colectivo estudiantil conformado por los grados 8°, 9° y 10° de básica superior y los grados 1°, 2° y 3° de bachillerato de la Unidad Educativa de Tufiño y la Unidad Educativa Maldonado. Estos programas educativos deben explicar detalladamente las causas de los incendios, sus consecuencias para el medio ambiente, la economía local, y las medidas preventivas que todos pueden adoptar.</p> <p>Las charlas deben ser impartidas por expertos en manejo de incendios y medio ambiente, quienes pueden proporcionar información actualizada y responder a las preguntas de los estudiantes y docentes. Al finalizar cada sesión se aplicará una evaluación post-capacitación que incluirá encuestas de conocimientos adquiridos.</p> <hr/> <p>Tiempo de duración: 2 sesiones al año, 4 horas cada una (8 horas anuales).</p> <hr/> <p>Presupuesto estimado: USD 1.100 anuales. Incluye honorarios de facilitadores (\$500), material didáctico (\$200), transporte (\$100), refrigerios (\$200) y logística (\$100).</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Actividad 2. Entrenamiento a la comunidad</p> <hr/> <p>Se implementará capacitaciones a los habitantes sobre cómo identificar riesgos y qué hacer en caso de riesgo de incendio, asegurando que comprendan la importancia de las medidas preventivas como no tirar colillas</p>

de cigarrillo, dejar fogatas encendidas o creencias autóctonas correspondientes al realizar quemas para atraer la lluvia.

Dicho entrenamiento debe incluir sesiones prácticas impartidas en los salones comunales de las parroquias Tufiño y Maldonado, donde los participantes aprendan a reconocer señales de peligro, como la acumulación de material combustible, las condiciones climáticas propicias para generar incendios y la peligrosidad al generar quemas no controladas en la agricultura.

Para la fase práctica de esta actividad, se deberá realizar simulacros de evacuación y respuesta a incendios para que la comunidad esté preparada para actuar rápidamente y coordinada en caso de emergencia. Esto debe ser accesible a todos los miembros de la comunidad, incluyendo niños, ancianos y personas con discapacidad para asegurarse de que todos sepan cómo protegerse y ayudar a los demás.

Para medir la efectividad del entrenamiento, se aplicará una evaluación post-capacitación que incluirá encuestas de conocimientos adquiridos, pruebas prácticas de respuesta ante incendios y monitoreo del cambio de comportamiento en la comunidad.

Tiempo de duración: 2 sesiones al año, 4 horas cada una (8 horas anuales).

Presupuesto estimado: USD 1.300 anuales. Cubre capacitadores (\$600), material gráfico (\$100), simulacros (\$400), refrigerios y logística (\$200).

Actividad 3. Distribución de material informativo

Se plantea esta estrategia para mantener informada a la comunidad y a la población externa que se acerque a la comuna con fines de recreación, turismo y comercio. Para ello se plantea la distribución de material informativo diseñados como carteles y guías prácticas que expliquen de manera clara y concisa los riesgos asociados con los incendios forestales y las mejores prácticas para prevenirlos. Dichos materiales deben estar distribuidos en lugares públicos estratégicos como en escuelas, centros comunitarios, mercados, parques y paradas de transporte público.

Para mayor alcance de distribución de la información se deberán emplear plataformas digitales como redes sociales, entre las más usadas Facebook y WhatsApp para compartir estos recursos, asegurando que la información esté disponible para todos en cualquier momento. Además, se crearán cuñas radiales que se transmitirán como recordatorios de prevención, especialmente durante épocas de estiaje. También se colocarán anuncios informativos y preventivos a lo largo de la vía entre Tulcán y Maldonado especialmente en las entradas a áreas turísticas y áreas protegidas.

Tiempo de implementación: 3 meses

Monitoreo de cumplimiento: Trimestral

Presupuesto estimado: USD 900. Impresión de afiches, guías (\$500), difusión radial (\$200), producción de cuñas y contenido digital (\$200).

Responsables GAD's parroquiales, líder de cabildo indígena, líderes comunitarios, clubs ecológicos, comuna La Esperanza.

Indicadores 80% de estudiantes capacitados.

Al menos 4 capacitaciones realizadas al año.

70% de retención de conocimientos en prueba post-capacitación.

Total estimado del programa: USD 3.300 por año.

PROGRAMA 2. GESTIÓN RESPONSABLE DE INGRESO A ZONAS DE ALTO VALOR ECOLÓGICO

Objetivo Regular el acceso de personas externas a la población hacia el área de páramo y bosque nativo de la comuna La Esperanza, con el fin de prevenir incendios forestales durante la época de estiaje.

Lugar Área de páramo y bosque nativo de la comuna La Esperanza

Actividades **Actividad 1. Regulación de visitas**

Se recomendarán rutas turísticas autorizadas en coordinación con guías locales y comunitarios, para canalizar adecuadamente las visitas hacia zonas de menor sensibilidad ecológica. Estas rutas estarán señaladas e incluirán paradas interpretativas donde se brinde información sobre el ecosistema y normas de prevención. El enfoque está en orientar a los visitantes para que eviten actividades de riesgo como fogatas, campamentos o recorridos sin acompañamiento en zonas donde no se pueda supervisar acciones propensas a generar incendios.

Tiempo de implementación: 5 meses

Presupuesto estimado: USD 660. Paneles (\$540), diseño del material de señalización (\$120).

Actividad 2. Control comunitario y acompañamiento educativo

Se organizarán patrullajes informativos y de acompañamiento por parte de los guardabosques comunitarios. Su función será educar a los visitantes sobre los riesgos de incendio y las prácticas responsables de ingreso.

En puntos de ingreso clave, se promoverá el registro voluntario de personas externas. Esta base de datos permitirá llevar seguimiento del tránsito de turistas y visitantes, identificar patrones y reforzar la prevención.

Se establecerán puntos ecológicos con recipientes para recolección de residuos en zonas estratégicas, los cuales serán instalados y monitoreados por personal del GAD Parroquial en coordinación con los guardabosques de la comuna.

Tiempo de implementación: 5 meses

Presupuesto estimado: USD 570. Puntos ecológicos para basura y reciclaje, con pintura y rotulación (\$450). Libretas, carpetas, bolígrafos para registro de visitantes (\$120).

Responsables GAD Parroquiales, técnicos ambientales del municipio o prefectura, guardabosques comunitarios, presidente/a de la comuna La Esperanza, coordinadores de turismo comunitario.

Indicadores Registro mensual del número de visitantes externos orientados por los guías o guardabosques.

Cantidad de residuos recolectados mensualmente en puntos de control (peso en kilogramos).

Total estimado del programa: USD 1.230.

**PROGRAMA 3. CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE CORTA
COMBUSTIBLES**

Objetivo Reducir la carga de material combustible en zonas críticas para retardar la propagación del fuego y proteger los ecosistemas locales.

Lugar Zonas periurbanas y rurales de la comunidad, identificadas como de alto riesgo por la acumulación de material combustible.

Actividades **Actividad 1. Identificación de áreas**

En esta primera fase, se efectuará el reconocimiento técnico del terreno especialmente de zonas críticas con alta probabilidad de riesgo de incendios y adicional donde existan asentamientos humanos ubicados en zonas rurales con alta densidad de vegetación inflamable a sus alrededores. Se priorizarán áreas con vegetación seca, proximidad a fuentes de ignición humanas y pendiente superior al 30%, lo que facilita la propagación del fuego. Para este proceso, se requerirá la participación de un equipo multidisciplinario conformado por expertos en manejo forestal, brigadistas comunitarios y líderes locales.

Tiempo de implementación: 1 mes

Presupuesto estimado: USD 1.180. Transporte, viáticos, remuneración a expertos y líderes locales.

Honorarios técnicos de expertos en manejo forestal (\$480). Apoyo brigadistas comunitarios (\$480). Transporte y combustible (\$120). Material de levantamiento de datos mediante mapas, GPS portátil alquiler, libretas (\$100).

Actividad 2. Implementación de raleos, podas y manejo de la cubierta herbácea

En esta etapa, se llevará a cabo la reducción de la vegetación vertical y horizontal en las zonas priorizadas. Se utilizarán herramientas manuales como machetes, sierras y guadañas.

Se establecerán líneas cortafuegos estrechas y selectivas, de 3 metros de ancho según el tipo de vegetación, únicamente en zonas estratégicas. Las labores incluirán poda baja de ramas y raleo en zonas densas (poda selectiva), el manejo manual de la cubierta herbácea con machetes, guadañas y sierras; y la recolección del material vegetal sin quema, destinado a compostaje o uso agrícola

Estas acciones se ejecutarán en coordinación con técnicos ambientales y con las debidas autorizaciones del MAATE, cuando aplique.

Tiempo de implementación: 3 meses

Presupuesto estimado: USD 2.630. Herramientas manuales (\$406). Mano de obra de 8 personas x 10 días (\$1.600). Equipo de protección personal (\$280). Transporte y logística (\$250). Acopio y traslado de material vegetal alquiler camioneta y sacos (\$100).

Actividad 3. Monitoreo y mantenimiento continuo

Una vez establecidas las líneas corta-combustibles, se realizará un monitoreo semestral para evaluar su efectividad y estado. Las inspecciones incluirán revisiones de las condiciones del suelo, la densidad de vegetación y el cumplimiento de los objetivos de prevención.

	Tiempo de implementación: Semestral
	Presupuesto estimado: USD 650. Honorarios brigadistas comunitarios (\$480). Transporte y combustible (\$100). Materiales de mantenimiento (\$70).
Responsables	Expertos en manejo forestal, brigadistas comunitarios, GAD's Parroquiales y líderes locales.
Indicadores	<p>Establecimiento de 2 km de cortafuegos.</p> <p>Informe técnico de zonas intervenidas, con justificación de cada línea implementada.</p> <p>Realización de inspecciones de mantenimiento semestrales.</p> <p>Reutilización del 100% del material vegetal removido.</p>
Total estimado del programa:	USD 4.460.
PROGRAMA 4. ASIGNACIÓN DE ROLES Y RESPONSABILIDADES EN LA COMUNIDAD	
Objetivo	Garantizar una respuesta eficiente y organizada ante incendios forestales mediante la distribución clara de roles y responsabilidades entre los miembros de la comunidad.
Lugar	Salones comunitarios.
Actividades	Actividad 1. Definición de roles clave y asignación de responsabilidades
	Se deberá determinar los roles para cada miembro involucrado en la prevención y control de los incendios forestales de la comuna, se identificarán funciones específicas que serán necesarias para la prevención, detección, y respuesta ante incendios.

Se realizará el nombramiento de miembros de la comunidad para ocupar roles definidos según habilidades, disponibilidad y cercanía a las áreas críticas.

Coordinador de emergencias: Asignado al líder comunitario con experiencia en organización y toma de decisiones. Sus responsabilidades serán supervisar todas las actividades de respuesta, mantener comunicación con brigadistas externos y autoridades, y gestionar recursos locales.

Monitores de vigilancia: Asignados a habitantes que trabajan o viven cerca del páramo, su función será observar y reportar cualquier indicio de humo o fuego. Los reportes se harán mediante aplicaciones de mensajería o llamadas en zonas con señal, y a través de radios portátiles o aviso directo en puntos comunitarios en zonas sin conectividad.

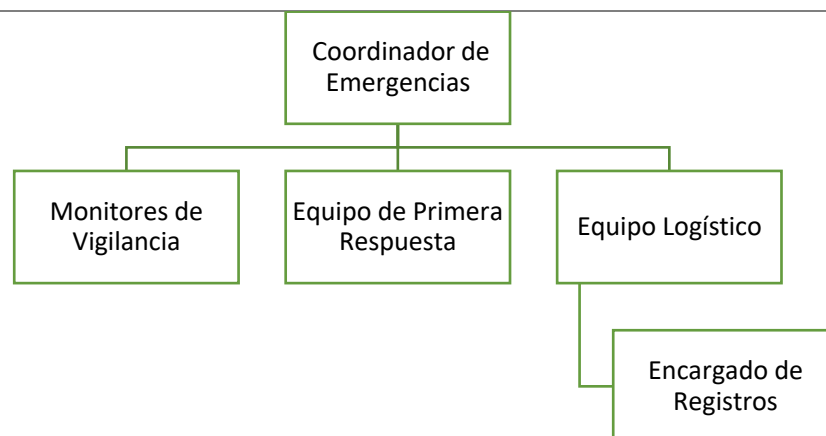
Equipo de primera respuesta: Asignado a jóvenes voluntarios, brigadistas capacitados, y trabajadores del páramo. Sus responsabilidades serán atender de inmediato los focos de incendio con herramientas básicas, contener el fuego hasta la llegada de las brigadas principales, y proteger áreas vulnerables.

Equipo logístico: Asignado a las personas con habilidades organizativas, preferiblemente quienes no puedan estar físicamente en el campo. Sus responsabilidades será coordinar recursos como agua, alimentos, herramientas y transporte para las brigadas, y mantener comunicación constante entre equipos.

Encargado de registros: Asignado a la persona con conocimientos básicos en manejo de datos, como secretarios, maestros o estudiantes. Sus responsabilidades serán documentar cada evento de incendio, las acciones tomadas, los recursos utilizados, y generar informes para evaluación y atención futura.

Figura 13.

Organigrama visual de la cadena de mando



Tiempo de implementación: 3 meses

Presupuesto estimado: USD 800. Reuniones, impresión de documentos, logística.

Actividad 2. Capacitación en funciones específicas

Entrenamiento técnico para fortalecer los conocimientos, habilidades y destrezas de cada integrante con la finalidad de conocer sus responsabilidades y evitar incidentes en el desarrollo de las acciones preestablecidas durante el apoyo de una emergencia presentada.

Tiempo de duración: 3 meses

Presupuesto estimado: USD 2.000. Honorarios, materiales, alimentación y transporte.

Responsables Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos, GAD's parroquiales, líderes locales, cuerpo de bomberos

Indicadores Capacitación de al menos 20 voluntarios en roles específicos.

Creación de un organigrama funcional aprobado por la comunidad.

Implementación de protocolos de respuesta ante incendios en el 100% de los sectores de riesgo identificados.

Total estimado del programa: USD 2.800.

Nota: Elaboración propia

5.4. Estrategias de control de incendios forestales

En esta sección se presentan las estrategias orientadas a minimizar la propagación de los incendios forestales y proteger tanto a la comunidad como a los ecosistemas. Estas medidas, al igual que las medidas de prevención, se basan en los trabajos de Guevara Lozano *et al.* (2016), Rodríguez Chávez (2020), Bello y Vidal (2021), y Alvarado *et al.* (2015).

Tabla 12.

Programas de control de incendios forestales

PROGRAMA 1. DETECCIÓN Y AVISO DEL INCENDIO

Objetivo	Garantizar la detección temprana de incendios forestales y la comunicación oportuna a las autoridades y brigadas de respuesta para minimizar el impacto ambiental y social.
Lugar	Páramo de La Esperanza y áreas de vegetación densa cercanas al límite del territorio comunal.
Actividades	<p style="text-align: center;">Actividad 1. Detección y notificación inmediata</p> <p>La detección y aviso de un incendio forestal deberá realizarse mediante un sistema coordinado que involucra las comunidades locales, autoridades ambientales y tecnología de gama media. La detección inicial la pueden brindar los guardabosques, brigadas forestales o incluso los habitantes cercanos que puedan identificar señales como humo, llamas, o cambios bruscos en la vegetación.</p> <p>Una vez se haya confirmado la presencia del fuego se deberá notificar inmediatamente a los guardabosques, la línea de bomberos, policía o al GAD Parroquial de Tufiño. Alternativamente, se pueden emplear sistemas tecnológicos como cámaras de monitoreo o sensores de temperatura para detectar anomalías en tiempo real.</p> <p>Presupuesto estimado: USD 3.500. Radios de comunicación (\$1.200), sensores/cámaras (\$1.000), capacitación (\$500), material informativo y logística (\$800).</p> <p style="text-align: center;">Actividad 2. Activación del protocolo de respuesta</p>

Una vez identificado el incendio, la persona o sistema que lo detecta debe informar inmediatamente a las autoridades competentes. Este aviso debe incluir información precisa: ubicación exacta, magnitud del incendio, condiciones climáticas actuales, y posibles amenazas a comunidades cercanas y a su población. Los guardabosques al recibir el aviso de humo deben verificar y validar la información, como la ubicación y descripción del tipo de incendio en zonas forestales (área privada, área protegida, etc.). Dependiendo de la incidencia del fuego se confirmará la necesidad de solicitar apoyo a entidades como el cuerpo de bomberos o entidades de salud.

Presupuesto estimado: USD 1.200. Capacitación, simulacros y coordinación interinstitucional.

Actividad 3. Comunicación y coordinación

Tras la recepción del aviso, las autoridades activan un plan de respuesta que incluye movilizar a las brigadas forestales para establecer líneas cortafuegos y evaluar la necesidad de evacuaciones preventivas. Simultáneamente, se debe informar a las comunidades cercanas y coordinar con instituciones relacionadas, como la policía y los bomberos.

Las primeras acciones incluyen delimitar el área afectada para evitar la expansión del fuego, proteger la fauna y recursos prioritarios, y garantizar la seguridad de las brigadas. Se deben activar estrategias de comunicación para mantener informada a la población y coordinar esfuerzos de manera efectiva, minimizando el impacto ambiental y social del evento.

La brigada antes de movilizarse a la zona del incidente deberá planear e informar sobre los roles a desempeñar cada uno de los integrantes de dicho equipo, se verificará los insumos o equipos con los que cuenta y organizará la logística con la que atenderán la emergencia (quien es la persona al mando, nombre del jefe o líder, el número de miembros, el tipo de transporte, ya sea a pie, en auto o camioneta, y tiempo estimado de llegada).

	Presupuesto estimado: USD 2.500. Radios adicionales, megáfonos, red de comunicación, reuniones.
Responsables	Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, GAD's parroquiales, líderes locales, cuerpo de bomberos policía, guardabosques.
Indicadores	Reducción del tiempo de respuesta desde la detección hasta la notificación a menos de 10 minutos. Al menos el 90% de reportes de incendios atendidos correctamente. Implementación del 100% del sistema de comunicación en comunidades de alto riesgo.
Total estimado del programa:	USD 7.200.

PROGRAMA 2. ARRIBO A SITIOS DE INCENDIO

Objetivo	Facilitar el acceso rápido y seguro de las brigadas a las áreas afectadas por el fuego, reduciendo el tiempo de respuesta.
Lugar	Áreas de alta susceptibilidad al fuego dentro de la comunidad de La Esperanza y sus alrededores.
Actividades	<p>Actividad 1. Planificación del acceso y transporte seguro</p> <p>Antes de movilizarse al sitio del incendio, se deben identificar rutas principales y alternativas para llegar al lugar, considerando obstáculos como caminos bloqueados, terrenos irregulares, o pendientes pronunciadas. Es fundamental verificar las condiciones climáticas actuales y su proyección, ya que factores como el viento, la lluvia o la sequía pueden influir significativamente en el comportamiento del incendio.</p> <p>El transporte debe seleccionarse de acuerdo con las condiciones del terreno. En zonas accesibles por carretera, se priorizan vehículos todo terreno; en áreas remotas, puede ser necesario el desplazamiento a pie.</p> <p>Todo el equipo debe estar preparado con herramientas esenciales, como azadones, mochilas contraincendios, además de sistemas de comunicación portátiles como radios de largo alcance o teléfonos</p>

satelitales y botiquín de primeros auxilios. Cada miembro debe llevar equipo de protección personal (EPP), que incluye cascos, gafas, guantes, mascarillas contra humo, y ropa ignífuga.

Presupuesto estimado: USD 4.800. Vehículo 4x4 compartido o alquiler, herramientas, EPP, combustible.

Actividad 2. Coordinación y comunicación constante

Desde el inicio del viaje, el equipo debe mantenerse en contacto constante con el centro de operaciones, actualizando sobre su progreso, condiciones del terreno, y posibles cambios en el comportamiento del incendio.

El uso de sistemas de comunicación confiables, como radios bidireccionales o teléfonos satelitales, es esencial en áreas donde las señales telefónicas son débiles o inexistentes, aquí, el líder de la brigada se encarga de recibir y transmitir información, asegurándose de que todo el equipo esté informado sobre los riesgos potenciales y las estrategias a seguir.

Además, se deben realizar actualizaciones periódicas sobre el estado del equipo y del transporte, como posibles problemas mecánicos o retrasos en el acceso, en el caso de que se identifiquen cambios como en la intensidad del fuego o en la obstrucción de las rutas planificadas, el equipo debe detenerse en un punto seguro y coordinar nuevas estrategias con el centro de operaciones.

Presupuesto estimado: USD 1.200. Radios, teléfonos satelitales, baterías, cargadores.

Actividad 3. Reconocimiento y establecimiento del punto de control

Al llegar al límite del incendio el equipo deberá detenerse en un punto seguro que sea lo suficientemente cercano para evaluar la situación, pero alejado del riesgo como humo denso o terreno inestable, aquel se denominará punto de control. Desde ahí el líder de la brigada organiza al equipo, asignando roles específicos como observadores, responsables de abrir líneas cortafuegos, y personal logístico. Además, se realizará un

reconocimiento del área, ya sean observaciones visuales directas, con el uso de binoculares, o el despliegue de drones para evaluar la magnitud del incendio.

El líder realizará el reconocimiento y evaluación del incendio, luego se informa de la situación a los equipos de respuesta activados y se mencionará si la situación puede ser controlada con el recurso disponible en el sitio o requiere de apoyo. Para ellos puede registrar los datos más específicos tales como:

- ✓ Fecha
- ✓ # incidente
- ✓ Sitio, comunidad o aldea, Parroquia
- ✓ Nombre del líder
- ✓ Institución
- ✓ Tiempo de llegada
- ✓ Coordenadas UTM
- ✓ Acceso de camino
- ✓ Superficie estimada (has)
- ✓ Tipo de cobertura de vegetación afectada

Protocolos de seguridad para el desplazamiento en diferentes condiciones

Terreno inclinado o con pendientes:

- ✓ Desplazarse en zigzag para evitar caídas y reducir la fatiga.
- ✓ Evitar correr en terrenos inestables o con rocas sueltas.

Zonas de vegetación densa:

- ✓ Avanzar en grupos manteniendo contacto visual entre los miembros.
- ✓ Utilizar machetes o herramientas adecuadas para abrir paso sin generar chispas.

Condiciones climáticas adversas:

- ✓ En caso de fuertes vientos, evitar moverse en dirección contraria a la propagación del fuego.

-
- ✓ Suspender la movilización en caso de tormentas eléctricas y buscar refugio seguro.
-

Presupuesto estimado: USD 1.500. Binoculares, drones económicos, señalética, fichas.

Responsables Cuerpo de bomberos, GAD's parroquiales, líderes locales, policía, guardabosques, Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos.

Indicadores Reducción del tiempo promedio de llegada de las brigadas al lugar del incendio a menos de 30 minutos.

Creación y señalización de al menos 5 rutas de acceso prioritarias.

Disponibilidad del 100% del equipamiento de seguridad en cada movilización.

Total estimado del programa: USD 7.500.

PROGRAMA 3. INTERVENCIÓN DIRECTA DEL INCENDIO

Objetivo Mitigar la propagación de incendios forestales mediante técnicas eficientes de supresión y control.

Lugar Áreas de incidencia del fuego en la comuna La Esperanza.

Actividades **Actividad 1. Contención de los flancos y líneas de propagación del incendio**

La primera acción es contener los flancos del incendio para evitar que las llamas sigan extendiéndose. Esto se logra delimitando líneas cortafuegos a lo largo de las áreas donde el fuego está avanzando. Las líneas cortafuegos son franjas de terreno despejado de vegetación, donde se elimina cualquier material combustible que pueda alimentar las llamas. Estas líneas se construyen utilizando herramientas manuales, motosierras y en algunos casos, maquinaria pesada.

El equipo debe trabajar en grupos organizados y posicionarse estratégicamente en las zonas menos intensas del fuego, conocidas como los flancos, para reducir riesgos. En situaciones más críticas, se puede

usar agua, espuma retardante o líneas de control químicas para sofocar las llamas. Es fundamental monitorear constantemente la dirección del viento y la topografía del terreno, ya que cambios repentinos pueden intensificar el incendio y poner en peligro al personal.

Figura 14.

Gráfico explicativo de función de los cortafuegos



Nota: Tomada de Ciudad CCS. Recuperado de <http://www.ciudadccs.info/?p=160168>

Presupuesto estimado: USD 3,500. Herramientas, brigadistas, logística.

Actividad 2. Ejecución de contrafuegos o quemas controladas

Cuando el incendio es de gran magnitud y el avance no puede detenerse con líneas cortafuegos, se emplean contrafuegos como medida de control. Esta técnica consiste en realizar quemas controladas en áreas estratégicas para consumir el material combustible antes de que las llamas principales lo alcancen. Este método requiere un análisis detallado del comportamiento del fuego y condiciones óptimas, como vientos suaves y controlados.

Los contrafuegos son ejecutados únicamente por personal altamente capacitado, ya que implican riesgos significativos si no se manejan adecuadamente. El equipo debe posicionarse a favor del viento y trabajar en coordinación para garantizar que el fuego secundario se mantenga dentro de las áreas designadas. Al mismo tiempo, se mantiene un

monitoreo constante del progreso y se informa al puesto de mando sobre los resultados para ajustar las estrategias si es necesario.

Presupuesto estimado: USD 2.500. Personal especializado, monitoreo.

Actividad 3. Protección de zonas críticas y puntos sensibles

Simultáneamente a las acciones de contención y contrafuegos, el equipo debe priorizar la protección de zonas críticas, como viviendas cercanas, fuentes de agua, infraestructuras clave, o áreas con alto valor ecológico. Esto implica la creación de nuevas líneas de defensa alrededor de estos puntos sensibles y la movilización de recursos adicionales para protegerlos.

En estas áreas, se utilizan sistemas de aspersores, equipos de bombeo de agua, y barreras físicas para evitar que las llamas se acerquen. Además, el equipo debe trabajar en estrecha colaboración con las comunidades locales, informándolas sobre el progreso del incendio y organizando evacuaciones si es necesario. Esta acción no solo busca minimizar los daños, sino también garantizar la seguridad de las personas y reducir las pérdidas materiales.

Presupuesto estimado: USD 3.000. Aspersores, bombas, barreras, transporte.

Responsables	Brigadas Especializadas, cuerpo de bomberos, GAD's parroquiales, líderes comunitarios, policía, guardabosques.
Indicadores	Reducción del 40% en la propagación del fuego mediante líneas cortafuegos. Realización de al menos 3 ejercicios prácticos de contención de incendios anuales. Implementación de contrafuegos en al menos 80% de los incendios registrados. Protección efectiva del 100% de las zonas críticas y puntos sensibles identificados.
Total estimado del programa:	USD 9,000.

PROGRAMA 4. MONITOREO Y EVALUACIÓN CONTINUA

Objetivo	Asegurar la mejora constante de las estrategias implementadas mediante un sistema de seguimiento y evaluación.
Lugar	Comuna La Esperanza.
Actividades	<p>Actividad 1. Organización comunitaria y distribución de responsabilidades</p> <p>La comunidad debe organizarse en brigadas rotativas para garantizar el monitoreo continuo. Se designan responsables de cada sector, quienes deben cubrir su área asignada en rondas periódicas. Se utiliza un sistema de comunicación sencillo, como radios o teléfonos básicos, para reportar hallazgos.</p> <p>Presupuesto estimado: USD 1.200. Incentivos, logística, radios.</p> <p>Actividad 2. Establecimiento de puntos estratégicos de observación</p> <p>En un área pequeña, se identifican puntos elevados o despejados que permitan observar la mayor extensión posible del territorio. Desde estos puntos, los equipos realizan vigilancia visual usando binoculares y evalúan las condiciones climáticas básicas, registrando cualquier cambio relevante.</p> <p>Presupuesto estimado: USD 800. Binoculares, bitácoras, vigilancia.</p> <p>Actividad 3. Creación de un sistema de registro y reporte inmediato</p> <p>Se diseñan formularios sencillos (en papel o digital) para registrar datos como hora, ubicación, intensidad del fuego, dirección del viento, y otros factores. Esta información se comparte rápidamente con el puesto de mando y, si es necesario, con las autoridades locales, priorizando la activación de un plan de respuesta rápida.</p> <p>Presupuesto estimado: USD 1.000. Formularios digitales, respaldo, capacitación.</p>
Responsables	GAD's parroquiales, líderes comunitarios, guardabosques.

Indicadores	<p>Creación de al menos 2 brigadas comunitarias de monitoreo.</p> <p>Realización de 4 inspecciones estacionales para la evaluación de estrategias.</p> <p>Implementación de un sistema de registro digital para el 100% de los incidentes.</p> <p>Reducción del tiempo de respuesta ante incendios en un 30% mediante mejor coordinación y planificación.</p>
Total estimado del programa:	USD 3.000.

Nota: Elaboración propia

Este plan de prevención y control de incendios forestales en la comuna La Esperanza busca ser una guía para entender mejor los riesgos y cómo se pueden reducir. Aunque no es un documento oficial, reúne información basada en otros estudios y metodologías que podrían aplicarse en la zona. La idea es que, si en algún momento las autoridades o la comunidad quieren trabajar en un plan más completo, este documento les sirva de referencia. Además, a continuación, en la Tabla 13, se incluye un cronograma propuesto que organiza las acciones en el tiempo, pensando en cómo se podrían llevar a cabo de manera efectiva si se decide implementar el plan en el futuro.

Tabla 13.

Cronograma

Programas	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Programa 1. Educación y sensibilización comunitaria												
Actividad 1. Programas escolares educativos	X					X						
Actividad 2. Entrenamiento a la comunidad		X					X					
Actividad 3. Distribución de material informativo			X	X	X							
Programa 2. Control de acceso a zonas de mayor riesgo												
Actividad 1. Restricciones de acceso	X	X	X	X	X							
Actividad 2. Vigilancia y monitoreo					X							
Programa 3. Construcción y mantenimiento de corta combustibles												
Actividad 1. Identificación de áreas						X						
Actividad 2. Implementación de raleos, podas y manejo de la cubierta herbácea							X	X	X			
Actividad 3. Monitoreo y mantenimiento continuo												X
Programa 4. Asignación de roles y responsabilidades en la comunidad												
Actividad 1. Definición de roles clave y asignación de responsabilidades							X	X	X			
Actividad 2. Capacitación en funciones específicas										X	X	X

Nota: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.2. Conclusiones

En este trabajo se lograron identificar las zonas con mayor riesgo de incendios forestales en la comuna La Esperanza. Para hacerlo, se usaron herramientas de mapas y análisis geoespacial, lo que permitió analizar factores como la vegetación, el clima, la topografía, y la cercanía a carreteras. Con esta información, se creó un mapa que muestra qué partes del área estudiada tienen mayor probabilidad de incendios.

Los resultados indicaron que un 5.44% del territorio tiene un riesgo muy alto de incendios. La mayor parte del área, un 55.86%, tiene un nivel alto de riesgo. También se encontró que un 16.35% está en riesgo medio, mientras que las zonas con bajo riesgo son muy pocas, solo un 0.004% (0.6 hectáreas). Finalmente, un 22.31% fue clasificado con riesgo muy bajo. Esto demuestra la importancia de tomar medidas para prevenir incendios, sobre todo en las áreas más vulnerables. Los resultados indican que la mayor parte del área de estudio tiene un nivel de riesgo alto.

Las zonas de mayor riesgo se concentran principalmente en el oeste de la parroquia de Maldonado y en la zona media de la comuna, coincidiendo con áreas de actividad humana y proximidad a vías de acceso, y estando presente dentro de los ecosistemas de páramo, bosque nativo y actividad agropecuaria. La cobertura vegetal resultó ser el factor más determinante en el riesgo de incendios, con una ponderación del 45% en el modelo. Los ecosistemas de bosque nativo y de páramo, que ocupan el 83% del área total (35% y 48% respectivamente), presentan características que los hacen susceptibles a incendios prolongados una vez iniciados.

En función de los factores de riesgo combinados en el área de estudio, se plantea un plan de prevención y control de incendios forestales que ayude a reducir estos riesgos. Entre las estrategias que se propusieron incluyen la capacitación de la comunidad, la creación de franjas cortafuego y la mejora del sistema para detectar incendios a tiempo. Estas estrategias no solo son preventivas, sino también adaptativas, puesto que se diseñan en función de las condiciones del territorio y la participación activa de la población. Esto es clave, ya que la gestión del riesgo no puede hacerse únicamente desde lo institucional, sino que requiere del compromiso de la comunidad que lo habita.

En conclusión, la comuna La Esperanza no presenta incendios forestales de forma frecuente, pero sí cuenta con áreas extensas que poseen condiciones que pueden favorecer su generación

y propagación. La combinación de esos factores hace que algunas zonas sean más susceptibles al fuego. Sin embargo, con una buena planificación y la participación de la comunidad, es posible reducir estos riesgos y fortalecer la prevención para proteger el ecosistema y los servicios ambientales que brinda este territorio.

6.3. Recomendaciones

Para obtener resultados más específicos en futuros estudios, se recomienda emplear otras metodologías que permitan comparar los resultados obtenidos. Además, se sugiere que al realizar el estudio se incorpore más variables, tales como húmedas, exposición al sol, tipo de vegetación, cantidad de material combustible, infraestructura, cuencas hidrográficas, expansión agrícola, que podrían influir en los resultados y ofrecer un panorama más completo.

Es necesario actualizar ocasionalmente el mapa de susceptibilidad a incendios forestales, donde implique incorporar nuevas variables ambientales y climáticas que mejoren la precisión de los modelos. Además, se integraría imágenes satelitales actualizadas y de mejor resolución que permitan detectar los cambios en la cobertura vegetal, lo que contribuirá a una mejor gestión y prevención de los incendios.

Otro punto importante es investigar cómo el cambio climático está afectando la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en la región para ver cómo los patrones de riesgo podrían cambiar en el futuro y establecer algunas proyecciones. Además, se debe estudiar las plantas que hay en la comuna para ver cuáles son más inflamables y cuáles se pueden usar en reforestaciones con menor riesgo de propagar el fuego. Finalmente, se recomienda hacer estudios sobre cómo organizar el territorio de la comuna, considerando las zonas de alto riesgo y poniendo restricciones para algunas actividades.

REFERENCIAS

- Achu, Y. *et al.* (2021). Topographic criteria affect the occurrence, behavior, and direction of forest fires.
- Alvarado Ojeda, A., Haltenhoff Duarte, H., Katelman, T., y Rojo Almarza, A. (2015). Metodología para la elaboración de planes comunitarios de prevención de incendios forestales (1ª ed.). Corporación Nacional Forestal. <https://gfmco.online/wp-content/uploads/Chile-Methodology-Community-Wildfire-Prevention-Planning-2015.pdf>
- Angulo Valencia, E. D. (2019). Análisis de zonas susceptibles a incendios de cobertura vegetal de la Reserva Ecológica “El Ángel”, Provincia del Carchi [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte], Ibarra, Ecuador.
- Anzoateguia, L. V., Gil-Leguizamón, P. A., & Sanabria-Marin, R. (2023). Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en páramo del Parque Regional Natural Cortadera (Boyacá, Colombia). *Bosque (Valdivia)*, 44(1), Artículo e159. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002023000100159>
- Arias Muñoz, P., Cabrera-García, S., & Jácome-Aguirre, G. (2024). *A multicriteria geographic information system analysis of wildfire susceptibility in the Andean region: A case study in Ibarra, Ecuador*. *Fire*, 7(3), 81. <https://doi.org/10.3390/fire7030081>
- Armenteras, D., Gonzáles, T., Ríos, O., Meza, M. y Oliveras, I. (2020). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia*, 42(1). <https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353>
- Bill, K., Dieleman, C., Baltzer, J., Degré-Timmons, G., Mack, M., Day, N., Cumming, S., Walker, X. y Turetsky, M. (2023). Recuperación del carbono orgánico del suelo tras incendios en bosques boreales canadienses. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-023-00854-0>
- Bisikalova, E. (2025). Ecología de la regeneración de la vegetación en zonas quemadas de diversa edad. *Boletín de la KSAU*. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-3-14-22>
- Boada, C y Campaña, J. (2008). *Composición y diversidad de la flora y la fauna en cuatro localidades de la provincia del Carchi*. EcoCiencia. Gobierno Provincia del Carchi. https://www.academia.edu/37766081/Composici%C3%B3n_y_diversidad_de_la_flora

[y la fauna en cuatro localidades de la provincia del Carchi Un reporte de las evaluaciones ecológicas rpidas](#)

- Butler, B. W., Anderson, W. R., y Catchpole, E. A. (2007). Influence of slope on fire spread rate. USDA Forest Service Proceedings, 75. https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_p046/rmrs_p046_075_082.pdf
- Brück, S., Torres, B., & De Lourdes Teixeira De Moraes Polizeli, M. (2023). The Ecuadorian Paramo in danger: What we know and what might be learned from northern wetlands *Global Ecology and Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02639>.
- Cáceres Lazo, J. C. (2022) *Evaluación de los efectos de un incendio en las propiedades hidrofísico-químicas del suelo y biomasa vegetal en una zona de páramo en el área de amortiguamiento del Parque Nacional Cajas*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/544318565.pdf>
- Cardozo, G., H. y Schenetter, M.L. (1976). Estudios ecológicos en el páramo de Cruz Verde, Colombia. III. La biomasa de tres asociaciones vegetales y la productividad de *Calamagrostis effusa* (H.B.K.) Steud y *Paepallanthus columbiensis* Ruhl. en comparación con la concentración de clorofila. *Caldasia* 11(54):69-83. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/34320>
- Carrillo Gómez, Y. P., González Jiménez, M. P., y Nieto Troncoso, D. M. (2019). Zonas susceptibles a incendios forestales y diagnóstico de conflicto arbolado, Comuna 1, Girardot - Cundinamarca. Corporación Universitaria Minuto de Dios, Rectoría Cundinamarca, Sede/Centro Tutorial Girardot.
- Castañeda Quinchía, D. E. (2021). *Cómo orientar la gestión del riesgo de desastres por incendios forestales a nivel municipal*. Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – Fondo Acción.
- Castillos, M., Pedernera, P. y Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista ambiente y desarrollo de CIPMA*, 19(3,4). <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Bosques-Ecosistemas/25.pdf>
- Cisneros Vaca, C., Calahorrano, J. y Manzano, M. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos. *Colombia Forestal*, 27(1). <https://doi.org/10.14483/2256201X.20111>

- Código Orgánico Administrativo. (2010, 20 de julio). Registro Oficial No. 265. Registro Oficial de la República del Ecuador.
- Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización. (2010, 21 de julio). Registro Oficial No. 204. Registro Oficial de la República del Ecuador.
- Constitución de la República del Ecuador. (2008, 20 de octubre). Registro Oficial No. 449. Registro Oficial de la República del Ecuador.
- Coral Chacón, F., y Chamorro Benavides, J. P. (2016). *Zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Cauca*. Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica.
- Cruz-García, G. S., Sachet, E., Blundo-Canto, G., Vanegas, M., y Quintero, M. (2017). ¿Hasta qué punto se han investigado los vínculos entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano en África, Asia y América Latina? *Servicios Ecosistémicos*, 25, 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.005>
- de Magalhães Neto, N., y Evangelista, H. (2022). Human Activity Behind the Unprecedented 2020 Wildfire in Brazilian Wetlands (Pantanal). *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.888578>
- Djabri, A. D., Bouhata, R., Guellouh, S., y Bensekhria, A. (2023). Wildfire vulnerability assessment and mapping using remote sensing, GIS and weighted overlay method in the eastern Aures in Khenchela, Algeria. *Geoadria*, 4218. <https://doi.org/10.15291/geoadria.4218>
- Elia, M., Giannico, V., Spano, G., Laforteza, R., y Sanesi, G. (2020). Likelihood and frequency of recurrent fire ignitions in highly urbanised Mediterranean landscapes. *International Journal of Wildland Fire*. <https://doi.org/10.1071/wf19070>
- Esri. (s.f.). How Aspect works. ArcGIS Pro Documentation. Recuperado el 7 de julio de 2025. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-aspect-works.htm>
- Fernández, G., Merchán, L., & Sánchez, J. Á. (2025). Spatial representation of soil erosion and vegetation affected by a forest fire in the Sierra de Francia (Spain) using RUSLE and NDVI. *Land*, 14(4), 793. <https://doi.org/10.3390/land14040793>

- 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 [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
[file:///C:/Users/hp/Downloads/ForeroHuertasAndr%C3%A9Felipe2016%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/ForeroHuertasAndr%C3%A9Felipe2016%20(1).pdf)
- Gobierno Autónomo Descentralizado del Carchi (2019). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia del Carchi. Carchi Prefectura.
https://carchi.gob.ec/2016f/phocadownload/PDOT/PDOT_2019-2023.pdf
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Tufiño. (2020). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDyOT) 2019 - 2023. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial: Consejo de Planificación Parroquial.
<https://tufino.gob.ec/carchi/wp-content/uploads/2021/03/PDOT-COMPRIMIDO.pdf>
- Gualan, A y Orbe, J. (2019). *Plan de reforestación de zonas afectadas por incendios forestales nivel 2 en la comunidad Pesillo – Canton Cayambe* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana de Quito]. Recuperado de
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17695/1/UPS%20-%20ST004289.pdf>
- Guerrero Barros, M. C. (2023) *Efecto de los incendios sobre las condiciones del suelo de páramo en el Ecuador: una revisión sistemática* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Recuperado de
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/43060/4/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Guevara Lozano, A. J., Hurtado Vásquez, J. C., y Leal Pulido, R. O. (2016). Plan de prevención, control y mitigación de incendios forestales para el área de compensación biótica y restauración ecológica del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo (Huila) [Trabajo de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Recuperado de
<http://hdl.handle.net/11349/4871>
- Herrera Jiménez, K., F. (2017). *Identificación hidrológica de zonas de recarga de las fuentes de abastecimiento de agua en la comuna la esperanza, provincia del Carchi* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de

<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/6547/1/03%20RNR%20239%20T RABAJO%20DE%20GRADO%20.pdf>

Hofstede, Robert, *et al.* (2014). *Los páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimientos sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema de páramo*. UICN, Quito, Ecuador.

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2021, 25 de marzo). NTP 599: Riesgos laborales en la gestión de residuos sanitarios. [Archivo PDF]. Recuperado de https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_599.pdf/390d3910-3ad3-404b-8d12-ef93a1b7f0b0

Jain, P., Castellanos-Acuña, D., Coogan, S., Abatzoglou, J., & Flannigan, M. (2021). Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature. *Nature Climate Change*, 12, 63-70. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01224-1>

Jiménez G., A. M., Urrego G., L. E., & Toro R., L. J. (2016). Evaluación del comportamiento de incendios de la vegetación en el norte de Antioquia (Colombia): análisis del paisaje. *Colombia Forestal*, 19(2), 161–180. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a03>

Lozano, Patricio, Armas, Aracely, y Machado, Verónica. (2016). Estrategias para la conservación del ecosistema páramo en Pulinguí San Pablo y Chorrera Mirador, Ecuador. *Enfoque UTE*, 7(4), 55-70. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.114>

Makumbura, R. K., Dissanayake, P., Gunathilake, M. B., Rathnayake, N., Kantamaneni, K., y Rathnayake, U. (2024). Spatial mapping and analysis of forest fire risk areas in Sri Lanka – Understanding environmental significance. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100680>

Mahdavi, A., Fallah Shamsi, S. R., y Nazari, R. (2012). Forests and rangelands' wildfire risk zoning using GIS and AHP techniques. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 10(1), 43-52. https://www.researchgate.net/publication/263734114_Forests_and_rangelands'_wildfire_risk_zoning_using_GIS_and_AHP_techniques

Mariscal, S., Ríos, M., y Soria, F. (2020). *Multicriteria analysis for identifying forest fire risk zones in the Biological Reserve of the Sama Cordillera, Bolivia*. *International Archives*

- of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 113–118.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-113-2020>
- Newberry, B., Power, C., Abreu, R., Durigan, G., Rossatto, D. y Hoffmann, W. (2020). ¿Umbrales o gradientes de inflamabilidad? Determinantes del fuego en las transiciones sabana-bosque. *The New Phytologist*, 228 3, 910-921.
<https://doi.org/10.1111/nph.16742>
- Nieto Sanabria, L. (2017). Economía verde y Derechos de la Naturaleza: El Proyecto Socio Bosque en Ecuador. *Nuestra praxis. Revista de Investigación Interdisciplinaria y Crítica Jurídica*, pp. 56-74. <https://aneicj.org/wp-content/uploads/2019/06/nieto.pdf>
- Nuthammachot, N., y Stratoulías, D. (2021). *Multi-criteria decision analysis for forest fire risk assessment by coupling AHP and GIS: Method and case study*. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 17443–17458. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01394-0>
- Ocampo-Zuleta, K., & Parrado-Rosselli, Á. (2023). Diversidad funcional en un subpáramo andino afectado por incendios forestales en Colombia. *Diversidad de Plantas*, 45(4), 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.11.007>
- Özcan, Z., Caglayan, İ., Kabak, Ö. *et al.* (2024). Integrated risk mapping for forest fire management using the analytical hierarchy process and ordered weighted average: a case study in southern Turkey. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06810-y>
- Pallikarakis, A., y Konstantopoulou, F. (2024). Multi-Criteria Wildfire Risk Hazard Assessment in GIS Environment: Projection for the Future and Impact on RES Projects Installation Planning. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12, 242–265.
<https://doi.org/10.4236/gep.2024.125014>
- Parra Lara, Á, Bernal Toro, F, Armenteras Pascual, D, González Alonso, F, Morales Rivas, M, Pabón-Caicedo, J y Páramo Rocha, G. (2011). Incendios de la cobertura vegetal en Colombia. (libro). Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10614/9>.

- Paspuel Güel, S. F. (2020). *Conflictos socioambientales por derechos de agua en un contexto de cambio climático: caso Comuna La Esperanza, en la parroquia Tufiño, cantón Tulcán, provincia del Carchi* [Tesis de especialización, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador]. Recuperado de <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/16807/2/TFLACSO-2020SFPG.pdf>
- Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 7(1), 10–18. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>
- Pazmiño, Y.C., de Felipe, J., Vallbé, M., Cargua, F., & Pazmiño, Y. (2024). Evaluación de las sinergias de los cambios de uso del suelo y la calidad de los servicios ecosistémicos en la zona andina del centro del Ecuador. *Applied Sciences*, 14(2), 498. <https://doi.org/10.3390/app14020498>
- Pradeep, G., Prasad, M., Kuriakose, S., Ajin, R., Oniga, V., Rajaneesh, A., Mammen, P., Patel, N., Nikhil, S., & Danumah, J. (2021). Forest Fire Risk Zone Mapping of Eravikulam National Park in India. *Croatian journal of forest engineering*. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1137>.
- Quistial Valencia, G. M. (2016). *Propuesta de un plan de prevención de incendios forestales, en las parroquias la carolina y salinas, cantón Ibarra, provincia de Imbabura. 2015* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte).
- Ríos Hervas, J. G. (2023). Causas y origen de los incendios forestales en el Ecuador. *Revista INNDEV – Innovation & Development Ciencias del Sur*, 2(4), 11–21. <https://doi.org/10.69583/innde.v2n4.2023.79>
- Rodríguez Ascuntar, N. G. (2018) *Los recursos turísticos de la parroquia de Tufiño y el turismo comunitario* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Estatal del Carchi]. Recuperado de <http://repositorio.upec.edu.ec/bitstream/123456789/594/1/329%20Los%20recursos%20tur%C3%ADsticos%20de%20la%20parroquia%20de%20Tufi%C3%B1o%20y%20el%20turismo%20comunitario.pdf>

- Rodríguez Chávez, O. G. (2020). Protocolo general de respuesta de incendios y zacateras. Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre, Gobierno de la República de Honduras.
- Sarangó Cobos, J., Muñoz, J., Muñoz, L. y Aguirre, Z. (2019). Impacto ecológico de un incendio forestal en la flora del páramo antrópico del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 101-114. https://drive.google.com/file/d/1qs_AuVzW2wZT7ZaItuXKytznSimMU11/view
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Desastres. (2023). SITREP Nro.57 Incendios Forestales. Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2023/11/SITREP-Nro.-57-Incendios-Forestales-01012023-al-16112023.pdf>
- Sivrikaya, F., & Kucuk, O. (2021). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, 68, 101537. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537>
- Ubeda, M., Rojas, I., Vecco, C. y Pecho, J. (2022). *Gestión de los incendios forestales en el Páramo y las Yungas de la Reserva de Biosfera Gran Pajatén: prevención, respuestas y aprendizajes*. <https://doi.org/10.51252/4512>
- Vargas Torres, J. M., & Vizúete Amores, D. A. (2020). Contenido, calidad y dinámica de las fracciones orgánicas como indicadores de calidad de suelos bajo diferentes cambios de uso en Achupallas. *Environmental Science*.
- Vásquez Narváez, L. (2019). Comuna La Esperanza -Vigencia y la vitalidad de un pueblo Pasto. Historia de la comuna La Esperanza. ECOCIENCIA. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56567.pdf>
- Vergara, P., & De Pellegrin, I. (2025). A systematic review of ecosystem services in the Rabanal páramo (Colombia). *Integrated Environmental Assessment and Management*, 21(3), 485–495. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjae029>

ANEXOS

Anexo A. Abstract firmado

Topic: Strategies for the prevention and control of forest fires in the La Esperanza Commune, Carchi Province

Abstract

The objective of the research was to design strategies for preventing and controlling forest fires thru a geospatial analysis of fire susceptibility in the páramo of the La Esperanza commune, Carchi Province, thereby contributing to ecosystem conservation and the sustainability of its environmental services. The study adopted a quantitative approach and was of the action research type. The research used geospatial analysis with ArcGIS and AHP to design fire prevention and control strategies. The maps identified areas with different levels of risk. This information facilitates the precise identification of the most vulnerable areas and guides the implementation of preventive measures and fire management strategies. Multi-criteria analysis provided protected area managers with tools for informed decision-making and resource allocation. The results identified that the Very High risk covers 5.5% in the west, with dry, easily accessible vegetation. High risk covers 55.9%, associated with native forests and páramos. Medium risk covers 16.4% in the east, where slopes are gentler, and low risk is minimal, associated with low temperatures and vegetation less prone to ignition. Model validation using historical data confirms the alignment between past fires and high-risk areas. A fire risk map was developed, and a Forest Fire Prevention and Control Plan was proposed. The plan focused on preventive actions, including community education, restricting access to vulnerable areas, constructing and maintaining firebreaks, and assigning community roles. For control, early detection thru monitoring systems, rapid deployment of fire crews, the use of backfires, and the protection of critical areas were prioritized. These measures aim to strengthen fire management in the community, improving its preparedness and response to emergencies.

Keywords: Geospatial analysis, ArcGIS, forest fires, páramo, prevention.



Anexo B. Aval de traducción

Tulcán, 30 de octubre de 2025

AVAL DE TRADUCCIÓN

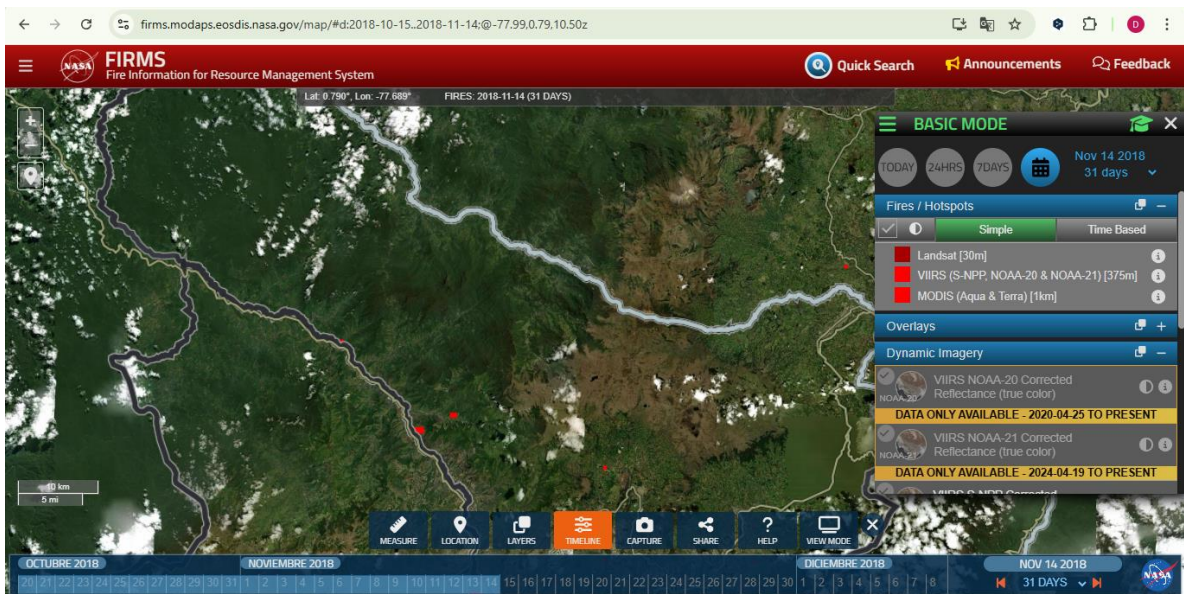
Yo, **Iván Mateo Mina Vásquez**, con cédula de ciudadanía **0401733985**, docente del idioma inglés como lengua extranjera, con número de registro **1031-2024-2G67588** en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, declaro que después de revisar y hacer observaciones a la traducción del “Abstract” del trabajo: “Estrategias para la prevención y control de incendios forestales en la Comuna La Esperanza, Provincia Carchi”, mismo que pertenece a **Angie Daniela Escobar Portilla**, con cédula **1004813695**.

Se expide este certificado validando el “Abstract” del trabajo mencionado para los fines que los interesados estimen conveniente.

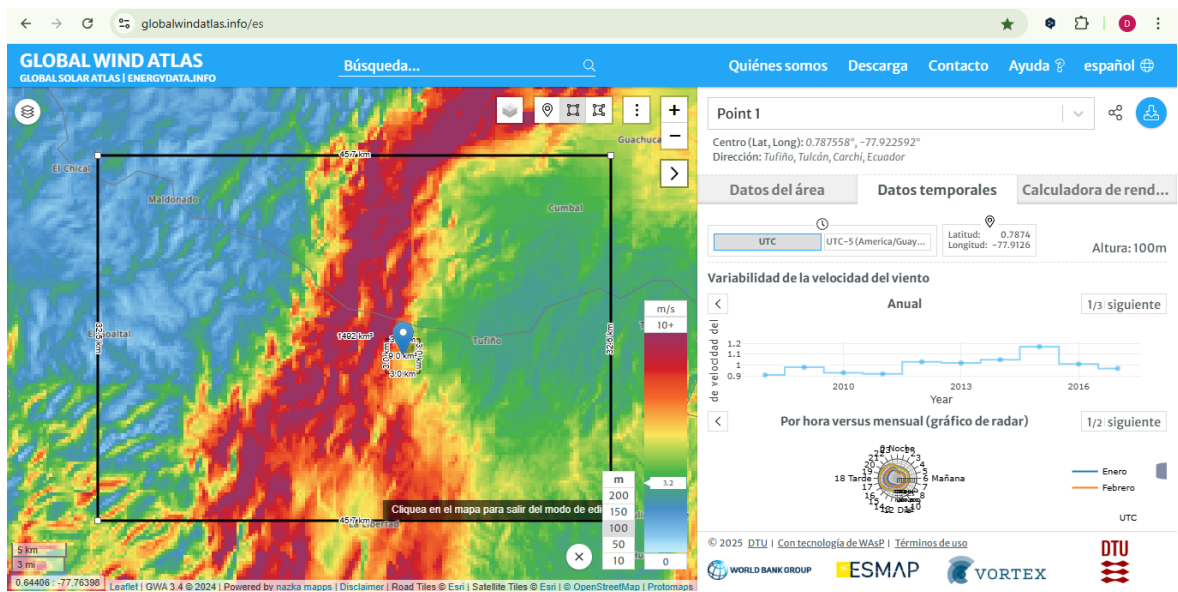

Firmado electrónicamente por:
IVÁN MATEO MINA
VÁSQUEZ
Validar únicamente con FIRMADOC
Lic. Iván Mateo Mina Vásquez

Contacto: 0963262467

Anexo C. Mapa interactivo de riesgo de incendios FIRMS de la NASA



Anexo D. Mapa interactivo de Global Wind Atlas para identificar dirección y áreas potenciales de vientos fuertes.



Anexo E. Registro Inicial y Ajustes en la Calculadora AHP-OS para el Análisis Jerárquico

	Cuál prefiere A - AHP priorities - o B?	Igual	¿Cuánto más?
1	<input checked="" type="radio"/> VIENTO <input type="radio"/> PRECIPITACION	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 <input checked="" type="radio"/> 5 0 6 0 7 0 8 0 9
2	<input type="radio"/> VIENTO <input checked="" type="radio"/> TEMPERATURA	<input checked="" type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
3	<input checked="" type="radio"/> VIENTO <input type="radio"/> VIAS	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 <input checked="" type="radio"/> 5 0 6 0 7 0 8 0 9
4	<input checked="" type="radio"/> VIENTO <input type="radio"/> ORIENTACION	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 <input checked="" type="radio"/> 5 0 6 0 7 0 8 0 9
5	<input checked="" type="radio"/> VIENTO <input type="radio"/> PENDIENTE	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
6	<input type="radio"/> VIENTO <input checked="" type="radio"/> COBERTURA	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
7	<input type="radio"/> PRECIPITACION <input checked="" type="radio"/> TEMPERATURA	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 <input checked="" type="radio"/> 5 0 6 0 7 0 8 0 9
8	<input checked="" type="radio"/> PRECIPITACION <input type="radio"/> VIAS	<input checked="" type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
9	<input checked="" type="radio"/> PRECIPITACION <input type="radio"/> ORIENTACION	<input checked="" type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
10	<input type="radio"/> PRECIPITACION <input checked="" type="radio"/> PENDIENTE	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
11	<input type="radio"/> PRECIPITACION <input checked="" type="radio"/> COBERTURA	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 <input checked="" type="radio"/> 9
12	<input checked="" type="radio"/> TEMPERATURA <input type="radio"/> VIAS	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 <input checked="" type="radio"/> 5 0 6 0 7 0 8 0 9
13	<input checked="" type="radio"/> TEMPERATURA <input type="radio"/> ORIENTACION	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 <input checked="" type="radio"/> 5 0 6 0 7 0 8 0 9
14	<input checked="" type="radio"/> TEMPERATURA <input type="radio"/> PENDIENTE	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
15	<input type="radio"/> TEMPERATURA <input checked="" type="radio"/> COBERTURA	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
16	<input checked="" type="radio"/> VIAS <input type="radio"/> ORIENTACION	<input checked="" type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
17	<input type="radio"/> VIAS <input checked="" type="radio"/> PENDIENTE	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
18	<input type="radio"/> VIAS <input checked="" type="radio"/> COBERTURA	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 <input checked="" type="radio"/> 9
19	<input type="radio"/> ORIENTACION <input checked="" type="radio"/> PENDIENTE	<input type="radio"/> 1	0 2 <input checked="" type="radio"/> 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9
20	<input type="radio"/> ORIENTACION <input checked="" type="radio"/> COBERTURA	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 <input checked="" type="radio"/> 9
21	<input type="radio"/> PENDIENTE <input checked="" type="radio"/> COBERTURA	<input type="radio"/> 1	0 2 0 3 0 4 0 5 0 6 <input checked="" type="radio"/> 7 0 8 0 9
CR = 1.5% OK			

Prioridades resultantes

Prioridades

Estos son los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares:

Cat	Prioridad	Rank	(+)	(-)
1	VIENTO	2	3.1%	3.1%
2	PRECIPITACION	5	0.6%	0.6%
3	TEMPERATURA	2	3.1%	3.1%
4	VIAS	5	0.6%	0.6%
5	ORIENTACION	5	0.6%	0.6%
6	PENDIENTE	4	2.3%	2.3%
7	COBERTURA	1	11.7%	11.7%

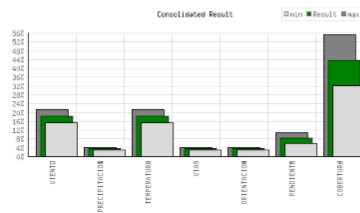
Número de comparaciones = 21
Ratio de consistencia CR = 1.5%

Matriz de decisiones

Los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión:

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	5.00	1.00	5.00	5.00	3.00	0.33
2	0.20	1	0.20	1.00	1.00	0.33	0.11
3	1.00	5.00	1	5.00	5.00	3.00	0.33
4	0.20	1.00	0.20	1	1.00	0.33	0.11
5	0.20	1.00	0.20	1.00	1	0.33	0.11
6	0.33	3.00	0.33	3.00	3.00	1	0.14
7	3.00	9.00	3.00	9.00	9.00	7.00	1

Principal auto valor = 7.122
Solucion autovector: 4 iteracions, delta = 5.4E-9



Anexo F. Configuración de Ponderaciones y Rangos en la Herramienta Weighted Overlay de ArcGIS

Raster	% Influence	Field	Scale Value
2cobe_ras	44	CTN2	
		BOSQUE NATIVO	4
		MOSAICO AGROP	5
		INFRAESTRUCTU	1
		VEGETACION ARB	5
		AREA SIN COBER	1
		PASTIZAL	3
		PARAMO	3
		CUERPO DE AGU	Restricted
		PLANTACION FOR	3
		NODATA	NODATA
2temp_ras	18	RANGO	
		6-8	2
		4-6	1
		16-18	5
		14-16	4
		12-14	4
		10-12	3
		8-10	2
Raster	% Influence	Field	Scale Value
Reclass_int_v	18	Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
		NODATA	NODATA
2precip_ras	4	RPP	
		1000-1100	5
		1100-1200	5
		1300-1400	5
		1200-1300	4
		1400-1500	4
		1500-1600	Restricted
		1600-1700	Restricted
		1700-1800	Restricted
		1900-2000	Restricted
		NODATA	NODATA
Reclass_int_5	8	Value	
		1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
		NODATA	NODATA
22vias_ras	4	VALUE	
		1000	5
		2000	4
		3000	3
		4000	2
		5000	1
		NODATA	NODATA
or_reclass	4	VALUE	
		2	4
		3	3
		4	4
		5	1
or_reclass	4	VALUE	
		2	4
		3	3
		4	4
		5	1
		6	2
		7	5
		8	5
		9	3
		10	4

Anexo g. Histograma del ráster y la curva acumulada del IRI

